

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari"

Corso di Laurea Magistrale in

Chimica Industriale

Classe LM-71 - Scienze e Tecnologie della Chimica Industriale

**Studio fluidodinamico di un reattore continuo
agitato meccanicamente tramite tecniche**

PIV e PLIF

Tesi di laurea sperimentale

CANDIDATO

Daniele Gavoto

RELATORE

Chiar.mo Prof. Alessandro Paglianti



CORRELATORE

Prof. ssa Giuseppina Montante

Sessione II

Anno Accademico 2013-2014

*Dedicata al Prof. Paglianti, alla Prof. Montante ed a coloro che mi sono stati vicini nel
compimento di questo percorso*

INDICE

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	2
1. LA MISCELAZIONE IN REATTORI AGITATI	3
1.1 TIPOLOGIE DI AGITATORI	5
1.1.1 Agitatori veloci	5
1.1.2 Agitatori lenti	10
1.2 PARAMETRI CARATTERISTICI DEGLI AGITATORI	11
1.2.1 Potenza dissipata	12
1.2.2 Potenza fornita dalla pompa	16
1.2.3 Velocità del bordo della girante	17
1.2.4 Capacità di pompaggio	17
1.2.5 Tempo di miscelazione	19
1.3 FLUIDODINAMICA DEI SISTEMI AGITATI	21
1.3.1 Campi di moto in sistemi monobasici a bassa viscosità	22
1.3.2 Fluidodinamica della turbina Rushton	25
1.3.3 Campi di moto in sistemi monobasici multi girante	27
2. TECNICHE DI MISURA STRUMENTAZIONE	28
2.1 LA TECNICA PIV IN SISTEMI MONOFASE	28
2.1.1 Principi di funzionamento della tecnica PIV in sistemi monofase	29
2.2 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CLASSIFICAZIONE DEI LASER	31
2.3 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DELLE TELECAMERE PER PIV	33
2.4 PARTICELLE TRACCIANTI	35
2.5 LA TECNICA PLIF	37
2.5.1 Traccianti fluorescenti	38
2.5.2 Traccianti utilizzati per misure di concentrazione in liquidi	39
2.5.3 Procedura di acquisizione	40
3. CONFIGURAZIONE DEL REATTORE E PROCEDURA DI ACQUISIZIONE	
DATI	41
3.1 Reattore agitato meccanicamente di geometria standard	41
3.2 Descrizione del sistema di ricircolo	42
3.3 Giranti utilizzate	45
4. PROCEDURA PER L'ELABORAZIONE DEI DATI	46
4.1 Algoritmo di cross- correlation	46
4.2 Elaborazione delle immagini PIV	47
4.3 Acquisizione ed elaborazione dati nella tecnica PLIF	49

4.3.1 Procedura di iniezione della Rhodamina- 6G	49
4.3.2 Elaborazione delle immagini PLIF	50
5. RISULTATI SPERIMENTALI:TECNICA PIV	52
5.1 Studio del campo di moto in un reattore con ricircolo. Prove con turbina Rushton	52
5.1.1 Campo di moto a N=50rpm	52
5.1.2 Campo di moto a N=100rpm	57
5.1.3 Campo di moto a N=150rpm e N=300rpm	62
5.2 Studio del campo di moto in un reattore con ricircolo. Prove con turbina PBT- up pumping	67
5.2.1 Campo di moto a N=50rpm	67
5.2.2 Campo di moto a N=100rpm	72
5.2.3 Campo di moto a N=150rpm e N=300rpm	76
5.3 Studio del campo di moto in un reattore con ricircolo. Prove con turbina PBT- down pumping	82
5.3.1 Campo di moto a N=50rpm	82
5.3.2 Campo di moto a N=100rpm	86
5.3.3 Campo di moto a N=150rpm e N=300rpm	90
5.4 Tecnica PIV. Considerazioni finali	95
6. RISULTATI SPERIMENTALI. TECNICA PLIF	98
6.1 Prove con turbina Rushton	98
6.1.1 Valutazione del t_{mix} a N=50rpm	98
6.1.2 Valutazione del t_{mix} a N=100rpm	99
6.1.3 Valutazione del t_{mix} a N=150rpm	100
6.1.4 Valutazione del t_{mix} a N=300rpm	101
6.1.5 Confronto dei t_{mix} ottenuti per ciascuna velocità di agitazione	101
6.2 Prove con turbina PBT- up pumping	102
6.2.1 Valutazione del t_{mix} a N=50rpm	102
6.2.2 Valutazione del t_{mix} a N=100rpm	103
6.2.3 Valutazione del t_{mix} a N=150rpm	104
6.2.4 Valutazione del t_{mix} a N=300rpm	105
6.2.5 Confronto dei t_{mix} ottenuti per ciascuna velocità di agitazione	105
6.3 Prove con turbina PBT- down pumping	107
6.3.1 Valutazione del t_{mix} a N=50rpm	107
6.3.2 Valutazione del t_{mix} a N=100rpm	108
6.3.3 Valutazione del t_{mix} a N=150rpm	109
6.3.4 Valutazione del t_{mix} a N=300rpm	110
6.3.5 Confronto dei t_{mix} ottenuti per ciascuna velocità di agitazione	110
7. ANALISI COMPARATIVA DEI t_{mix} OTTENUTI CON CIASCUNA GIRANTE	112
7.1Analisi comparativa a N=50rpm	112
7.2 Analisi comparativa a N=100rpm	113
7.3 Analisi comparativa a N=150rpm e N=300rpm	114

7.4 Analisi e confronto delle potenze agenti sul sistema	115
7.5 Tecnica PLIF. Considerazioni finali	116
8. CONCLUSIONE	119
9.BIBLIOGRAFIA	120

ABSTRACT

The study and understanding of the motion of the fluid phases in a mechanically stirred reactor has always been, and still are, an open problem which absorbs the study and the work of many researchers. In recent decades, thanks to the growing opportunities offered by the development of technology, we have made great strides in the understanding of mixing, one of the major unit operations at the base of many industrial processes. A complete understanding of this process and its optimization for industrial applications is a challenging task due to the complex interactions between the many factors at play that include physical, chemical and biological.

The purpose of this thesis is the study of a fluid-mechanically-agitated continuous reactor through the use of optical diagnostic techniques, which allowed to determine the range of motion and the time of perfect homogenization in a reactor of standard geometry in different operating conditions.

INTRODUZIONE

Lo studio e la comprensione del moto delle fasi fluide all'interno di un reattore agitato meccanicamente sono sempre stati, e sono tuttora, un problema aperto che assorbe lo studio e il lavoro di numerosissimi ricercatori. Negli ultimi decenni, grazie alle sempre crescenti opportunità date dallo sviluppo della tecnica, si sono fatti grandi passi nella comprensione del mixing, una delle grandi operazioni unitarie alla base di numerosi processi industriali. Una completa comprensione di questo processo e una sua ottimizzazione per le applicazioni industriali è un compito impegnativo a causa delle complesse interazioni esistenti tra i numerosi fattori in gioco che comprendono fenomeni fisici, chimici e biologici.

Lo scopo del presente lavoro di tesi, svolto presso il DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali), è lo studio fluidodinamico di un reattore monofase continuo agitato meccanicamente tramite l'impiego di tecniche di diagnostica ottica, che hanno consentito di determinare il campo di moto e il tempo di perfetta omogeneizzazione in un reattore di geometria standard in diverse condizioni operative.

1. LA MISCELAZIONE IN REATTORI AGITATI

L'operazione di miscelazione, che nella letteratura internazionale è indicata con il termine *mixing*, è una delle più importanti operazioni unitarie alla base dell'industria chimica e di processo. Il termine "*mixing*" è applicato ai processi utilizzati per diminuire il grado di non omogeneità all'interno del sistema preso in esame: tale obiettivo viene raggiunto movimentando materia da un punto del sistema ad un altro attraverso l'uso di pali rotanti opportunamente sagomate. Il *mixing* tuttavia non ha solo questa finalità: infatti oltre a ridurre il grado di non omogeneità di un sistema (sia esso mono-, bi-, o tri-fase) è in grado di massimizzare sia lo scambio di materia che lo scambio di calore, e ciò è di notevole importanza specie in sistemi con reazione chimica.^(1,2)

In questo capitolo verrà fatta una trattazione di carattere generale cercando di descrivere i componenti principali di un sistema agitato e i parametri caratteristici con i quali esso viene descritto.

Un tipico sistema in cui viene realizzata l'operazione di *mixing* è costituito da un recipiente cilindrico verticale con il fondo bombato (chiamato generalmente reattore o vessel a seconda che vi sia o meno reazione chimica), da un sistema di agitazione, da condotto di entrata e uscita che permettono l'alimentazione e il prelievo di materia e, eventualmente, da apparati che provvedono allo scambio termico.

A causa delle numerose tipologie a cui si devono adattare, le geometrie sviluppate per il *mixing* risultano essere assai numerose: esse riguardano sia la forma del vessel, sia la geometria dell'agitatore che provvede al mescolamento, sia la posizione relativa del sistema d'agitazione all'interno del vessel.

Questi numerosi sistemi devono quindi essere progettati in modo da possedere queste due caratteristiche:

- La presenza di un moto convettivo che impedisca la formazione di zone stagnanti all'interno del sistema;
- La presenza di zone ad un elevato sforzo di taglio ("*shear*") che favoriscano la movimentazione e l'omogeneizzazione del sistema.

Il regime di moto nel reattore dipenderà, oltre che dalle caratteristiche e della velocità dell'agitatore, anche dalle proprietà fisiche del fluido da mescolare. Generalmente, nelle

applicazioni a viscosità medio- bassa e alle usuali velocità dei sistemi d'agitazione, il moto è turbolento (condizione di moto irregolare in cui le varie grandezze sono caratterizzate da variazioni random nel tempo e nello spazio).

In queste condizioni l'inerzia trasmessa dall'agitatore al liquido è sufficiente affinché esso circoli nel reattore e ritorni all'agitatore stesso. I processi diffusivi turbolenti risultano presenti in tutto il reattore, ma sono massimi nelle vicinanze dell'agitatore a causa dei vortici e delle grandi forze di taglio: tutto ciò permette che il mixing in presenza di moto turbolento sia molto più efficace che in un sistema caratterizzato da un moto laminare.

La descrizione del moto turbolento e il calcolo del campo di moto in un sistema agitato risulta estremamente complessa. Nel 1922 Richardson^(2,3), al fine di spiegare lo scenario evolutivo della turbolenza, ipotizzò che l'energia si trasferisse all'interno del fluido a causa di condizioni fluidodinamiche instabili, ovvero ipotizzò che dai vortici più grandi prodotti dall'agitazione si producessero vortici più piccoli con trasferimento di energia cinetica, vortici che a loro volta generano vortici ancora più piccoli fino al momento in cui le loro dimensioni non fossero state tali da permettere alle forze viscosi di dissipare in calore tutta l'energia.

Tale scenario a cascata descrive bene ciò che accade in un flusso turbolento, ma non riesce a fornire indicazioni quantitative sul fenomeno descritto in quanto non consente di determinare le dimensioni per le quali prevalgano gli effetti viscosi (dissipativi e ad azione locale sui singoli vortici) sugli effetti lineari (responsabili del trasferimento di energia cinetica da un vortice più grande ad uno più piccolo).

Una stima quantitativa si può fare ricorrendo alla teoria dell' "equilibrio universale" di Kolmogorov^(2,3), applicabile alla turbolenza omogenea ed isotropa. Questa teoria prende origine da due assunzioni: che per numeri di Reynolds elevati le strutture fluidodinamiche piccole in un flusso turbolento siano statisticamente isotrope (ovvero le forze inerziali sono molto maggiori delle forze viscosi) e che le caratteristiche delle piccole scale di tutti i flussi turbolenti siano indipendenti dal sistema (universali) e determinate solo dalla viscosità cinematica ν e dalla potenza dissipata ε (dissipazione di energia cinetica turbolenta per unità di massa).

Con un procedimento di analisi dimensionale si possono ricavare le grandezze caratteristiche delle scale dissipative (le più piccole)⁽²⁾:

$$\eta = \frac{(\nu \varepsilon)^{0,25}}{u_\eta} \quad u_\eta = (\nu \varepsilon)^{0,25} \quad t_\eta = \frac{\eta}{u_\eta} \quad (1.1)$$

dove η rappresenta la lunghezza caratteristica dei vortici dissipativi di Kolmogorov; u_η indica la velocità caratteristica; t_η indica il tempo caratteristico.

Qualunque sia la geometria, il regime di moto e l'applicazione specifica, per ottenere un buon miscelamento è fondamentale scegliere l'agitatore opportuno. I criteri che guidano la scelta sono l'ottenimento di una buona efficienza di mescolamento e la minimizzazione dei costi nell'ottica di massimizzare l'economicità del processo in esame.

1.1 Tipologie di agitatori

Viste le svariate geometrie esistenti per gli agitatori, una classificazione riconosciuta universalmente in questo ambito raggruppa i vari tipi di sistemi di agitazione in due grandi gruppi:

- Agitatori veloci;
- Agitatori lenti.

Tale classificazione prende come riferimento le dimensioni relative della girante e la sua velocità di rotazione nelle sue normali condizioni d'impiego. Di seguito vengono le caratteristiche di alcuni degli agitatori maggiormente utilizzati.

1.1.1 Agitatori veloci

Sono caratterizzati da un gruppo D/T (diametro dell'agitatore/diametro del reattore) pari a 0,2- 0,5. L'aggettivo "veloci" è dovuto al fatto che, affinché si raggiunga un buon grado di miscelazione in tutto il reattore, è necessario lavorare a velocità di rotazione relativamente elevate. Usualmente, con questi tipi di agitatori, il reattore viene provvisto di setti frangivortice ("baffles") che hanno la funzione di evitare il moto d'insieme del liquido e la deformazione del pelo libero, che ridurrebbe i fenomeni di trasporto turbolento e porterebbe alla formazione di un vortice superficiale. I setti frangivortice sono costituiti da elementi piatti, di norma a forma di parallelepipedo allungato nella

direzione di sviluppo del reattore, ancorati direttamente alle pareti dello stesso. La configurazione tipica prevede quattro setti equispaziati (quindi a 90° fra di loro), con una larghezza pari a $T/10$ o $T/12$.

L'applicazione tipica degli agitatori veloci è quella della miscelazione di liquidi a viscosità medio- bassa. In base alla modalità prevalente con cui viene trasferita l'energia totale fornita dall'agitatore, gli agitatori veloci possono essere ulteriormente divisi in due categorie:

- Agitatori per produrre turbolenza;
- Agitatori che massimizzano la circolazione del liquido.

Queste due proprietà producono effetti diversi nei processi elementari di interesse, che vengono dunque distinti in:

- “*Shear- sensitive processes*”: si tratta di processi che coinvolgono due o più fasi (ad esempio la dispersione di un gas in un liquido o di un liquido in un altro liquido, lo scambio di materia tra fasi), favoriti da elevati gradienti di velocità;
- “*Flow- sensitive processes*”: si tratta di processi di scambio di calore, operazione di miscelazione (“*blending*”) tra liquidi miscibili, sospensioni di solidi (particolarmente sensibili alle velocità medie del fluido).

Inoltre in base al tipo di campo di moto generato esiste una ulteriore suddivisione degli agitatori veloci:

- Agitatori a flusso assiale;
- Agitatori a flusso radiale;
- Agitatori “*hydrofoil*”;
- Agitatori ad alto “*shear*”.

1.1.1.1 Agitatori a flusso assiale

Il flusso generato è essenzialmente assiale, con formazione di correnti parallele all'albero della girante. Talvolta l'effetto pompante è rafforzato inserendo l'agitatore in un tubo di spinta (“*draft tube*”) che impedisce il flusso radiale. Vengono principalmente nei “*flow- sensitive processes*”, in quanto questi tipi di agitatori sono in grado di massimizzare la portata di fluido movimentata. Nella Fig. 1.1 vengono illustrati alcuni esempi di agitatori

a flusso assiale. Il più classico agitatore assiale è certamente l'elica marina, che può essere costruita con varie inclinazione delle pale (“*pitch*”) a secondo della capacità di pompaggio e della spinta; soffre l'inconveniente di un peso vistosamente crescente all'aumentare delle sue dimensioni al punto di rendere antieconomica la scelta.



Fig. 1.1: Agitatori veloci a flusso assiale (Paul E.L., et al., 2004)

Una turbina a pale inclinate (PBT, acronimo di *Pitched- Blade- Turbine*) è costituita da un mozzo a cui vengono saldate un numero di pale che possono avere un inclinazione compresa tra i 30° e i 60° sul piano orizzontale (la configurazione più diffusa è quella con le pale a 45°). Il flusso prodotto da questo tipo di agitatore non è completamente assiale, ma possiede anche un modesto contributo radiale: per questo è definito come agitatore di tipo misto. Un particolare tipo di agitatore è il Pfaudler a pale curve, progettato specificatamente per reattori smaltati, necessari quando si ha a che fare con prodotti altamente corrosivi.

1.1.1.2 Agitatori a flusso radiale

Il flusso generato da questi tipi di agitatori (Fig. 1.2), a parte la componente tangenziale, è essenzialmente radiale. Essi vengono utilizzati in tutti quei processi dove è necessario rendere massima la superficie interfacciale di scambio (Shear- sensitive processes) in quanto producono un elevata turbolenza, in particolare in prossimità dell'agitatore. Le turbine radiali possono essere costituite da un disco e da pale piatte come le turbine Rushton, possono essere aperte come le turbine a lama piatta (*Flat- Blade- Turbine*) e possono avere pale dritte o ricurve a seconda dell'utilizzo.

Gli agitatori radiali senza disco non producono solamente un flusso radiale, ma, a causa della differenza di pressione tra le facce delle pale, producono anche un flusso assiale; invece quelli provvisti di un disco producono un flusso radiale più definito, con un maggiore consumo di potenza. Un classico esempio di agitatore con disco è la turbina Rushton che nella versione standard ha 6 pale piatte in lunghezza $D/4$, larghezza $D/5$ e

con un diametro del disco di $3/4D$. La turbina di tipo “*backswept*” ha 6 pale ricurve all’indietro ed è caratterizzata, rispetto alla turbina Rushton, da un consumo di potenza inferiore del 20%. La forma delle pale previene l’accumulo di materiale sulle stesse con un risultato di una maggiore resistenza all’erosione.

Recenti sviluppi hanno portato alla costruzione di agitatori a pale concave (SCABA SRGT, Chemineer CD6 e BT6), utilizzati soprattutto in applicazioni gas- liquido poiché garantiscono una migliore dispersione del gas, e quindi possono trattare, senza causare fenomeni di ingolfamento, una maggiore portata di gas rispetto alle tradizionali turbine Rushton. Le pale , viste in sezione, possono essere di forma sia semicircolare che di forma parabolica, simmetriche o asimmetriche.

Infine gli agitatori a molla o a spirale (usati raramente) sono stati invece sviluppati per quei processi solido- liquido: se un agitatore di questo tipo si trova sommerso dal solido, può essere estratto senza incorrere nel rischio di rotture meccaniche.

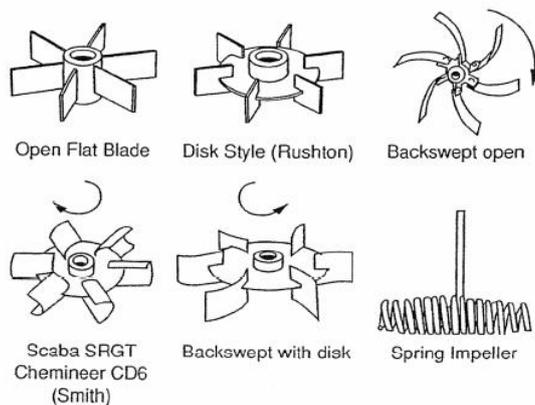


Fig. 1.2: Illustrazione dei più comuni agitatori a flusso radiale. (Paul E. L., et al., 2004)

1.1.1.3 Agitatori hydrofoil

Sono agitatori assiali a profilo ottimizzato e vengono applicati in tutti quei campi in cui serve un flusso assiale a basso “*shear*” (Fig. 1.3). Sono formati generalmente da 3 o 4 pale affusolate con un profilo aerodinamico di inclinazione variabile lungo l’asse delle pale. Questo permette una maggiore uniformità della velocità del fluido nella sezione di scarico dell’agitatore, un minor consumo di energia e una capacità di pompaggio per unità di potenza maggiore rispetto a una PBT. Agitatori quali Lingham A310, Chemineer HE3 e EMI rotofoil sono caratterizzati da un basso rapporto di solidità (definito come il rapporto tra l’area prodotta dalle proiezioni delle pale e l’area della sezione orizzontale

dell'agitatore). Questi tipi agitatori sono molto efficienti nella sospensione dei solidi e nel mescolamento dei liquidi.

Ligthin A315 e Maxflo, invece, sono agitatori hydrofoil ad alto rapporto di solidità: questa caratteristica li rende efficaci per la dispersione di gas anche in sistemi viscosi, in aggiunta ai processi precedenti. L'agitatore bilama INTERPROP è progettato con un alto angolo di attacco della pala, con un'addizionale doppia pala all'estremità. Questa configurazione garantisce una maggiore spinta assiale rispetto agli altri agitatori di questa categoria: è per questo che la sua maggiore applicazione risulta nei processi di dispersione e sospensione.

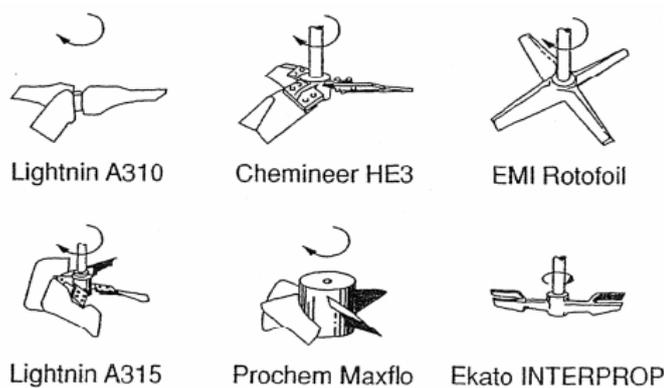


Fig. 1.3: Illustrazione dei più comuni agitatori hydrofoil. (Paul E. L., et al., 2004)

1.1.1.4 Agitatori ad alto sforzo di taglio

In questa categoria rientrano quegli agitatori che lavorano ad elevata velocità di rotazione e che sono utilizzati per l'aggiunta di una seconda fase in processi di frantumazione, di dispersione di pigmenti e di creazioni di emulsioni. Questi agitatori (Fig. 1.4) hanno una bassa capacità di pompaggio e quindi vengono spesso accoppiati ad agitatori assiali per garantire, oltre che ad un alto sforzo di taglio, un buon grado di miscelamento.

Passando dalla turbina a barre a quella a dente di sega, lo sforzo di taglio che la turbina riesce a produrre aumenta fino ad avere un'altissima turbolenza nelle vicinanze dell'agitatore.

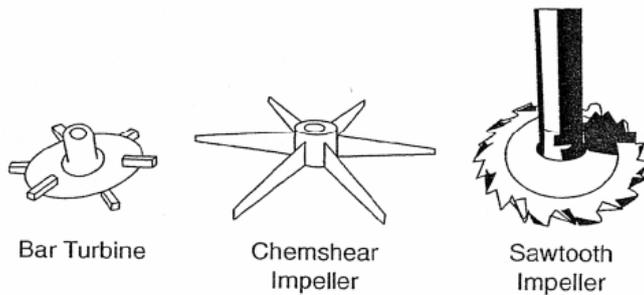


Fig. 1.4: Illustrazione dei più comuni agitatori ad alto “shear”. (Paul E. L., et al., 2004)

1.1.2 Agitatori lenti

Sono agitatori caratterizzati da un rapporto D/T prossimo all’unità e vengono impiegati in vessel privi di frangivortice. La principale azione esplicata è quella del rimescolamento lento e del rinnovo del liquido soprattutto in prossimità delle pareti del recipiente in cui è posizionato l’agitatore. Vengono tipicamente impiegati con fluidi aventi un’alta viscosità.

Come per gli agitatori veloci, anche quelli lenti sono ulteriormente classificabili in:

- Agitatori tangenziali puri;
- Agitatori ad elica.

1.1.2.1 Agitatori tangenziali puri

Hanno una caratteristica struttura verticale e gli eventuali, modesti, moti verticali sono realizzati solo da circolazioni secondarie. I tipici agitatori di questa categoria sono quelli ad ancora e a gabbia (Fig. 1.5) Gli agitatori ad ancora vengono utilizzati per viscosità comprese tra 5 e 50 Pa·s in quanto per viscosità inferiori non vi è sufficiente attrito per raschiare le pareti e garantire il rinnovo del fluido in tali posizioni. Sopra i 50 Pa·s, specialmente con fluidi non Newtoniani, la capacità di pompaggio diminuisce e alla parete l’agitatore “slitta” nel liquido. Quando si deve garantire uno scambio di calore buono alla parete associato ad un buon mescolamento, le pale dell’ancora vengono provviste di un coltello- raschiatore (“wiper”) che provvede a ripulire la parete.

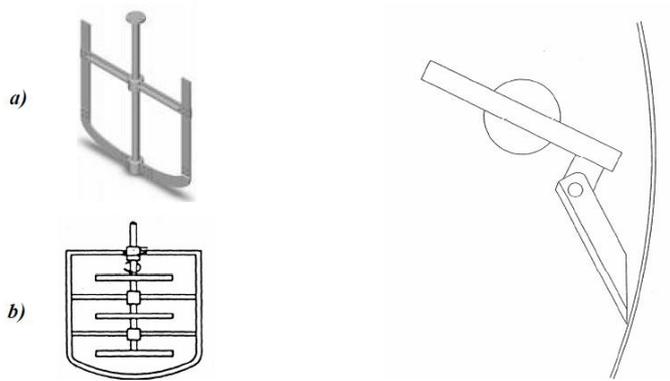


Fig. 1.5: Illustrazione dei più comuni agitatori lenti tangenziali puri; a) ancora; b) gabbia; c) wiper. (Paul E. L., et al., 2004)

1.1.2.2 Agitatori ad elica

Il rimescolamento del fluido è garantito da consistenti moti verticali e tangenziali. Fanno parte di questa categoria gli agitatori a nastro elicoidale semplice (“*helical ribbon*”), a doppia elica, a vite senza fine (l’unico in cui $D/T < 1$), ad elica e vite senza fine (Fig.1.6).

Gli agitatori ad elica forniscono di solito un flusso dall’alto verso il basso; in alcuni casi, all’elica esterna viene aggiunta un’elica interna che pompa in direzione opposta alla prima. Il passo tra le eliche è comunemente 0.5 in quanto valori superiori riducono il mescolamento mentre valori inferiori aumentano l’attrito e il consumo energetico.

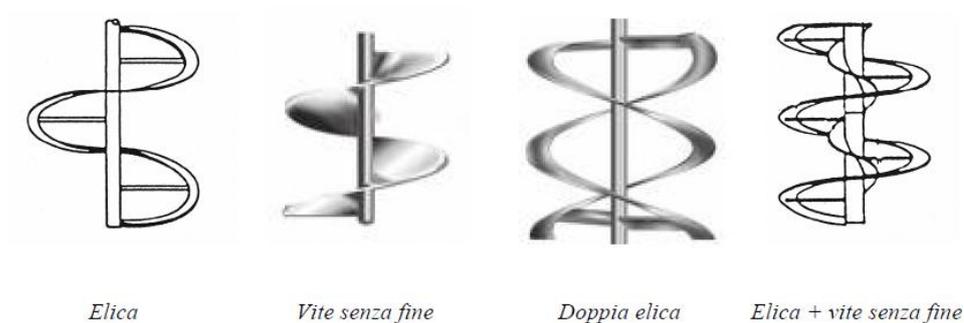


Fig. 1.6: Illustrazione dei più comuni agitatori lenti ad elica. (Paul E. L., et al., 2004)

Le “*helical ribbon*” possono anche essere realizzate con $D/T = 0,7$ con l’aggiunta di un “*draft tube*” per promuovere la ricircolazione del liquido nel reattore.

1.2 Parametri caratteristici degli agitatori

Si possono definire diversi parametri per caratterizzare un sistema agitato.

Tali parametri dipendono dal numero di Reynolds e dal numero di Froude.

- Numero di Reynolds rotazionale: $Re = \text{---}$
- Numero di Froude rotazionale: $Fr = \text{---}$

Si ottiene in tal modo una trattazione generale estendibile a tutti i sistemi geometricamente simili.

I parametri principali usati per la caratterizzazione di un sistema agitato sono i seguenti:

- Potenza dissipata;
- Velocità del bordo della girante, V_{tip} ;
- Capacità di pompaggio, Q ;
- Tempo di miscelazione (“*Mixing time*”), t_{mix} .

Tali parametri definiscono la fluidodinamica globale del sistema.

Inoltre, nello specifico del reattore studiato nel presente lavoro di tesi, un altro parametro fondamentale per descrivere la fluidodinamica del sistema è la potenza fornita al sistema dalla pompa.

1.2.1 Potenza dissipata

Da un punto di vista pratico, il consumo di potenza è uno dei parametri più importanti per la progettazione di un recipiente agitato in quanto influisce direttamente sui costi d’esercizio. La potenza dissipata è un parametro che dipende dalle proprietà chimico-fisiche del sistema (viscosità μ e densità ρ), dalle variabili operative (numero di giri N), dai vari parametri geometrici del sistema (il diametro della girante D e del recipiente T , l’altezza del recipiente H , etc...), nonché dall’accelerazione di gravità nei casi in cui questa influenza il profilo di equilibrio del pelo libero.

Applicando l’analisi dimensionale e considerando di sistemi geometricamente simili, la relazione funzionale tra le varie grandezze può essere riscritta in termini di numeri adimensionali.⁽²⁾

$$N_p = f(Re, Fr) \tag{1.2}$$

dove N_p è il numero di potenza, definito come

$$N_p = \dots \quad (1.3)$$

La forma più semplice per la relazione 1.2 risulta essere:

$$N_p = \dots \quad (1.4)$$

In cui i parametri b, c , caratteristici del tipo di agitatore e del tipo di moto impresso al fluido, devono essere determinati tramite regressione di dati sperimentali.

Si precisa che nella relazione 1.4 il numero di Froude risulta essere di qualche significato solo quando si ha la presenza di grossi vortici superficiali e, normalmente, Fr viene trascurato per $Re < 300$.

In presenza di frangivortice questa dipendenza può essere trascurata anche per $Re > 300$. Queste correlazioni vengono spesso fornite in forma grafica, in specifici grafici che rappresentano le cosiddette “curve di potenza”.

In figura 1.7, è mostrato l’andamento del numero di potenza in funzione del numero di Reynolds per alcuni tipi di agitatori.

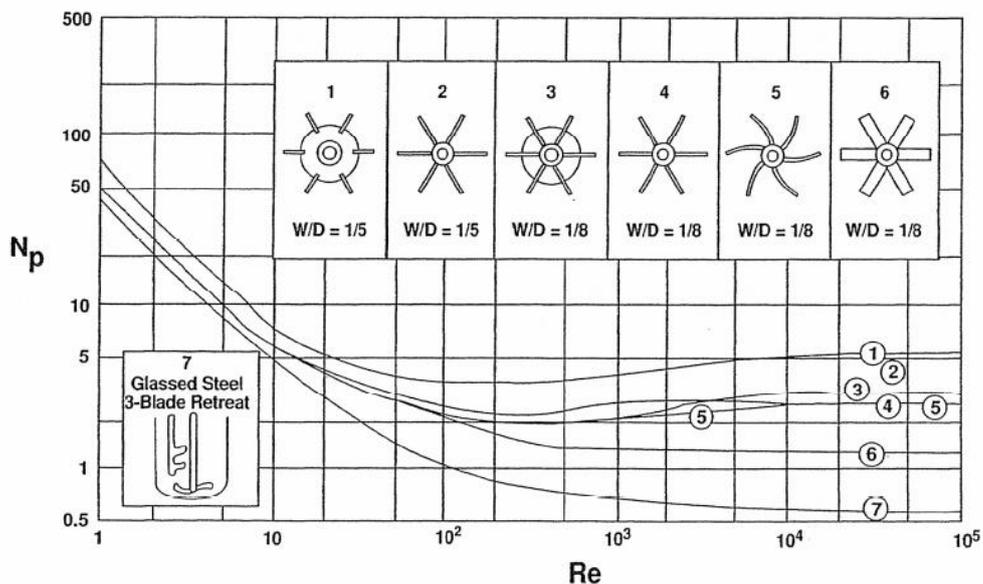


Fig.1.7: Andamento di N_p in funzione di Re . (Paul E. L., et al., 2004)

L'esame delle curve proposte in Fig. 1.7 evidenzia l'esistenza di zone distinte di comportamento:

- Per $Re < 10$ si ha un valore di b pari a -1 . Ne consegue che la potenza dissipata è direttamente proporzionale alla viscosità del mezzo, quindi le forze viscoso dominano e il regime viene definito laminare;
- Per $Re < 3000$ si ha un valore di b pari a 0 . La potenza risulta essere dunque proporzionale alla densità e quindi il regime di moto è detto turbolento. La condizione di $Re > 10^4$ implica un regime di turbolenza completa del sistema;
- La zone in cui $1 < Re < 3000$ è detta di transizione ed in essa il valore di b è compreso tra -1 e 0 . Parametri importanti per il consumo energetico di un agitatore sono anche le caratteristiche geometriche ⁽¹⁾, in special modo l'eventuale presenza di setti frangivortice.

Le Fig. 1.8 e 1.9 mostrano come N_p risulti dipendere anche dalla presenza e dall'ingombro di setti frangivortice. Passando da un reattore non settato ad uno dotato di setti frangivortice di dimensione crescente, nella Fig. 1.8, si nota come il numero di potenza, e quindi la potenza dissipata, aumenti corrispondentemente mantenendo praticamente inalterato l'andamento tipico delle curve di potenza. Nella Fig. 1.9 invece si osserva come il rapporto tra N_p reale e quello relativo alla configurazione standard (4 setti frangivortice larghi $0.1T$) aumenti con $N_b B/T$ fino ad un massimo corrispondente alla con figurazione standard, per poi diminuire fino ad avere un valore costante che dipende dal rapporto D/T .

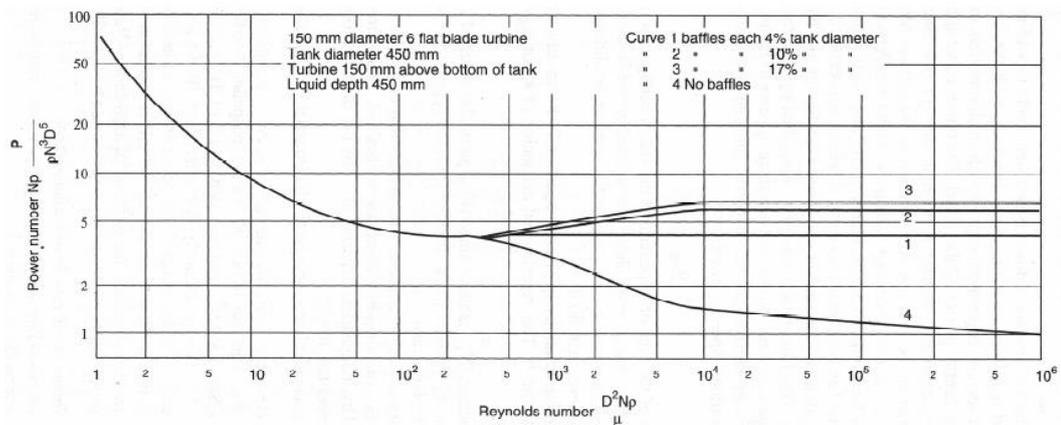


Fig. 1.8: Andamento di N_p di funzione di Re al variare della lunghezza dei setti. (Paul E. L., et al., 2004)

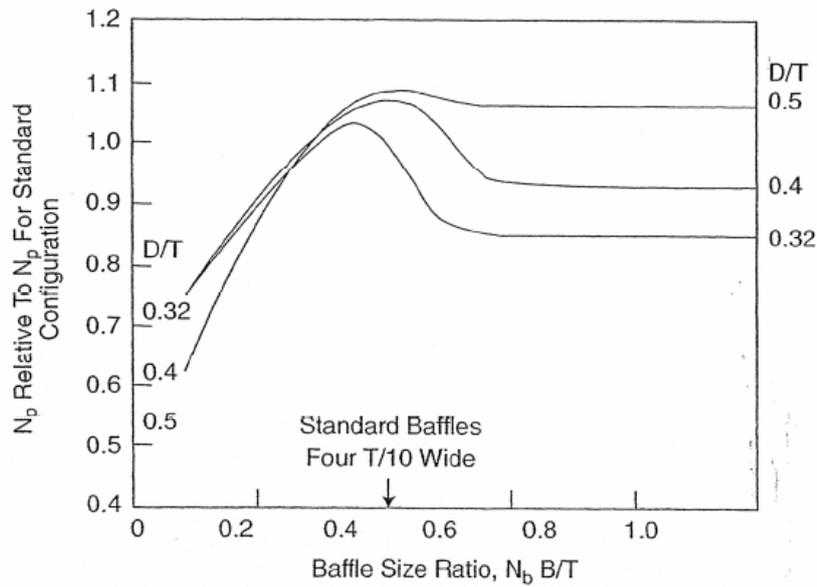


Fig. 1.9: Andamento di N_p di in funzione del numero di “baffles” N_B e la loro larghezza. (Paul E. L., et al., 2004)

Anche la distanza dell’agitatore dal fondo del reattore (“clearance”), indicata con C , influenza il numero di potenza, come mostrato in tabella 1.1. Si noti come ciascun tipo di agitatore abbia un suo andamento caratteristico. Si osserva che con giranti radiali, al di sotto di un valore critico C/T si ha un crollo di N_p , corrispondente alla soppressione dell’anello di ricircolo inferiore.

C	<i>Rushton</i>	<i>PBT - up</i>	<i>PBT - down</i>
T/3	5.18	1.29	1.29
T/4	4.70	1.24	1.35
T/6	4.40	1.81	1.61

Tabella 1.1: Andamento di N_p al variare della “clearance” del sistema. (Paul E. L., et al., 2004)

Nella Tabella 1.2 viene riportata una sintesi di numeri di potenza caratteristici di alcuni agitatori industriali.

<i>Agitatore</i>	<i>Tipo</i>	<i>D/T</i>	<i>N° pale</i>	<i>N_P</i>
Rushton	Radiale	0.33	6	5.2
Rushton	Radiale	0.5	6	5.0
Rushton	Radiale	0.33	12	7.5
Rushton	Radiale	0.33	18	8.7
6SRGT (Scaba)	Radiale	0.33	6	1.45
PBT-45°	Misto	0.33	4	1.3
PBT-45°	Misto	0.33	6	1.7
PBT-45°	Misto	0.33	8	2.8
Elica Marina - p/D=1	Assiale	0.33	3	0.3
Elica Marina - p/D=2	Assiale	0.33	3	1.0
A310 (Lightnin)	Assiale	0.4	3	0.3
HE3 (Chemineer)	Assiale	0.33	3	0.3
A315 (Lightnin)	Assiale	0.4	4	0.8
BT6 (Chemineer)	Radiale	0.3	6	2.3
Maxflow (Prochem)	Assiale	0.4	6	0.82

Tabella 1.2: Numero di potenza di agitatori industriali operanti in regime turbolento in reattori di geometria standard. (Paul E. L., et al., 2004)

1.2.2 Potenza fornita dalla pompa

Il sistema analizzato nel presente nel presente lavoro di tesi viene alimentato da una corrente di ricircolo movimentata da una pompa peristaltica.

Questa mette in ricircolo una corrente avente una potenza così esprimibile:

$$W = Q H \quad (1.5)$$

dove Q esprime la portata della pompa, e H la sua prevalenza.

La portata Q della pompa è esprimibile come nella relazione 1.6.

$$Q = S \cdot v \quad (1.6)$$

dove S è la sezione del tubo e v la velocità del fluido nel tubo.

La prevalenza H della pompa è esprimibile nel modo seguente:

$$H = \frac{1}{2} k v^2 \quad (1.7)$$

dove k rappresenta le unità cinetiche recuperate (nel caso specifico $k = 1$ in quanto non recuperiamo l'energia fornita dalla pompa), ρ indica la densità del fluido e v rappresenta la velocità del fluido nel tubo.

1.2.3 Velocità del bordo della girante

La velocità tangenziale del bordo della girante (V_{tip}) è la velocità lineare massima che il fluido può raggiungere; fornisce quindi ottime indicazioni sui gradienti di velocità massima a cui è sottoposto il materiale agitato.⁽²⁾

$$V_{tip} = N \pi D \quad (1.8)$$

1.2.4 Capacità di pompaggio

Viene definita come il volume di fluido “pompato” dalla girante per unità di tempo attraverso un'opportuna sezione di riferimento prossima all'agitatore. Per le giranti assiali tale superficie coincide con la sezione orizzontale del cilindro ideale che circonda la girante stessa; per le giranti radiali invece si considera la superficie cilindrica descritta dalla rotazione completa del bordo esterno della pala.

Tale parametro è proporzionale alla velocità tangenziale del bordo della girante e viene spesso adimensionalizzato con parametri caratteristici del sistema agitato: ne risulta un numero adimensionale che prende il nome di Numero di pompaggio (“Flow Number”) e viene indicato con N_Q :

$$N_Q = \frac{Q}{N D^3} \quad (1.9)$$

Anche l'andamento di questo parametro è funzione dei numeri di Reynolds e Froude con le medesime modalità di N_p ; in assenza di vortice superficiale (ovvero quando il reattore è dotato di setti frangivortice) il numero di pompaggio dipende solo da Reynolds. Inoltre N_Q dipende dalla geometria dell'agitatore e dal livello di liquido nel reattore.

Come emerge dalla Fig. 1.10, il numero di pompaggio cresce proporzionalmente a Reynolds, fino a raggiungere un “plateau” quando Reynolds assume valori superiori a 10^4 .

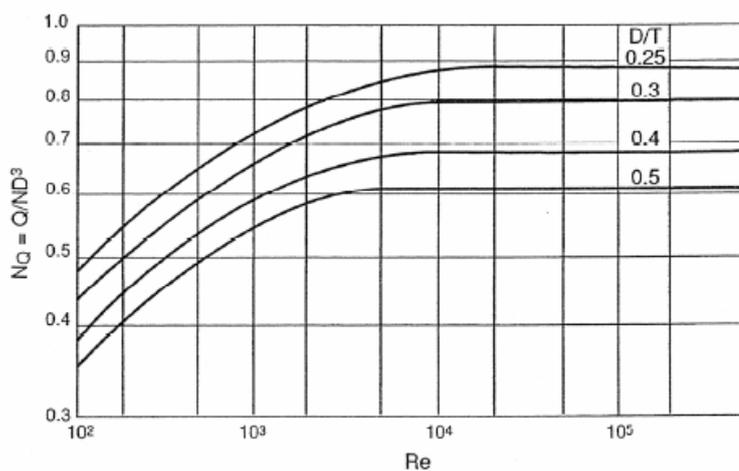


Fig. 1.10: Numero di pompaggio in funzione di Re (i valori si riferiscono ad una PBT). (Paul E. L., et al., 2004)

Si nota anche che:

- Gli agitatori più piccoli hanno numeri di pompaggio maggiori;
- Tali agitatori non possono essere utilizzati per $Re < 1000$ se si desidera un'alta efficienza del pompaggio.

Nella Tabella 1.3 si riportano i valori di N_Q di alcuni agitatori di uso comune. Dalla tabella si evidenzia come questo parametro sia meno variabile di N_p : il valore di N_Q oscilla infatti in un intervallo compreso in un intervallo compreso tra 0,4 e 0,8 con la conseguenza che la capacità di pompaggio dei diversi agitatori, fissati il diametro della girante e la velocità di agitazione, risultano essere comparabili.

<i>Agitatore</i>	<i>Tipo</i>	<i>D/T</i>	<i>N° pale</i>	<i>N_Q</i>
Rushton	Radiale	0.33	6	0.75
Rushton	Radiale	0.5	6	0.6
PBT-45°	Misto	0.33	4	0.79
PBT-45°	Misto	0.33	6	0.73
PBT-45°	Misto	0.33	8	0.87
Elica Marina - p/D=1	Assiale	0.33	3	0.45
A310 (Lightnin)	Assiale	0.4	3	0.56
HE3 (Chemineer)	Assiale	0.33	3	0.41
A315 (Lightnin)	Assiale	0.4	4	0.73
Maxflow (Prochem)	Assiale	0.4	6	0.82

Tabella 1.3: Numero di pompaggio di agitatori industriali operanti in regime turbolento in reattori di geometria standard. (Paul E. L., et al., 2004)

1.2.5 Tempo di miscelazione

Viene definito come tempo necessario perché un tracciante venga adeguatamente disperso nell'intero apparato operante in discontinuo⁽²⁾. Il tempo di miscelazione dipende da numerosi fattori:

- Capacità di pompaggio
- Criterio di omogeneità assunto (di solito: 90%, 95% o 99% dell'omogeneità completa).
- Punti scelti per l'iniezione e la misura del tracciante.
- Tipo di tracciante e tecnica di determinazione.
- Dimensione della zona o dei campioni esaminati per definire il grado di omogeneità.

Nonostante queste ambiguità, tale parametro è largamente utilizzato nella pratica.

Per sistemi geometricamente simili, il tempo di miscelazione (t_{mix}) dipende dalle seguenti variabili operative⁽¹⁾.

$$t_{mix} = f(\rho, \mu, N, D, g) \quad (1.10)$$

Applicando l'usuale tecnica di adimensionalizzazione, si rileva che il tempo di miscelazione adimensionale (θ_m) dipende dai seguenti parametri:

$$Nt_m = \theta_m = f(Re, Fr) \quad (1.11)$$

Come osservato in precedenza, la dipendenza da Fr è solitamente trascurabile. Analizzando i dati sperimentali disponibili in letteratura, si osserva che θ_m presenta un andamento simile a quello in Fig. 1.11: in questa immagine si può notare che, per alti valori del numero di Reynolds, il valore di θ_m risulta essere indipendente da Re .

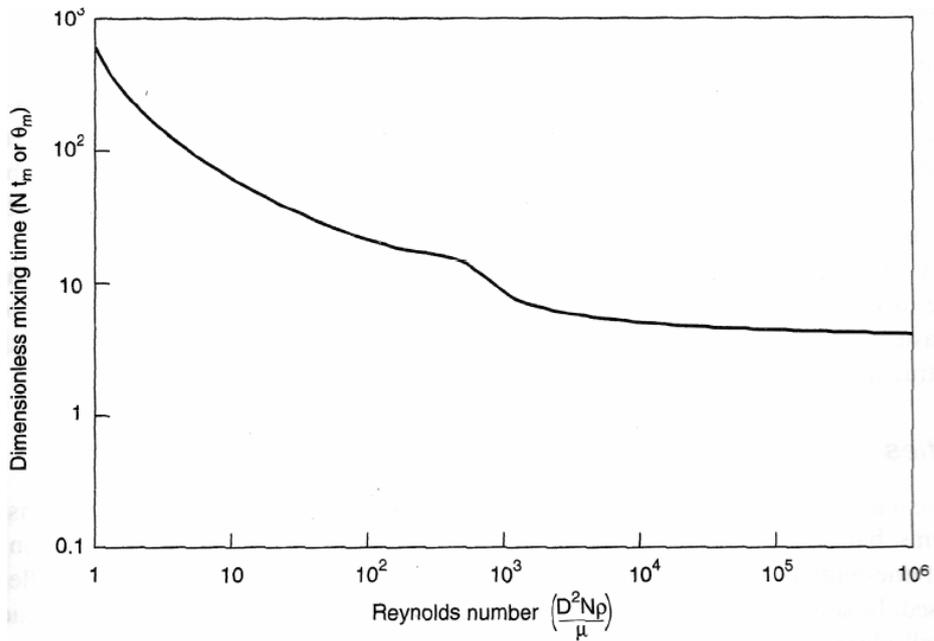


Fig. 1.11: Andamento tipico del tempo di miscelazione adimensionale θ_m . (Paul E. L., et al., 2004)

Questo tipo di andamento può essere descritto analiticamente nella formula:

$$Nt_m = CRe^a \quad (1.12)$$

I valori di C e a sono forniti, per alcuni tipi di agitatori nella tabella 1.4.

Tipo agitatore	Reynolds range	C	a
Turbina	5 – 1000	17500	-0.75
	1000 - 100000	60	0
Turbina (baffled)	10000 – 100000	36	0
Helical ribbon	1 – 10000	430	-0.25

Tabella 1.4: Parametri dell' equazione 1.12 per alcuni agitatori industriali. (Paul E. L., et al., 2004)

E' stato dimostrato⁽²⁾ che nel caso di $H/T = 1$ e di agitatori singoli, si ottiene:

$$Nt_m = \frac{A}{Re^a} \quad (1.13)$$

Risultati sperimentali mostrano che $A=5.2$ per tutti i tipi di agitatori. La 1.13 può essere semplicemente trasformata in:

$$t_{mix} = 5.9T^{2/3} \frac{1}{Re^a} \quad (1.14)$$

Da tale relazione emerge che il tempo di miscelazione:

- Aumenta all'aumentare della scala T;
- Diminuisce all'aumentare del rapporto D/T.

1.3 Fluidodinamica dei sistemi agitati

La conoscenza dettagliata della fluidodinamica di un sistema agitato è molto importante per interpretare il funzionamento dei reattori agitati reali e per effettuare il passaggio di scala nel progetto degli apparati industriali. Permette inoltre di individuare l'eventuale presenza di zone stagnanti che non contribuiscono attivamente alla miscelazione. Tali analisi vengono condotte sia per via teorica che per via sperimentale.

I principi fisici alla base della meccanica dei fluidi sono le leggi della conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto che danno origine alle equazioni di continuità e di Bernoulli. Per il caso di moto turbolento la soluzione analitica delle equazioni del moto risulta impossibile mentre, con opportune ipotesi, è possibile ottenere una soluzione numerica attraverso l'utilizzo di opportuni codici di calcolo che si basano sui metodi della cosiddetta fluidodinamica computazionale (“*Computational Fluid Dynamics*”, CFD).

Accanto ai metodi numerici, la fluidodinamica locale in reattori agitati è analizzabile tramite tecniche strumentali sviluppate relativamente di recente, con le quali si riescono a determinare le componenti della velocità nell'area sottoposta ad analisi.

Questi dati sperimentali vengono elaborati per ottenere:

- Il campo di moto medio complessivo del sistema;
- La caratterizzazione delle proprietà dell'agitatore;
- La distribuzione spaziale delle velocità fluttuanti e dell'intensità della turbolenza;
- Dati accurati da utilizzare per verificare i modelli elaborati dalla CFD.

1.3.1 Campi di moto in sistemi monofasici a bassa viscosità

Il risultato del processo di mixing viene altamente influenzato dal campo di velocità (tipo ed intensità) che l'agitatore instaura all'interno del reattore agitato.

Come già indicato, vi sono due principali tipologie di moto che possono essere generate dall'agitatore: assiale e/o radiale a seconda della tipologia di agitatore utilizzato. L'andamento qualitativo delle velocità del fluido per diversi agitatori è mostrato in Fig. 1.12

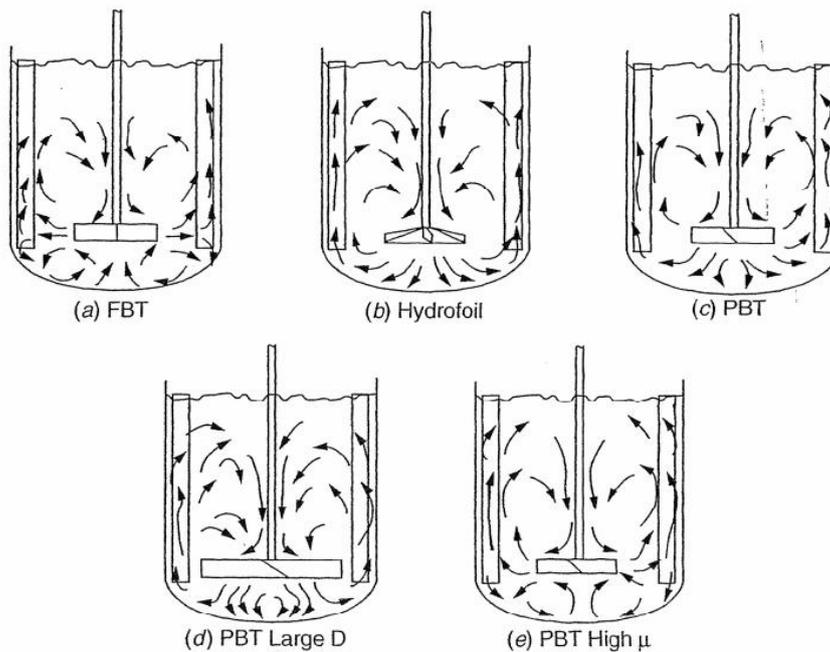


Fig.1.12: Campi di moto di agitatori di diverso tipo, diametro e viscosità variabile. (Paul E. L., et al., 2004)

Mentre gli agitatori radiali indirizzano il fluido verso le pareti del reattore (Fig.1.12a), gli agitatori assiali producono un campo di moto diretto verso il fondo del reattore, come quello mostrato nelle figure 1.12b 1.12c.

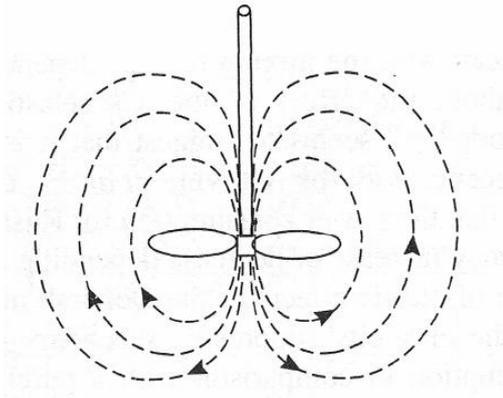


Fig. 1.13: Linee di flusso per una girante assiale “down- pumping”. (Paul E. L., et al., 2004)

La PBT è considerata una girante adatta per qualsiasi applicazione, seppur non sempre ottimale, in quanto unisce una buona capacità di pompaggio ad un buon sforzo di taglio indotto. Le giranti hydrofoil invece hanno una capacità di pompaggio analoga alla PBT, ma a differenza di quest'ultime, inducono un minor sforzo di taglio e una minore turbolenza nel fluido. Inoltre, il flusso uscente indotto dalle Hydrofoil risulta essere molto più allineato, simile a quello prodotto da una girante assiale convenzionale posta in un tubo di spinta (“*draft tube*”) che permette il confinamento del flusso. Le giranti schematizzate in figura 1.12b e 1.12c sono caratterizzate da una spinta del fluido verso il basso; considerazioni analoghe valgono naturalmente anche per giranti assiali con flusso diretto verso l'alto. Infatti spesso è sufficiente invertire il senso di rotazione di un agitatore a flusso assiale rivolto verso il basso (down- pumping) per ottenere un flusso assiale rivolto verso l'alto (up- pumping); per gli Hydrofoil, invece, è necessario capovolgere anche l'agitatore, in quanto si tratta di sistemi non simmetrici.

Se la girante assiale è montata centralmente in un reattore privo di setti frangivortice, si forma un vortice superficiale che riduce notevolmente l'azione di miscelamento della girante a causa della rotazione rigida della massa di fluido indotta.

Le soluzioni da adottare per minimizzare la formazione di tali vortici e migliorare dunque l'attività di mixing sono:

- Montaggio di setti frangivortice (“*baffles*”), con conseguente aumento del consumo di energia;

- Montaggio dell'agitatore in posizione eccentrica e/o non assiale (come mostrato in Fig. 1.14). Il campo di moto risultante impedisce la formazione del vortice superficiale.

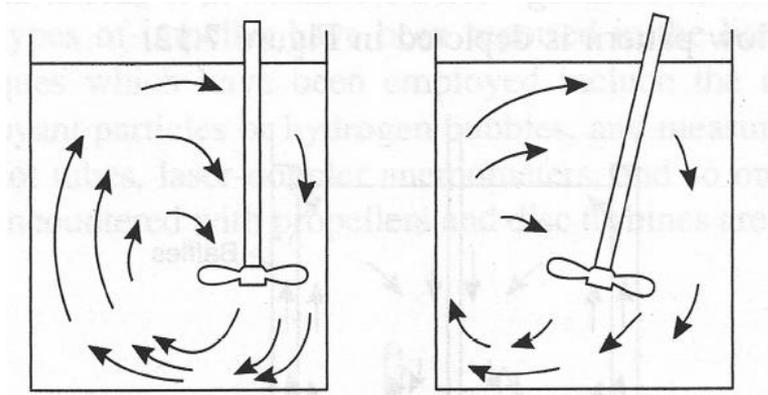


Fig. 1.14: Campo di moto di un agitatore assiale montato in posizione eccentrica. (Paul E. L., et al., 2004)

Le turbine a pale dritte (FBT, “*Flat- Blade Turbine*”) producono invece un campo di moto radiale come quello mostrato nella figura 1.12° con la presenza di due anelli di ricircolo, uno sopra e uno sotto la girante. Il miscelamento che avviene tra i due anelli di circolazione è decisamente poco rilevante rispetto a quello presente all'interno di ciascuno dei due anelli di ricircolo. Come per la PBT, anche con la FBT l'assenza di setti frangivortice provoca la rotazione rigida dell'intero sistema, con diminuzione considerevole dell'efficienza del mescolamento. L'aggiunta di setti frangivortice previene la formazione del vortice superficiale e migliora l'efficacia del mescolamento (Fig. 1.15).

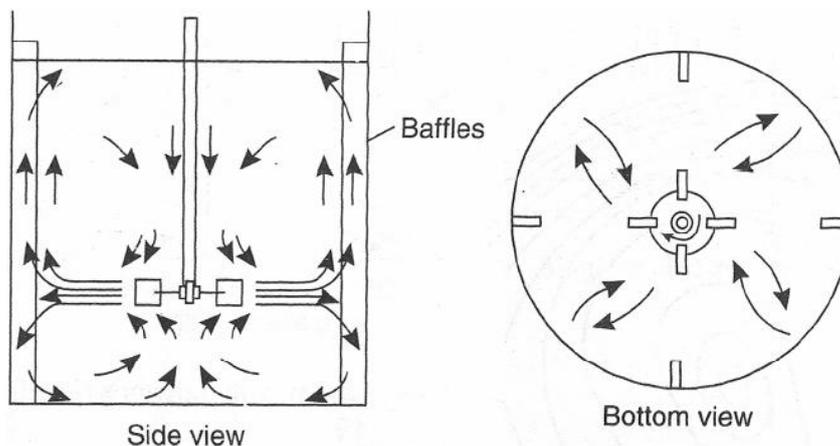


Fig. 1.15: Campo di moto di un agitatore radiale montato in un reattore dotato di setti frangivortice. (Paul E. L., et al., 2004)

Le differenze evidenziate per questi due tipi di campi di moto possono causare variazioni nella distribuzione spaziale degli sforzi tangenziali e nell'energia dissipata nel processo di miscelazione. Naturalmente la scelta del tipo di agitatore dipende dall'applicazione specifica: se gli agitatori sono assiali, questi sono più adatti per il mescolamento del liquido; se invece sono radiali, invece trovano un maggior impiego in sistemi gas- liquido o liquido- liquido in quanto è più elevato lo sforzo di taglio (“*shear*”) trasmesso al sistema. Il campo di moto risulta essere influenzato da molti parametri, i più importanti dei quali sono il diametro e la posizione della girante, la viscosità del liquido e l'eventuale presenza di un secondo agitatore. Si deve osservare che il campo di moto di una PBT varia, diventando prettamente radiale, se si aumenta il diametro dell'agitatore (Fig. 1.12 d) o se si aumenta la viscosità del sistema agitato (1.12 e).

Il campo di moto degli agitatori ad alto sforzo di taglio (“*high- shear*”) risulta essere molto simile a quello degli agitatori radiale, ma con minore capacità di pompaggio e , per l'appunto, con una capacità di trasferire uno sforzo di taglio molto maggiore. Anche gli agitatori a pale curve e a molla producono un flusso completamente radiale.

Per quanto riguarda invece gli Hydrofoil lenti, si osserva il particolare che gli INTERMIG presentano un campo di moto particolare dovuto al doppio profilo di cui sono provviste le due porzioni delle pale. In Fig. 1.16 si nota come i profili interno- pale diano un flusso opposto ai profili esterno- pala in modo che si forma un anello di circolazione allineato e coerente.

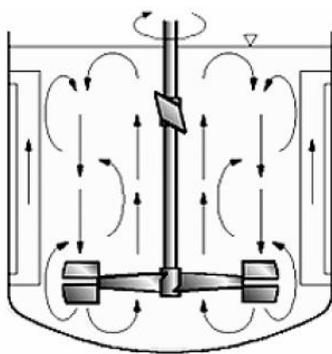


Fig. 1.16: Campo di moto di un agitatore Ekato- INTERMIG. (Paul E. L., et al., 2004)

1.3.2 Fluidodinamica della turbina Rushton

In questo paragrafo verrà discussa nel dettaglio la fluidodinamica della turbina Rushton, andando ad analizzare le linee di flusso che si generano in corrispondenza delle pale

dell'agitatore stesso. Tale analisi risulta di notevole importanza in quanto questo tipo di agitatori sono utilizzati per il miscelamento gas- liquido e, quindi, una conoscenza del campo di moto in regime monobasico è di notevole aiuto per la comprensione del comportamento della turbina a contatto con una miscela bifasica gas- liquido.

In presenza della sola fase liquida, il campo di velocità prodotto da una sola turbina Rushton in regime turbolento è quello illustrato in figura 1.17

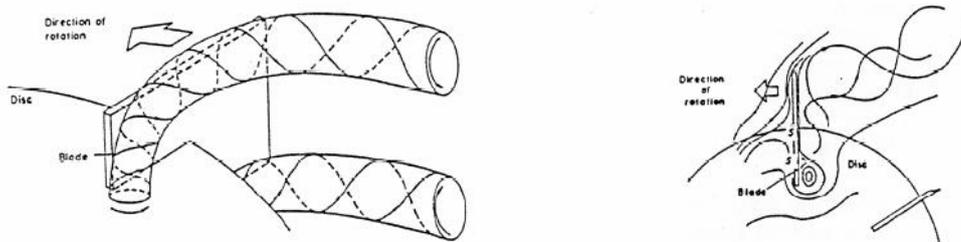


Fig. 1.17: Campo di moto prodotto da una girante Rushton. (Paul E. L., et al., 2004)

Si nota la formazione di una coppia di vortici contro-rotanti, uno sopra e l'altro sotto il disco della girante, sul retro di ogni pala, quale risultato del moto relativo tra il liquido e la pala stessa.

Seguendo l'asse del vortice se ne può descrivere il suo sviluppo spaziale: il vortice nasce sul disco in prossimità del bordo interno della pala, si allontana dal disco al riparo dal bordo della pala, viene deviato orizzontalmente dal fluido proveniente dalla parte anteriore della pala, ne segue il profilo in senso radiale e, infine, assume una graduale componente tangenziale staccandosi dalla pala (a questo punto il fluido ha una velocità media paragonabile a V_{tip}). Nel vortice il fluido ha un moto di tipo elicoidale e si hanno forze centrifughe di entità rilevante che determinano:

- Elevati gradienti di scorrimento (fino a 50 volte la velocità di rotazione dell'agitatore);
- Generazione di turbolenza nell'intero apparato come risultato della dispersione dei vortici;
- Depressioni nella zona retrostante la pala, che risultano massime lungo l'asse del vortice.

Si osserva che, in modo analogo, sul retro delle pale di un agitatore assiale o hydrofoil si sviluppa un singolo vortice.

1.3.3 Campi di moto in sistemi monofasici multi girante

Quando un singolo agitatore non riesce più a garantire una buona capacità di miscelamento vengono inseriti più agitatori sullo stesso albero. Questa è una soluzione adottata spesso soprattutto in ambito farmaceutico dove l'utilizzo di fermentatori alti e stretti rende necessario un sistema di agitazione multi girante.

Accoppiando due o più giranti, anche di diversa natura, si ha la formazione di più anelli di circolazione dalle diverse caratteristiche.

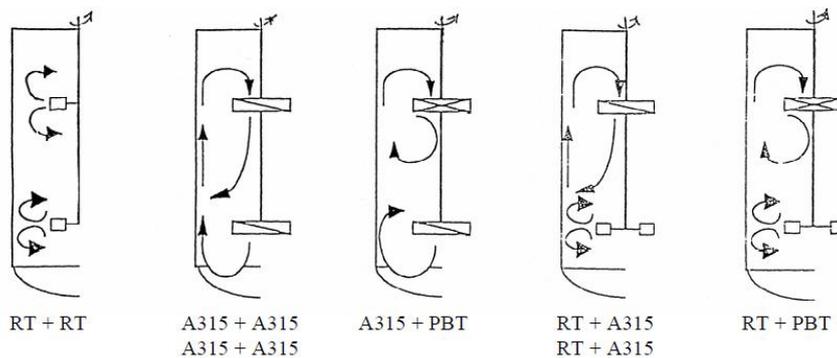


Figura 1.18: Campi di moto derivanti da sistemi multi girante. (Paul E. L., et al., 2004)

Le immagini presentate sopra si riferiscono a sistemi in cui ogni girante opera in modo indipendente dall'altra. Infatti ciascuna genera il suo campo di moto caratteristico senza essere influenzata dalle giranti adiacenti. Nel caso in cui la distanza tra le giranti venga ridotto, si ha un cambiamento significativo del campo di moto, come mostrato in figura 1.18 (che si riferisce al caso di un sistema formato da due turbine Rushton in cui viene variata la distanza tra i due agitatori).

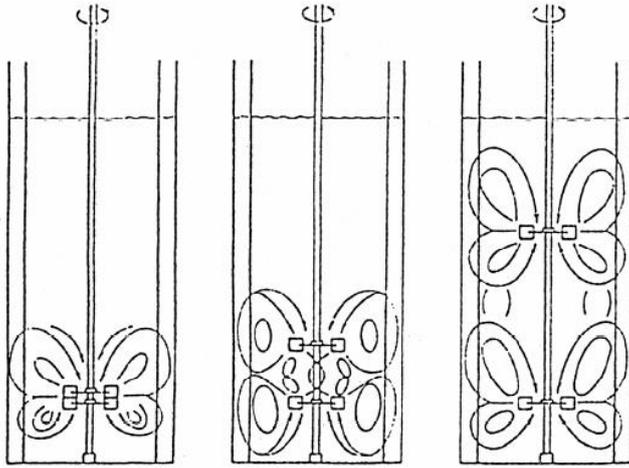


Fig.1.19: Campo di moto di sistemi multi girante a spaziatura variabile. (Paul E. L., et al., 2004)

Si può notare che, al diminuire della distanza tra gli agitatori, i quattro anelli di circolazione distinti presenti nella configurazione a più alta distanza tendono a diventare sempre meno definiti finendo poi per collassare nei due classici anelli di circolazione di una singola girante.

2. TECNICHE DI MISURA E STRUMENTAZIONE

In questo capitolo sono illustrate le tecniche di misura, nonché la strumentazione, utilizzate nel presente lavoro di tesi. Durante la prima parte del lavoro di tesi, incentrata sulla caratterizzazione del campo di moto del sistema in esame, è stata utilizzata la tecnica PIV, acronimo di “*Particle Image Velocimetry*”, per l’acquisizione di serie temporali di velocità. Diversamente, nella seconda parte del lavoro di tesi, durante il quale è stata studiata l’evoluzione temporale della dispersione di un tracciante per risalire al tempo di miscelazione caratteristico del reattore, è stata utilizzata la tecnica PLIF, acronimo di “*Planar laser induced fluorescence*”.

2.1 La tecnica PIV in sistemi monofase

I progressi fatti negli ultimi vent’anni nei campi dell’ottica, dell’elettronica, dell’informatica e delle apparecchiature video hanno consentito di sviluppare una nuova tecnica adatta contemporaneamente a visualizzazioni qualitative di flussi e a misure quantitative di complessi campi di velocità istantanei. Detta tecnica, il cui studio e le cui

applicazioni sono oggetto del presente lavoro di tesi, prende il nome di “Velocimetria a immagini di particelle” (*Particle- Image Velocimetry - PIV*).⁽⁴⁾

La PIV, essendo una tecnica basata su metodi ottici, è una tecnica non invasiva e, al contrario delle tecniche di misura puntuali, la PIV fornisce la misura della velocità in un piano, rendendo agevole l'individuazione di strutture vorticose anche in moti non stazionari. L'uso inoltre di telecamere digitali ad alta definizione e il parallelo sviluppo di software di elaborazione ed analisi delle immagini hanno permesso di compiere un notevole progresso per quanto concerne l'accuratezza dei risultati, grazie soprattutto all'elevata qualità delle immagini ottenute. Il posizionamento della telecamera e la relativa messa a fuoco risulta essere abbastanza riproducibile, mentre è critico, per la riproducibilità delle misure, il posizionamento della sorgente di illuminazione ad alta potenza (laser) in quanto è proprio il laser che definisce la porzione di sistema da sottoporre ad analisi.

2.1.1 Principi di funzionamento della PIV in sistemi monofase

La tecnica PIV prevede l'impiego sincrono di una serie di apparati che cooperano al fine di ottenere la misura della velocità di un liquido su un piano.

La strumentazione è costituita da:

- Una sorgente di illuminazione pulsata ad alta potenza (fascio laser);
- Un sistema di lenti cilindriche che trasformano il laser in una lama di luce;
- Un tracciante solido appropriato, con cui inseminare il fluido, che riesca a “seguire” fedelmente il campo di moto senza disturbarlo e che, a seguito dell'interazione con il fascio di luce, sia rilevabile dalla telecamera digitale. Per tale motivo il tracciante deve avere una densità apparente prossima a quella del fluido ed una dimensione assai ridotta. Inoltre il tracciante deve essere chimicamente inerte con il sistema, non tossico, non corrosivo, non abrasivo e possibilmente poco costoso;
- Una o più telecamere ad alta definizione e velocità di acquisizione;
- Un acquisitore/elaboratore di immagini che sincronizzi laser e telecamere;
- Un software di elaborazione di immagini adeguato.

Il principio di funzionamento della PIV è basato sul rilevamento e l'analisi degli spostamenti delle particelle di tracciante in sospensione nella regione fluida che si vuole

caratterizzare. La velocità del fluido in un punto all'interno del sistema viene infatti determinata come la velocità delle particelle di tracciante in quel punto (o in un intorno di dimensioni predefinite e ristrette).

In figura 2.1 è riportato lo schema di funzionamento di un sistema di misura PIV: una lama di luce laser illumina in due istanti successivi (t e t' , posti ad una distanza temporale nota e definita dell'ordine dei decimi o centesimi di secondi, e variabile a seconda delle velocità caratteristiche del sistema) le particelle di tracciante presenti nella regione interessata. Sincronizzata con laser, la telecamera provvede ad acquisire in rapida successione due immagini del sistema (la prima acquisita al tempo t e la seconda al tempo t') caratterizzate dalla riflessione della luce laser incidente sia parte delle particelle di tracciante: il risultato dell'acquisizione saranno due immagini in cui sono visibili le particelle di tracciante.

Per l'analisi delle immagini si suddivide ciascuna immagine in aree di piccole dimensioni (aree di interrogazione), sulle quali si assume che lo spostamento delle particelle di tracciante sia il medesimo. Lo spostamento subito dalle particelle di tracciante nell'intervallo che intercorre tra le due immagini è poi determinato con un programma di elaborazione che provvede, attraverso un algoritmo di cross-correlation, a quantificarlo tramite l'analisi della coppia di immagini prodotte. La velocità puntuale è quindi ottenuta dal semplice rapporto tra lo spazio percorso dalla particella e il tempo intercorso ($\Delta t = t' - t$) tra l'acquisizioni delle due immagini.

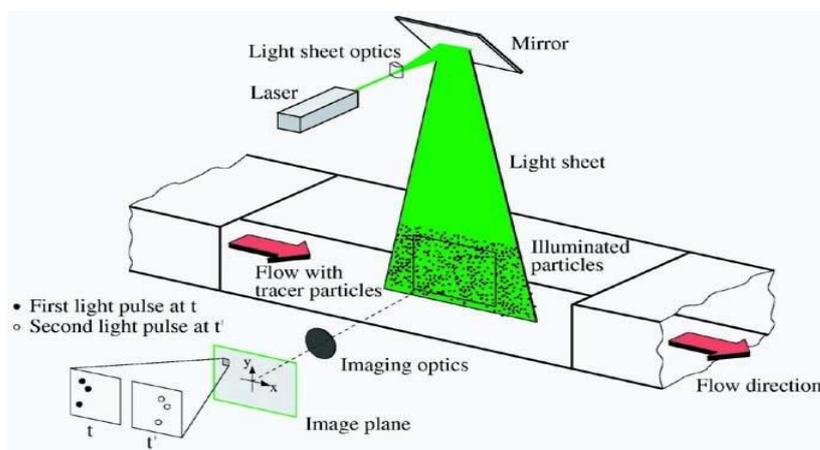


Fig. 2.1: Tipico schema di un sistema PIV. Immagine tratta da "PIV/LDV MEASUREMENTS OF MEAN VELOCITY AND TURBULENCE IN A COMPLEX OPEN CHANNEL FLOW", B-S. Hyun, R. Balachandar, K. Yu, and V.C. Patel.

La qualità delle misurazioni effettuate risente notevolmente della quantità di tracciante in sospensione nel sistema in quanto non ne deve essere presente né troppo poco onde evitare l'assenza di tracciante in alcune zone del reattore, né una quantità tale da rendere il sistema "opaco", ottenendo così una misura poco precisa.

In sintesi la PIV:

- Consente di ottenere buoni livelli di dettaglio sia spaziali (dipendenti dalla risoluzione della telecamera e velocità di acquisizione delle immagini), che temporali;
- In caso di regime di moto turbolento consente di misurare sia la componente media che quella fluttuante del campo di moto; le misure così realizzate consentono ad ogni modo la determinazione del campo di moto bidimensionale;
- Consente di realizzare misurazioni utilizzabili anche per la messa a punto di codici di calcolo per la progettazione/ottimizzazione di apparati;
- Consente, rispetto ad altre tecniche di tipo puntuale, un risparmio notevole di tempo nella caratterizzazione completa di un sistema;
- Necessita di una sorgente luminosa ad alta potenza.

2.2 Principi di funzionamento e classificazione dei laser

Il laser è un dispositivo che amplificando la luce produce fasci luminosi monocromatici e coerenti, con lunghezze d'onda che vanno dall'IR all'UV fino ai raggi X.

La luce laser è caratterizzata da alta potenza e forte direzionalità (il termine deriva da "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*").

Un apparati laser è formato da tre componenti principali:

- Materiale attivo (gas, semiconduttore o solido);
- Sistema di pompaggio (eccita il materiale attivo mediante energia elettromagnetica o chimica);
- Sistema ottico (amplifica e rende disponibile la luce laser).

Si basa sull'emissione stimolata di radiazione da parte degli atomi di una sostanza opportuna, detta materiale attivo; gli atomi vengono prima eccitati con una sorgente energetica esterna (pompaggio), vengono quindi stimolati ad emettere l'energia prima

pompata, grazie all'intervento di una radiazione esterna di determinata frequenza. I fotoni della radiazione emessa hanno una frequenza caratteristica degli atomi da cui sono stati generati e viaggiano in fase con i fotoni della luce utilizzata per la stimolazione. L'amplificazione della luce è ottenuta mediante successive riflessioni dei fotoni in una cavità risonante, sostituita essenzialmente da due specchi paralleli posti alle estremità dello strumento, di cui uno totalmente riflettente e l'altro solo parzialmente. Durante il percorso tra uno specchio e l'altro i fotoni colpiscono altri atomi eccitati che a loro volta emettono altri fotoni caratterizzati dalla medesima frequenza e fase di quelli già presenti: il tutto quindi genera una radiazione monocromatica coerente e di alta intensità. Grazie ad uno specchio semi-argentato, parte della radiazione viene poi fatta filtrare all'esterno rendendola disponibile per l'uso.

I laser vengono classificati, a seconda della natura del materiale attivo utilizzato, in laser a stato solido, a gas, a semiconduttore, a liquido, a elettroni liberi. Nelle applicazioni PIV si utilizza un laser a stato solido. Il laser impiegato nel presente lavoro è formato da un cristallo YAG (Ittrio- Alluminio- Granato) drogato con neodimio (Nd) in cui il fascio di luce è generato da ioni Nd^{3+} che sono incorporati in cristalli YAG. L'Nd- YAG ha un'alta amplificazione, buone proprietà termiche e meccaniche, e può essere pompato con luce bianca poiché i suoi livelli energetici non sono discreti ma continui a causa della particolare conformazione a reticolo.⁽⁴⁾

Quasi tutte le applicazioni PIV richiedono un'illuminazione con grande intensità di energia, ma non è realistico pensare di usare un laser a sorgente continua. Infatti la PIV richiede illuminazione solo nel momento in cui la telecamera acquisisce le immagini: ciò ha portato all'utilizzo di laser pulsanti che, nella configurazione più utilizzata, risultano essere quelli a doppia cavità.

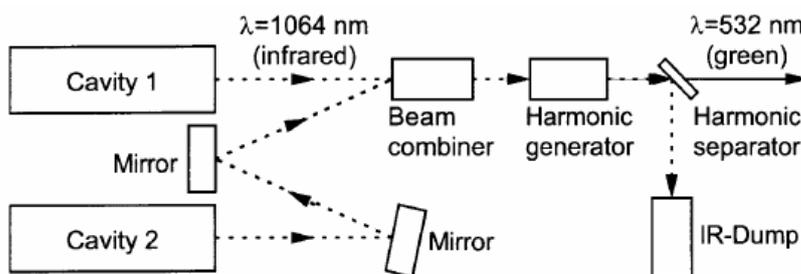


Fig. 2.2: Schema di funzionamento di un Laser a doppia cavità per PIV. Immagine tratta da DynamicStudio v3.20 User's Guide 2011).

Essi permettono, a differenza di quelli a singola cavità, una doppia pulsazione senza restrizioni riguardo al lasso di tempo che intercorre tra le due pulsazioni in serie. Questo permette grande libertà nello scegliere l'intervallo di tempo di tempo tra gli impulsi, rimanendo costante la quantità di energia emessa per ogni impulso.

I laser YAG emettono una luce pari ad una lunghezza d'onda pari a 1064nm (lunghezza d'onda che dunque cade nell'IR): tuttavia nelle applicazioni PIV questa lunghezza d'onda non è utilizzabile in quanto la telecamera è maggiormente sensibile allo spettro blu- verde e risulterebbe quindi difficile allineare un fascio di luce invisibile. Si utilizza dunque un generatore armonico che porta la luce laser nel visibile dimezzando la sua lunghezza d'onda a 532nm. Tale processo non è molto efficiente e la frazione di IR rimasta viene eliminata, prima di essere resa disponibile per l'applicazione, utilizzando un separatore armonico. Nel presente lavoro di tesi, le misure sono state fatte utilizzando un laser Nd:YAG Litron, lavorando ad lunghezza d'onda pari a 532nm.



Fig. 2.3: Laser Nd:YAG Litron utilizzato nel presente lavoro di tesi.

2.3 Principi di funzionamento delle telecamere per PIV

Nella PIV lo scopo delle telecamere è quello di catturare la posizione delle particelle presenti nel fluido in moto in due istanti successivi, permettendo la successiva elaborazione che porta alla determinazione del vettore spostamento.

Il numero di telecamere necessarie per l'analisi PIV è variabile, a seconda che si effettuino misure in 2D o 3D ovvero se si debbono effettuare misure in un sistema bifase. Infatti la 2D PIV si avvale di una sola fotocamera, posta con asse normale al fascio laser in modo da rilevare solo le due componenti del vettore, mentre la terza componente non

viene registrata. Diversamente dalla 2D- PIV, la *stereo*- PIV si avvale di due telecamere per misurare anche la terza componente del vettore velocità.

Il presente lavoro di tesi è stato svolto utilizzando la configurazione 2D- PIV.

La telecamera utilizzata è di tipo digitale con un sensore “*Charge Couplet Device*” (CCD), ovvero “dispositivo a scorrimento di carica”^(4,5). Il CCD è un componente elettronico composto da materiali semiconduttori sensibili alla luce. Quando un fotone colpisce la sua superficie vengono liberati elettroni che si accumulano nei singoli elementi accumulatori del CCD, detti pixel, la cui funzione è simile a quella di un fotodiodo: quanto più luminoso è un oggetto, tanti più elettroni si accumulano sui pixel. I fotoni che si accumulano sui pixel vengono quindi convertiti in segnale elettrico, il cui voltaggio viene codificato in una scala di colori in base alla quale viene poi ricostruita l’immagine.

Per poter risalire allo spostamento delle particelle attraverso un opportuno algoritmo (utilizzando la *cross- correlation*), la telecamera deve poter acquisire una coppia di immagini temporalmente spaziate tra loro: per permettere tutto ciò interviene il “*progressive- scan- interline*” (PCI) mostrato in figura 1.3 che presenta al suo interno celle sensibili alla luce e, in egual numero, celle di deposito che non vengono esposte alla luce. Il primo impulso laser è sincronizzato in modo da impressionare il primo fotogramma che viene poi trasferito dalle celle fotosensibili alle celle di deposito in modo che al secondo impulso laser le celle fotosensibili siano di nuovo pronte per essere impressionate. Entrambi i fotogrammi vengono poi trasferiti in sequenza al sistema di acquisizione dati.

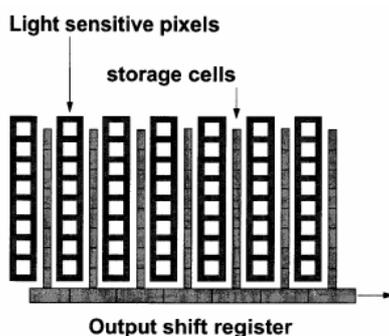


Fig. 2.4 Schema di un sensore CCD- PCI.

La telecamera utilizzata in questo lavoro di tesi (figura 2.5) è una *HiSense MkII* con un sensore CCD da 1344x1024 pixel equipaggiata con un obiettivo Nikon da 50mm. Le

telecamere richiedono una calibrazione per poter effettuare misure quantitative; è necessario indicare quale sia il rapporto tra i pixel delle immagini in formato digitale e le dimensioni di ciò che si sta osservando nella realtà.



Fig. 2.5: Telecamera *HiSense MkII* utilizzata nel presente lavoro di tesi.

2.4 Particelle traccianti

Dal momento che nella tecnica PIV la misurazione della velocità avviene in maniera indiretta, ovvero misurando la velocità delle particelle traccianti sospese nel fluido, è necessario che queste abbiano delle caratteristiche ben precise affinché la misura possa essere ritenuta affidabile.

Le due caratteristiche principali che deve avere un buon tracciante sono la capacità di riflettere la luce e la capacità di seguire il moto del fluido nel quale il tracciante è sospeso, senza però interferire con esso.

In generale, il moto delle particelle sospese in un fluido dipende da svariati fattori quali: forma della particella, dimensione, densità relativa, concentrazione nel fluido, forze esterne (gravità, forza centrifuga, attrito). La forma della particella influenza il valore del coefficiente d'attrito, la dimensione e la densità influenzano la risposta della particella alle variazioni della velocità del fluido, la concentrazione determina la probabilità di interazione tra le particelle. La concentrazione quindi deve essere tale per cui vi sia una distanza media tra le particelle sufficiente per poter trascurare interazione e urti.

La capacità di riflettere la luce incidente è fondamentale affinché le particelle di tracciante siano visibili dalle telecamere. Quando un'onda piana incide su una sfera di dimensioni arbitrarie e con indice di rifrazione diverso da quello del mezzo, si genera un'onda di riflessione (“*scattering*”). In poche parole è come se la particella divenisse essa stessa una sorgente di radiazione elettromagnetica con intensità, direzione e polarizzazione diversa rispetto all'onda incidente.

Seguendo la teoria di Mie- Lorentz, lo scattering è caratterizzato dal parametro q :

$$— \quad (1.15)$$

dove d_p è il diametro della particelle e λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente ⁽²⁾. Le particelle aventi dimensioni maggiori generano un'onda di *scatter* più intensa di quelle piccole, mentre la distribuzione della luce diffusa dipende dal parametro q prima introdotto.

Per $q > 1$ il rapporto fra luce diffusa dietro e davanti la particella è dell'ordine di 100-1000, mentre per $q < 1$ il rapporto rimane attorno all'unità. Nella PIV è necessario avere una buona diffusione ai lati della particella per avere una buona qualità del segnale: perciò vengono utilizzate particelle di diametro compreso tra 0.1 e 50 μ m che garantiscono una buona interazione con il laser a lunghezza d'onda pari a 532nm. La scelta della tipologia di tracciante deve essere fatta considerando il fluido utilizzato e la sorgente di luce adottata, mentre la scelta della dimensione deve rispondere alla necessità di un buon segnale di input alla telecamera. La scelta deve convergere verso la dimensione massima, che decresce all'aumentare della velocità del fluido, della turbolenza e del gradiente di velocità. Per quanto riguarda le applicazioni in fase liquida, i traccianti più comuni risultano essere:

- Particelle di poliammide: forma sferica irregolare con densità pari a quella dell'acqua;
- Sfere di vetro;
- Sfere di vetro cave rivestite in argento;
- Particelle polimeriche fluorescenti.

Durante il corso del tirocinio sperimentale, sono state utilizzate sfere a base di polimetilmetacrilato (PMMA) rivestite di uno strato fluorescente di Rhodamina- B, fornitoci dalla Sigma- Aldrich, che si eccita ad una lunghezza d'onda di 560nm ed emette

a 584nm. Per quanto riguarda invece la corretta concentrazione delle particelle in ciascuna area di interrogazione, non vi sono indicazioni precise ma in linea generale la quantità ottimale risulta essere pari a circa cinque particelle di tracciante per ciascuna area di interrogazione. In pratica, nel corso del lavoro sperimentale, si sono aggiunte poche particelle per volta aiutandosi con una spatolina, valutando dopo ciascuna aggiunta la bontà della concentrazione ottenuta avvalendosi del sistema di acquisizione dati.

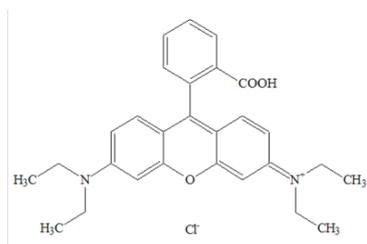


Fig. 2.6: Rhodamina B, il tracciante utilizzato per le acquisizioni con la tecnica PIV.

2.5 La tecnica PLIF

La PLIF è una tecnica di misura ottica che permette di determinare l'evoluzione temporale del valore locale di diverse grandezze scalari in un liquido o in un gas (ad esempio la concentrazione di una specie chimica o la temperatura). La PLIF, acronimo di “*Planar Laser- Induced Fluorescence*”, è basata sulla determinazione dell'intensità di fluorescenza locale (indotta da un raggio/fascio di luce laser)^(6,7).

Gli strumenti necessari per eseguire un'analisi PLIF sono essenzialmente:

- Una sorgente di illuminazione pulsata ad alta potenza (laser);
- Un sistema di lenti cilindriche che trasformano il laser in una lama di luce;
- Un tracciante solido appropriato, con cui inseminare il fluido, che riesca a “seguire” fedelmente il campo di moto senza disturbarlo e che, a seguito dell'interazione con il fascio di luce, sia rilevabile dalla telecamera digitale. Per tale motivo il tracciante deve avere una densità apparente prossima a quella del fluido ed una dimensione assai ridotta. Inoltre il tracciante deve essere chimicamente inerte con il sistema, non tossico, non corrosivo, non abrasivo e possibilmente poco costoso;
- Una o più telecamere ad alta definizione e velocità;
- Un acquirettore/elaboratore di immagini che sincronizzi laser e telecamere;
- Un software di elaborazione di immagini adeguato;

La PLIF è un'ottima tecnica in quanto è una tecnica d'analisi non intrusiva; così come per la PIV, viene utilizzata una telecamera esterna per raccogliere le immagini del sistema da analizzare che, in tal modo, non viene perturbato. La PLIF è una tecnica d'analisi quantitativa, precisa ed accurata e in combinazione con altre tecniche (ad esempio la PIV) è utile per caratterizzare il comportamento fluidodinamico di un sistema.

L'analisi quantitativa delle immagini (determinazione del valore di composizione o di temperatura) viene effettuata attraverso il confronto con le immagini di una calibrazione effettuata sul sistema precedentemente all'immissione del tracciante, in cui viene correlata l'intensità della fluorescenza con la grandezza da misurare (concentrazione, temperatura).

E' importante sottolineare come al di sopra di una certa concentrazione limite di tracciante, si arriva ad una saturazione dell'immagine (la fluorescenza rilevabile non varia più linearmente con la concentrazione ma tende a rimanere costante), per cui le misure sono significative solo al di sotto di tale valore. Ciò comporta, in sede di lavoro sperimentale, il cambio totale dell'acqua presente nel reattore dopo tre cicli di acquisizioni.

2.5.1 Traccianti fluorescenti

La selezione di un appropriato tracciante (colorante fluorescente) per un fluido si basa sulla conoscenza delle proprietà chimico-fisiche del colorante (diffusività, fluorescenza, etc.), in relazione alla sorgente luminosa utilizzata. Per scegliere il tracciante corretto, infatti, si devono considerare essenzialmente tre fattori: l'intervallo di lunghezza d'onda di assorbimento, l'intervallo di lunghezza d'onda di emissione e l'efficienza quantica del tracciante. Gli spettri di assorbimento e di emissione forniscono rispettivamente informazioni sul tipo di sorgente luminosa (generalmente si utilizzano laser) che può essere utilizzata per eccitare il colorante e sul tipo di luce riemessa (dunque, sul filtro da utilizzare sulla telecamera).

Risulta perciò fondamentale che i due spettri di assorbimento e di emissione non abbiano elevata sovrapposizione; in caso contrario la fluorescenza locale, riemessa dal colorante eccitato dalla luce incidente, riexcita il tracciante stesso (fenomeno di "selfquenching"). L'efficienza quantica è invece indice dell'intensità della luce riemessa, ed è collegata dunque alla precisione della misura, tanto maggiore quanto maggiore è l'efficienza

quantica. Un ulteriore fenomeno da tenere presente è il cosiddetto “*photobleaching*”, ovvero la decomposizione chimica del colorante a causa della luce emessa dal laser. Questo fenomeno può essere più o meno importante a seconda della potenza della luce laser e della stabilità fotochimica del tracciante. La valutazione della quantità di tracciante localmente decomposto è sostanzialmente impossibile, e praticamente trascurabile.

Naturalmente è fondamentale che il tracciante sia solubile nel mezzo fluido. In caso contrario, il colorante deve essere precedentemente solubilizzato in un appropriato solvente, che sia a sua volta miscibile col fluido da analizzare. Ovviamente l’aggiunta di un composto terzo rende necessaria una valutazione reologica ed ottica (possibile variazione degli spettri di assorbimento, emissione e dell’intensità di riflessione) del sistema complessivo.

2.5.2 Traccianti utilizzati per misure di concentrazione in liquidi

Il tracciante più utilizzato per misurare il tempo di miscelazione in un fluido attraverso la PLIF è senza dubbio la Rhodamina- 6G, che emette nello spettro giallo- arancione. La Rhodamina- 6G ($C_{28}H_{30}N_2O_3 \cdot HCl$), illustrata in figura 2.7, è utilizzata soprattutto con laser Nd:YAG, ovvero il modello di laser utilizzato durante il presente lavoro di tesi. L’efficienza quantica della Rhodamina- 6G è molto elevata, e non si evidenzia una dipendenza dell’entità di fluorescenza né dalla temperatura né dal pH. Lo spettro di assorbimento della Rhodamina- 6G presenta un limite inferiore a 460nm, con un picco dello spettro di assorbimento a 530nm; lo spettro di emissione è invece compreso tra i 540 e i 640nm, con un picco a 560nm (figura 2.8). Ciò comporta una sovrapposizione molto piccola dei due spettri, rendendo la Rhodamina- 6G un ottimo tracciante per le misure PLIF.

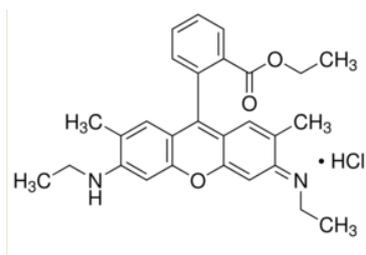


Fig. 2.7: Rhodamina- 6G, il tracciante utilizzato per le acquisizioni con la tecnica PLIF e fornito dalla Sigma- Aldrich.

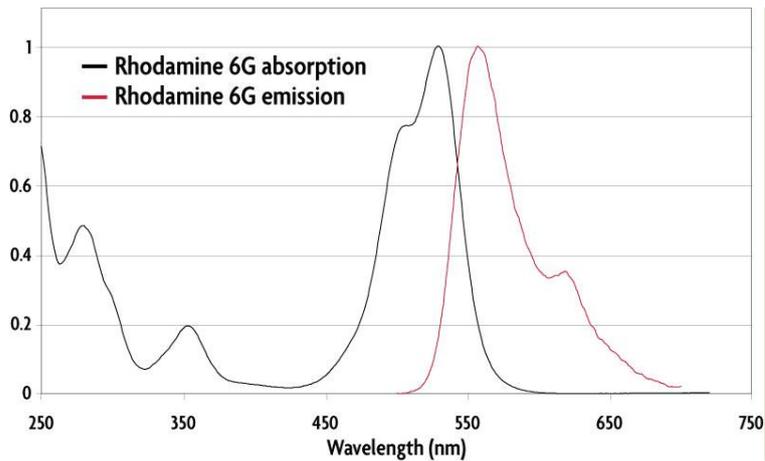


Fig. 2.8: Spettri di emissione e di assorbimento della Rhodamina- 6G.

2.5.3 Procedura di acquisizione

Sia per la PLIF che per PIV sono stati utilizzati lo stesso laser e la stessa telecamera. La PLIF tuttavia necessita di immagini singole, e non di coppie di immagini come per la PIV: questo ha reso necessario ridefinire le impostazioni del software di elaborazione dati.

In pratica, dopo aver avviato il sistema di acquisizione si procede iniettando velocemente il tracciante nel reattore, e l'acquisizione continua per un lasso di tempo impostato empiricamente, sufficiente a omogeneizzare il tracciante nel sistema.

Successivamente le immagini vengono elaborate da diversi software per determinare il grado di omogeneità spaziale attraverso l'analisi del coefficiente di variazione (CoV)⁽²⁾. Per ottenere un risultato sperimentale valido è assolutamente necessario minimizzare la presenza di bolle d'aria e di impurezze nel reattore. Queste infatti inducono la presenza di coni d'ombra falsando dunque il valore di t_{mix} reale.

3. CONFIGURAZIONE DEL REATTORE E PROCEDURA DI ACQUISIZIONE DATI

In questo capitolo vengono descritte sia la geometria del reattore, sia le diverse configurazioni del reattore durante le analisi PIV e PLIF.

3.1 Rettore agitato meccanicamente di geometria standard

Nel presente lavoro di tesi è stato utilizzato un reattore agitato meccanicamente di geometria cilindrica a fondo piatto, costituito interamente di plexiglass permettendo quindi sia alla lamina laser di penetrare sua alla telecamera di acquisire le immagini; sul coperchio del reattore, anch'esso in plexiglass, sono presenti il foro per l'ingresso dell'albero utilizzato per l'agitazione più altri tre fori necessari per il montaggio del sistema di ricircolo e per la pulizia del sistema. Nella parete del reattore sono presenti quattro setti frangi vortici posti a 90° gradi l'uno dall'altro; al fine di minimizzare il fenomeno della rifrazione, a cui il fascio laser sarebbe stato soggetto durante l'attraversamento della parete curva del reattore, quest'ultimo è inserito in un cubo in plexiglass, anch'esso trasparente, contenente lo stesso fluido del reattore, ossia acqua demineralizzata. In tal modo, la parte superiore del reattore vicina alla flangia del coperchio viene a trovarsi al di sopra del cubo esterno, e quindi fuori dal campo di misura.

Sia il cubo esterno che il reattore sono stati riempiti completamente d'acqua demineralizzata e si è fatta particolare attenzione ad eliminare eventuali bolle d'aria che avrebbero influenzato le misure sperimentali.

La seguente tabella (tabella 3.1)riporta le dimensioni caratteristiche del reattore:

Geometria del reattore	
H [mm]	232
T [mm]	232
D [mm]	77,33
C [mm]	116
W [mm]	23,2

Tabella 3.1: Descrizione della geometria del reattore.

dove:

- H: altezza del reattore;
- T: diametro del reattore;
- D: diametro delle turbine Rushton e PBT;
- C: altezza della girante dal fondo del reattore (“clearance”);
- W: larghezza dei setti frangivortice.

La figura 3.1 rappresenta le grandezze caratteristiche del reattore di geometria standard utilizzato nel presente lavoro di tesi.

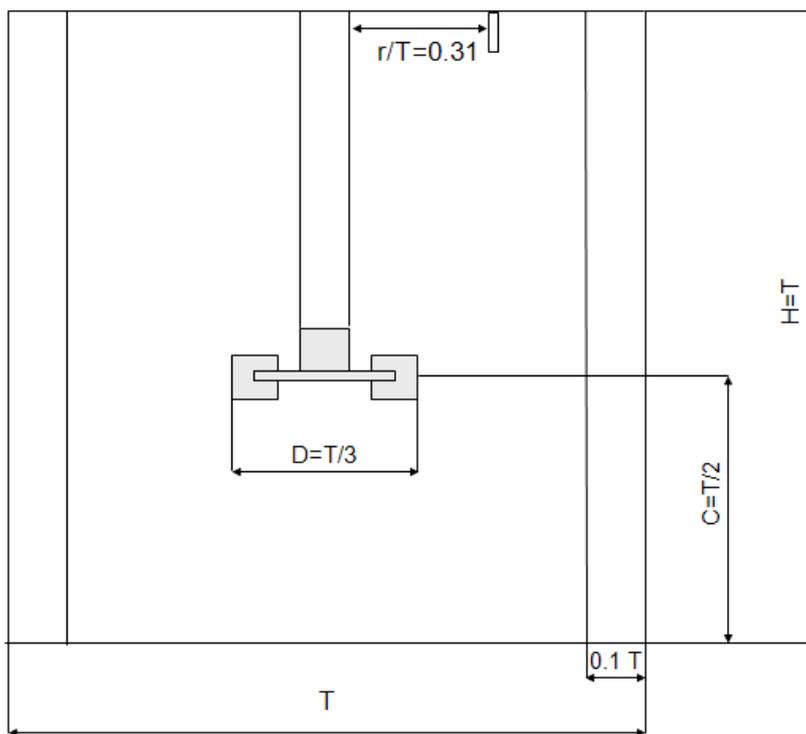


Fig. 3.1 Grandezze caratteristiche del reattore di geometria standard utilizzato nel presente lavoro di tesi.

3.2 Descrizione del sistema di ricircolo

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la caratterizzazione fluidodinamica di un reattore continuo agitato meccanicamente.

La prima parte del tirocinio è stata appunto incentrata sulla realizzazione di un sistema di ricircolo robusto e affidabile che permettesse al reattore di lavorare in continuo garantendo al contempo una buona qualità dei risultati sperimentali.

Il sistema di ricircolo è azionato da una pompa peristaltica (figura 3.2). Il punto di immissione del fluido proveniente dalla pompa è sito esattamente tra due setti frangivortice ed è allineato con il laser. Il punto di aspirazione della pompa invece è a 90° rispetto al punto di immissione (figura 3.3).

Il diametro della sezione di immissione del fluido è di 7mm, mentre il diametro della sezione di aspirazione è di 2cm.



Fig. 3.2: Pompa peristaltica utilizzata nel presente lavoro di tesi.



Fig. 3.3: Inquadratura dall'alto del reattore. Nell'immagine si possono notare, sulla destra, il tubo di immissione del liquido proveniente dalla pompa, e, in basso, il tubo di aspirazione.

Il sistema prevede inoltre una serie di valvole necessarie per la manutenzione e la pulizia del reattore.

Dopo aver montato il sistema nella sua configurazione definitiva, si è proceduto con la calibrazione della pompa per valutare a quali rpm della stessa dovessero essere fatte le acquisizioni. Sono riportati di seguito la tabella relativa alla calibrazione della pompa e il relativo grafico.

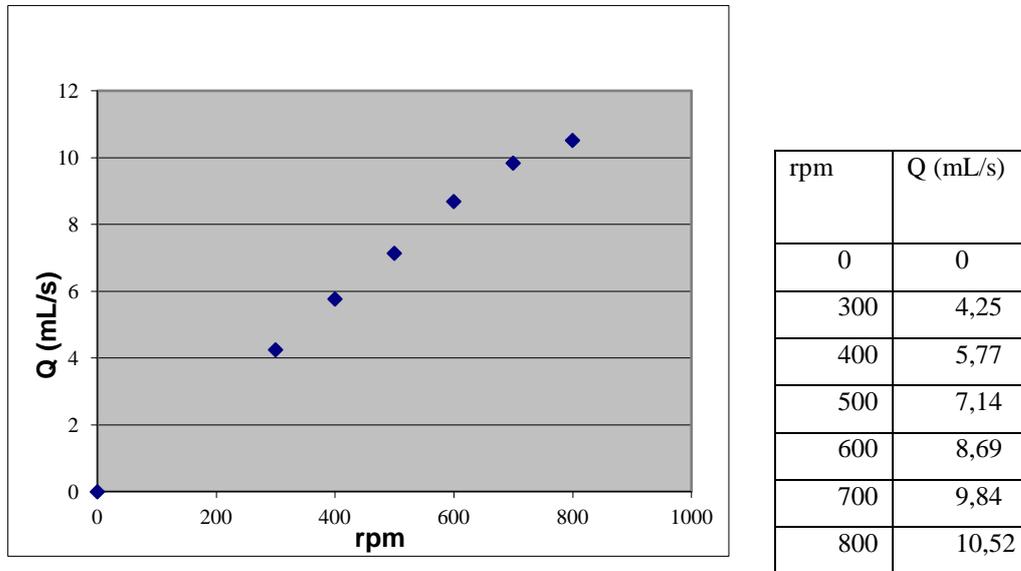


Fig. 3.4: Il grafico, con la relativa tabella, illustra l'andamento della portata della pompa (mL/s) in funzione del numero di giri (rpm).

Per valutare correttamente l'influenza del ricircolo sul campo di moto del reattore si è stabilito di fare le acquisizioni alle seguenti portate:

- $Q = 0$ mL/s;
- $Q = 4,25$ mL/s;
- $Q = 8,69$ mL/s;
- $Q = 10,52$ mL/s.

L'influenza di ciascuna delle sopra elencate portate di ricircolo è stata studiata in relazione alle seguenti velocità di rotazione della girante.

- $N = 50$ rpm;
- $N = 100$ rpm;
- $N = 150$ rpm;
- $N = 300$ rpm.

In tal modo è stato possibile analizzare l'influenza del ricircolo sul campo di moto al variare della velocità di agitazione del sistema.

3.3 Giranti utilizzate

Nel corso del tirocinio sperimentale, il reattore è stato equipaggiato con tre diverse giranti:

- Girante Rushton a 6 pale;
- Girante PBT- up pumping a 6 pale inclinate di 45° ;
- Girante PBT- down pumping a 6 pale inclinate di 45° .

Ciascuna di queste è stata sottoposta alle medesime prove: ciò ha permesso di caratterizzare il campo di moto e di valutare il tempo di omogeneizzazione con diverse configurazioni del reattore.

Come si vedrà nella trattazione dei dati sperimentali, ciascuna girante genera un differente campo di moto all'interno del reattore ed una diversa interazione con il liquido ricircolato.

Nello svolgimento delle analisi PIV, questo fenomeno si è tradotto in una differente influenza del getto sul campo di moto, mentre durante le prove PLIF si è notata una variazione del tempo di omogeneizzazione dovuta essenzialmente alla tipologia di girante utilizzata.

4. PROCEDURA PER L'ELABORAZIONE DEI DATI

In questo capitolo verranno illustrate le procedure sperimentali adottate per l'elaborazione dei dati, ovvero tutte operazioni effettuate per passare dalle immagini acquisite ai dati sperimentali desiderati. Il *software* di elaborazione dati utilizzato in questo lavoro di tesi è *DynamicStudio v. 3.20* della *Dantec Dynamics*.

4.1 Algoritmo di cross- correlation

Con la tecnica PIV è possibile determinare lo spostamento delle particelle senza seguirne direttamente il percorso. La coppia di immagini acquisita viene suddivisa in un certo numero di piccole porzioni (aree di interrogazioni, "IA" in letteratura) che divengono l'elemento unitario base per il calcolo.

Quindi, ogni area di interrogazione del primo fotogramma si correla alla corrispondente area del secondo fotogramma, in modo da stimare un vettore medio di spostamento delle particelle. Il procedimento che porta dalle aree di interrogazione allo spostamento medio è schematizzabile con un modello a segnale lineare digitale, come mostrato in figura 4.1.

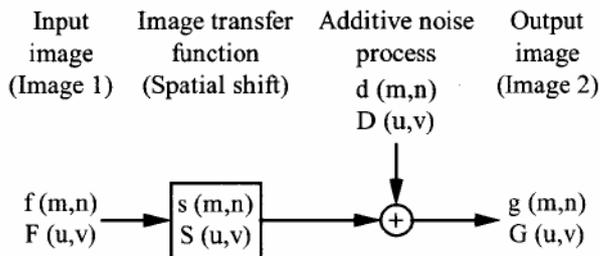


Fig. 4.1: Modello di correlazione a segnale lineare.

La funzione $f(m,n)$, dove m e n sono le coordinate del sistema di riferimento, rappresenta l'intensità di luce all'interno dell'area in interrogazione registrata al tempo t , mentre la funzione $g(m,n)$ rappresenta l'intensità di luce registrata al tempo $t + \Delta t$. Quest'ultima può essere considerata come l'output della funzione di trasferimento $s(m,n)$ associata allo spostamento spaziale, ponendo $f(m,n)$ come input e con l'aggiunta di un disturbo $d(m,n)$.

La funzione di spostamento $s(m,n)$ è direttamente legata all'intensità del flusso e al tempo che intercorre tra i due fotogrammi, mentre la funzione $d(m,n)$ rappresenta il disturbo alla correlazione relativo all'ingresso e all'uscita di particelle dall'area investigata. Il compito della cross- correlation è quello di stimare la funzione di

spostamento $s(m,n)$ sulla base dei valori misurati di $f(m,n)$ e di $s(m,n)$. La funzione di cross- correlation è data da:

$$\Phi_{fg}(m,n) = \quad (4.1)$$

Si ha un valore elevato della funzione di cross- correlation quando un gran numero di particelle trova riscontro con le corrispondenti particelle spazialmente spostate nel secondo fotogramma. In questo caso si parla di vera correlazione (“*true correlation*”). Si ottiene invece un basso valore della funzione di cross- correlation nel caso in cui vi siano molte particelle che entrano o escono dall’ area di interrogazione nell’intervallo di due fotogrammi. In questo caso manca la corrispondenza tra con la posizione iniziale o quella finale e si parla di “random correlation” o di perdita di coppie. Tale perdita di coppie, che si verifica principalmente ai margini dell’area di interrogazione, può essere limitata considerando una parziale sovrapposizione (“*overlap*”) tra le aree di interrogazione adiacenti: infatti, se una particella è uscita da un area di interrogazione è probabile che sia entrata nell’area di interrogazione adiacente.

In questo lavoro di tesi l’elaborazione delle immagini è stata eseguita adottando il software *DynamicStudio* v. 3.20 operando una sovrapposizione del 50% e con una grandezza dell’area di interrogazione pari a 32x32 pixel.

4.2 Elaborazione delle immagini PIV

Di seguito viene riportata la procedura seguita per l’elaborazione delle immagini acquisite con la tecnica PIV, al fine di ottenere il campo di moto del sistema fluidodinamico in esame. La procedura ^(7,8) da applicare singolarmente ad ogni coppia di immagini, tramite il software di elaborazione dati sopra citato, è la seguente:

- **Cross- Correlation:** individua un vettore velocità medio, dato dal picco principale della funzione cross- correlation, che fornisce il vettore spostamento medio per ogni area di interrogazione (IA);diviso per il Δt esistente tra ciascuna delle due immagini fornisce il vettore velocità. La dimensione della IA adoperata è di 32x32 pixel.
- **Peak Validation:** valuta la qualità del vettore medio restituito dalla funzione cross- correlation attraverso il confronto del picco principale con il secondo picco; se il rapporto tra i due picchi è minore di un rapporto pre- impostato, allora

la correlazione è di tipo casuale e quindi il vettore verrà scartato. Nel presente lavoro si è adottato un rapporto tra i picchi pari a 1.2.

- **Range Validation:** serve ad eliminare i vettori con modulo di velocità uguale o superiore alla velocità periferica della girante (V_{tip}). Essendo $V_{tip} = ND\pi$ dove N è il numero di rpm della girante e D è il diametro della girante, segue che bisogna ridefinire il “*range validation*” ogni qual volta si cambia la velocità di agitazione della girante.
- **Vector Statistics:** restituisce la mappa vettoriale risultante dalla media delle mappe istantanee scaturite dalla “*range validation*”

Alla fine di questa serie di analisi si ottiene un foglio di calcolo riassuntivo dove per ogni vettore presente sulla mappa sono riportati:

- Posizione in pixel e mm rispetto all’origine del sistema di riferimento
- Componenti della velocità media
- Varianza
- Deviazione standard
- Coefficiente di correlazione
- Status del vettore (0= vettore valido, 1= vettore non valido)
- Numero di vettori validi su cui viene fatta la media in ogni determinata posizione

Nel post- processamento dei dati si è operato un cambiamento di coordinate rispetto a quelle utilizzate dal software di elaborazione immagini a supporto della PIV. In particolare mentre il programma usa un sistema di riferimento cartesiano centrato sul vertice in basso a sinistra dell’immagine acquisita, in questo lavoro di tesi sono state adottate le seguenti convenzioni:

- Sono state definite le due coordinate r e z , rispettivamente la prima radiale e la seconda assiale.
- L’ origine (0;0) è stata posta sul fondo del reattore, a $T/2$. Entrambe le coordinate sono state normalizzate rispetto a T . In tal modo la coordinata radiale r/T può assumere valori che vanno da $-0,5 < r/T < +0,5$, mentre la coordinata assiale z/T può assumere valori che vanno da 0 a 1. Tuttavia i valori di $z/T > 0,8$ sono stati

esclusi dal campo di misura in quanto comprendono la flangia che chiude il reattore.

Quindi praticamente:

- La parte bassa del reattore (tra il fondo del reattore e la girante) è compresa tra $0 < z/T < 0,5$.
- La parte alta del reattore (compresa tra la girante e l'altezza massima del reattore sottoposta ad indagine sperimentale) è compresa tra $0,5 < z/T < 0,8$.
- Un'analisi più accurata è stata dedicata allo studio del profilo $r/T=0,312$. Le rilevazioni del campo di moto sono state eseguite in corrispondenza dell'imbocco della corrente di ricircolo. Per quanto riguarda la simbologia viene adottata quella comunemente utilizzata nell'ambito dello studio della miscelazione⁽⁵⁾, vale a dire:
 - V è la componente radiale del vettore velocità medio;
 - U è la componente assiale del vettore velocità medio;
 - W è la componente tangenziale del vettore velocità medio. Tale componente non è stata oggetto di studio nel presente lavoro di tesi;
 - V,U e W risultano positivi quando concordi con il loro asse di riferimento.

Per ottenere una mappa vettoriale “pulita” sono stati eliminati i vettori con bassa validazione ($N < 1/3$ delle immagini totali).

4.3 Acquisizione ed elaborazione dati nella tecnica PLIF

4.3.1 Procedura di iniezione della Rhodamina- 6G

La prima operazione necessaria per ottenere dati affidabili è stata la messa a punto di una tecnica di iniezione del tracciante il più semplice e veloce possibile. Per l'iniezione di Rhodamina- 6-G è stata utilizzata una siringa graduata. Per ciascuna rilevazione del t_{mix} sono stati iniettati nel reattore 2mL di una soluzione di Rhodamina- 6G a 240mg/L.

L'immissione del tracciante è stata effettuata in corrispondenza del punto di iniezione della pompa secondo le seguenti modalità:

- Si prepara la siringa con il tracciante;
- Si infila la siringa nel tubo di immissione del fluido, facendo arrivare l'ago della siringa esattamente nel punto di imbocco del tubo nel reattore;

- Si prepara il sistema all'acquisizione;
- Una volta che il laser parte con le acquisizioni si aspetta qualche secondo e si inietta il tracciante nel più breve possibile.

4.3.2 Elaborazione delle immagini PLIF

La procedura applicata ad ogni serie di immagini acquisite con la tecnica PLIF, al fine di ricavare il tempo di miscelazione del sistema analizzato è la seguente:

- Si oscurano le zone esterne al campo di moto attraverso la funzione “**Masking Image**”. La “maschera” da applicare ad ogni immagine viene definita attraverso la funzione “**Define Mask**”. In tal modo si oscurano tutte sia le zone dell'immagine non interessate dal moto del fluido sia le zone dell'immagine relative a componenti metalliche del reattore che, a seguito della riflessione della luce laser, indurrebbero errori di misura.
- Si genera l'immagine media dei primi dieci fotogrammi iniziali (precedenti all'iniezione del tracciante) utilizzando la funzione “**Image Mean**”. Si ottiene dunque un'immagine denominata “**Min**”.
- Si procede analogamente con gli ultimi dieci fotogrammi, ottenendo un'immagine denominata “**Max**”.
- Si sottrae dunque l'immagine media iniziale dall'immagine media finale attraverso la funzione “**Subtract Image**” per eliminare il rumore di fondo. Si ottiene dunque la relativa immagine “**Max-Min**”.
- A questo punto si sottrae l'immagine “**Min**” da tutte le immagini acquisite “mascherate” tramite la funzione “**Subtract Image**”. In tal modo si ottengono nuove immagini prive del rumore di fondo contenuto nell'immagine media iniziale “**Min**”.
- Si dividono le immagini così ottenute per l'immagine “**Max-Min**” attraverso la funzione “**Divide by image**”. In questo modo si opera una normalizzazione delle immagini.
- Si moltiplicano aritmeticamente le immagini ottenute al punto precedente per un valore compreso tra 500 e 2000 attraverso la funzione “**Multiply by**”. In sede di analisi si è optato per il valore 500 ottenendo buoni risultati. Questa operazione viene eseguita per aumentare l'intensità dei pixel in modo da permettere una buona visualizzazione delle immagini. Il fattore di moltiplicazione è funzione del

tipo e della quantità del tracciante iniettato; l'intervallo indicato (500- 2000) è quello ottimale per l'utilizzo di Rhodamina- 6G, con concentrazione massima all'interno del sistema di 90ppm⁽¹²⁾.

A questo si procede con il *post- processing* delle immagini ottenute. Tale operazione viene effettuata tramite l'analisi del coefficiente di variazione (*CoV*) delle immagini modificate dalla procedura sopra descritta.

Il coefficiente di variazione di un immagine è definito come segue:

$$\frac{\overline{C_i^2}}{\overline{C}^2} \quad (4.2)$$

dove:

- C_i è la concentrazione nel singolo pixel *i*-esimo dell'immagine;
- \overline{C} è la concentrazione media di tutta l'immagine;
- N è il numero totale di pixel costituenti l'immagine.

Dal valore del *CoV* si ricava il *CoV* adimensionale (CoV_{adim}), definito come:

$$\frac{CoV_i}{CoV_{adim}} \quad (4.3)$$

dove:

- CoV_i è il *CoV* dell'immagine *i*-esima;
- CoV_{adim} è il *CoV* medio finale calcolato sulle ultime trenta immagini;
- CoV_{in} è il *CoV* dell'immagine in cui si ha l'iniezione del tracciante;

Per calcolare il *CoV* di ogni singola immagine è stato utilizzato un apposito programma scritto in Matlab, che attraverso un codice, registra i valori di *CoV* di ogni immagine in un file.txt.

Il calcolo del CoV_{adim} è stato effettuato in un foglio Excel utilizzando i dati del file .txt.

Il tempo di miscelazione, t_{mix} , viene identificato come il tempo dopo il quale tutti i valori del *CoV* sono minori di 0,05. ⁽⁹⁾

5. RISULTATI SPERIMENTALI. TECNICA PIV: STUDIO DEL CAMPO DI MOTO IN UN REATTORE AGITATO CON RICIRCOLO

In questo capitolo verranno presentati sia i risultati sperimentali ottenuti con la tecnica PIV per quanto riguarda la caratterizzazione del campo di moto del sistema, sia i risultati ottenuti con la tecnica PLIF per quanto riguarda la determinazione del tempo di miscelazione nelle diverse configurazioni studiate.

Prima di effettuare la caratterizzazione fluidodinamica del sistema è stato necessario valutare, avvalendosi dei valori riportati in letteratura ⁽¹⁰⁾, il corretto valore di Δt intercorrente tra la coppia di impulsi di luce laser. Si è dunque optato per un $\Delta t = 1200 \mu s$ per le velocità di rotazione della girante (N) pari a 50, 100 e 100 rpm e si è scelto un $\Delta t = 600 \mu s$ per N=300rpm.

Il numero di coppie di immagini che permettono di ottenere un campo di moto medio non dipendente dal numero di campioni acquisiti è risultato pari a 2000. La frequenza di pulsazione del laser utilizzata è stata di 6Hz.

Come detto precedentemente, si è convenuto di caratterizzare il campo di moto agendo su due variabili: gli rpm dell'albero della girante (d'ora in poi identificata con N) e la portata del ricircolo (d'ora in poi identificata con Q).

5.1 Studio del campo di moto in un reattore agitato con ricircolo. Prove con turbina Rushton

5.1.1 Campo di moto a N= 50 rpm

Le prime prove sperimentali sono state effettuate equipaggiando il reattore con una girante Rushton. Quindi si è impostata la velocità di rotazione dell'albero a N=50rpm e si è variata la portata di ricircolo secondo quanto stabilito in fase preliminare (da un valore minimo di Q=0mL/s a un valore massimo di Q=10,52mL/s).

Impostando la velocità di rotazione dell'albero della girante a 50rpm, si è chiaramente manifestata l'influenza del getto (originato dalla portata ricircolata) sul campo di moto del sistema. Ciò si evince in maniera particolare per alte portate ricircolate dalla pompa (Q=8,69mL/s e Q=10,52mL/s). Le immagini che seguono (fig.5.1 e 5.2) illustrano la

mappa vettoriale e la variazione del modulo velocità (di seguito indicato con l'acronimo "Velocity") diviso V_{tip} su tutto il piano del reattore.

La fig.5.1 illustra la mappa vettoriale e la variazione di $Velocity/V_{tip}$ sul piano preso in esame, ed essendo $Q=0\text{mL/s}$, mostra quale sia il campo di moto del sistema in condizioni non perturbate.

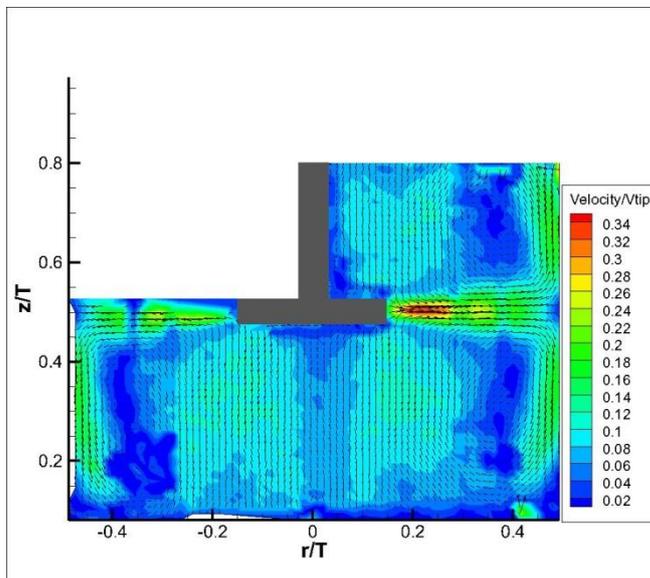


Fig. 5.1: Mappa vettoriale e andamento di $Velocity/V_{tip}$ sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

La fig. 5.2 mostra invece la mappa vettoriale e la relativa variazione di $Velocity/V_{tip}$ alla massima portata del getto ($Q=10,52\text{mL/s}$). In quest'immagine è evidente la presenza del getto che, una volta entrato dall'alto, giunge all'altezza della girante e viene da questa convogliato lungo la parete del reattore basso secondo l'andamento classico delle giranti Rushton.

Confrontando le due immagini si può ben vedere quale sia l'influenza della corrente di ricircolo su campo di moto del reattore. Ciò comporta, per alte portate del getto, una distorsione dei profili velocità assiali e radiali. Dalle mappe vettoriali che seguono si possono dedurre i seguenti aspetti:

- La corrente di ricircolo influenza notevolmente il campo di moto sul piano di misura, specie nella parte alta del reattore. La portata del liquido ricircolato è infatti in grado di modificare in modo sostanziale il campo di moto a doppio anello tipi di reattori operanti con turbine Rushton soprattutto nella parte alta del reattore.

- D'altro canto si può vedere come nella parte bassa del reattore l'influenza della corrente di ricircolo sia meno marcata. Infatti la corrente di ricircolo una volta arrivata alla girante, viene da questa convogliata sulla parete esterna del reattore per poi proseguire secondo gli andamenti di un campo di moto tipico della girante Rushton.

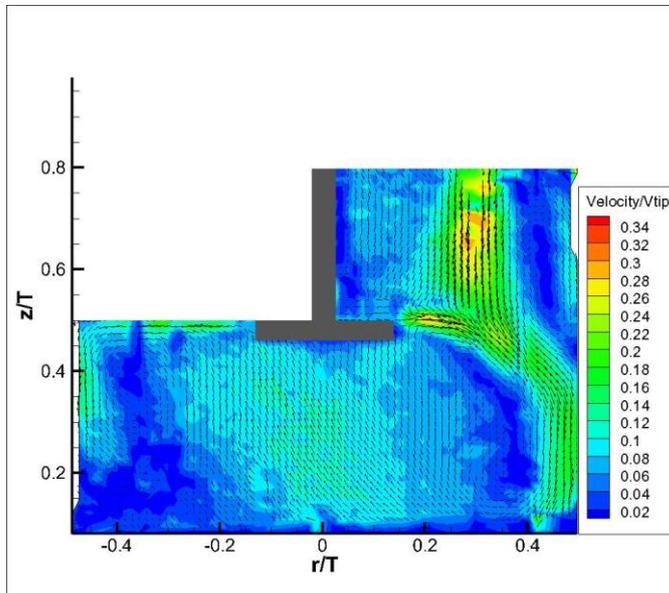


Fig. 5.2: Mappa vettoriale e andamento di $Velocity/V_{tip}$ sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Le immagini seguenti (fig.5.3 e fig. 5.4) illustrano le variazioni U/V_{tip} sul piano del reattore. La fig.5.3 è relativa ad una portata di ricircolo $Q=0\text{mL/s}$, e quindi rappresenta il sistema non perturbato dal getto della pompa. Si può notare come i valori di U/V_{tip} siano molto piccoli su tutto il piano del reattore: assumono valori significativi solo lungo le pareti del reattore, dove sono presenti le correnti dirette verso il basso (in blu nella figura) e dirette verso l'alto (in rosso nella figura). Tale campo di moto è quello tipico di una girante Rushton.

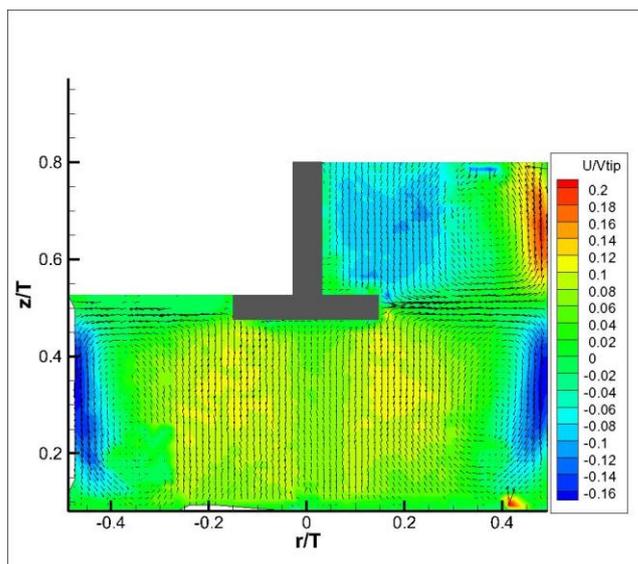


Fig. 5.3: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

La fig. 5.4, relativa a un getto della pompa pari a $Q=10,52\text{mL/s}$, mostra invece un andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore molto diverso da quello osservato in precedenza. In particolare, nella parte alta del reattore, la zona blu indicante una velocità assiale negativa (in quanto diretta verso il basso) non è nient'altro che il getto della pompa. E' da notare inoltre come la corrente diretta verso l'alto presente sul bordo destro del reattore (in rosso nella figura 5.3) sia quasi totalmente sparita nell'immagine seguente; il risultato sperimentale mostrato ha senza dubbio un'importante ricaduta tecnologica. Risulta infatti evidente che, nel caso di reattori operanti con miscele multifase, l'aver annullato la componente di velocità assiale positiva nella zona alta del reattore potrebbe indurre rilevanti problemi di omogeneizzazione della fase dispersa.

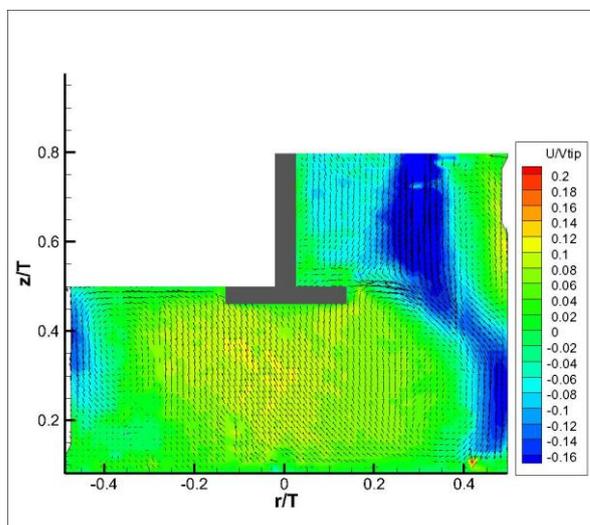


Fig. 5.4: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Seguono ora i confronti dei profili di velocità assiale (fig. 5.5) e radiale (fig. 5.6) in corrispondenza dell'entrata del getto, per ciascuna delle portate esaminate.

L'andamento dei profili di velocità assiale evidenzia come l'influenza della portata di ricircolo aumenti in maniera proporzionale con la portata nella parte alta del reattore ($0,5 < z < 0,8$), mentre non influenza in maniera significativa la parte bassa ($0 < z < 0,5$). È da notare come man mano che aumenta la portata, i valori di U/V_{tip} diventano sempre più negativi (in quanto aumenta la velocità del getto) vicino al cielo del reattore, per poi arrivare a zero in corrispondenza della girante: addirittura per le portate $Q=8,69\text{mL/s}$ e $Q=10,52\text{mL/s}$ U/V_{tip} registra valori negativi fin oltre la girante.

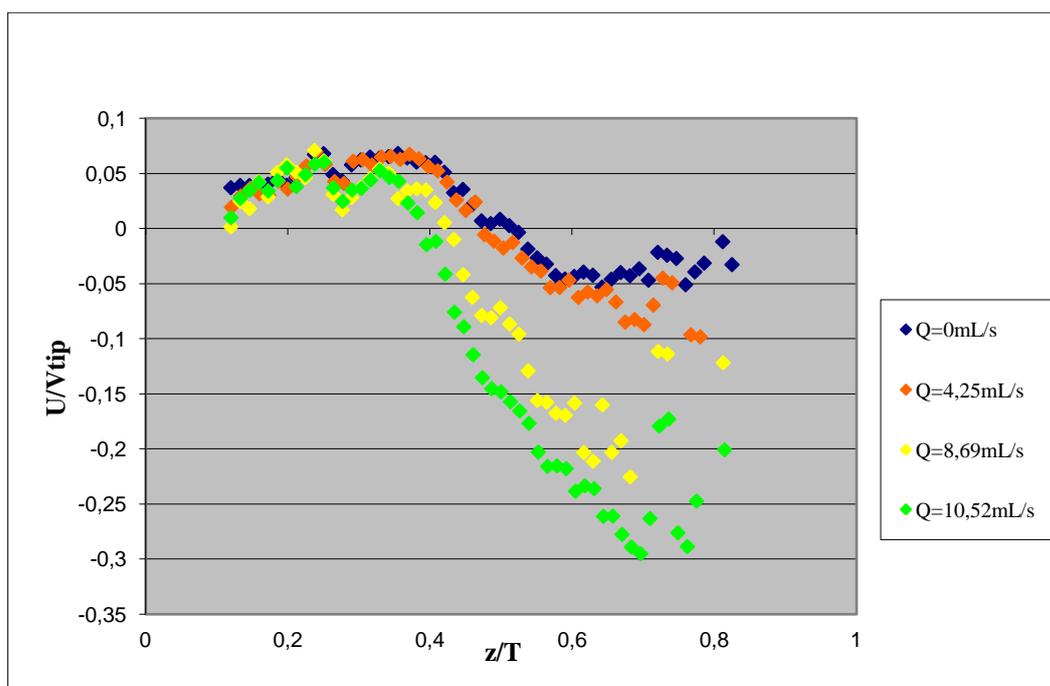


Fig.5.5:Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=50\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Analizzando invece i profili di velocità radiale (fig.5.6) per ciascuna portata si può notare una netta diminuzione del picco V/V_{tip} all' aumentare della portata. Ciò implica una diminuzione della capacità di pompaggio della girante.

La capacità di pompaggio di una girante, come desumibile dall'espressione è definita come:

$$(5.1)$$

dove:

- Q è la capacità di pompaggio;
- N_q è il numero di pompaggio, caratteristico di ciascuna girante e funzione di Re ;
- D indica il diametro della girante;
- N rappresenta il numero di giri della girante.

Le variazioni di velocità assiale e radiale mostrate nelle precedenti figure evidenzia come, in fase di progettazione delle apparecchiature, la presenza o meno di una corrente liquida in ingresso possa, in alcuni casi, essere non trascurabile.

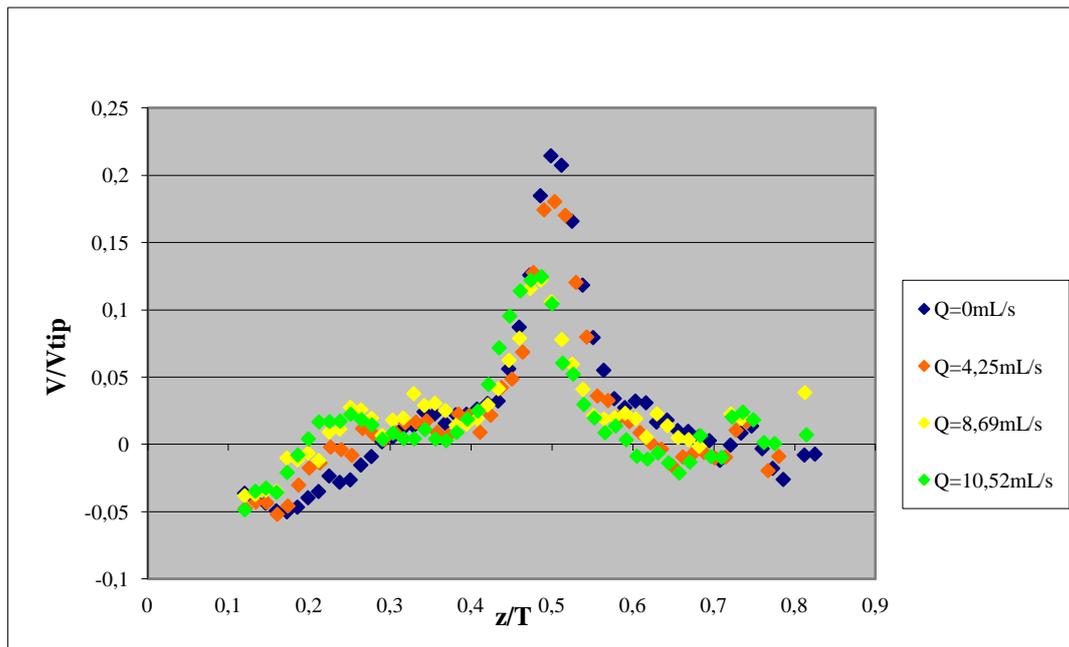


Fig. 5.6 :Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=50\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

5.1.2 Campo di moto a $N=100\text{rpm}$

Terminato lo studio del campo di moto a $N=50\text{rpm}$, si sono ripetute le medesime prove aumentando però il numero di giri dell'albero a $N=100\text{rpm}$.

Impostando la velocità di rotazione dell'albero a $N=100\text{rpm}$, si è notata una diminuzione dell'influenza della corrente di ricircolo sul campo di moto del reattore. Ciò si spiega in questo modo: mentre la potenza che la pompa trasferisce al fluido rimane costante (infatti le portate del getto prese in esame sono le stesse), aumentando il numero di giri dell'albero, la potenza data dal motore al fluido attraverso l'albero della girante aumenta col cubo del numero di giri dell'albero.

Infatti:

(5.2)

dove:

- N_p è il numero di potenza, proprio di ciascuna tipologia di girante e funzione di Re ;
- ρ è la densità del fluido;
- N è il numero di giri della girante;
- D è il diametro della girante.

L'immagine che segue (fig. 5.7), relativa a una velocità di rotazione $N=100\text{rpm}$ e una portata della pompa pari a $Q=0\text{mL/s}$, mostra quale sia il campo di moto del sistema in condizioni non perturbate. L'andamento di $Velocity/V_{tip}$ è, come prevedibile, del tutto analogo a quello registrato a velocità di rotazione dell'albero più basse.

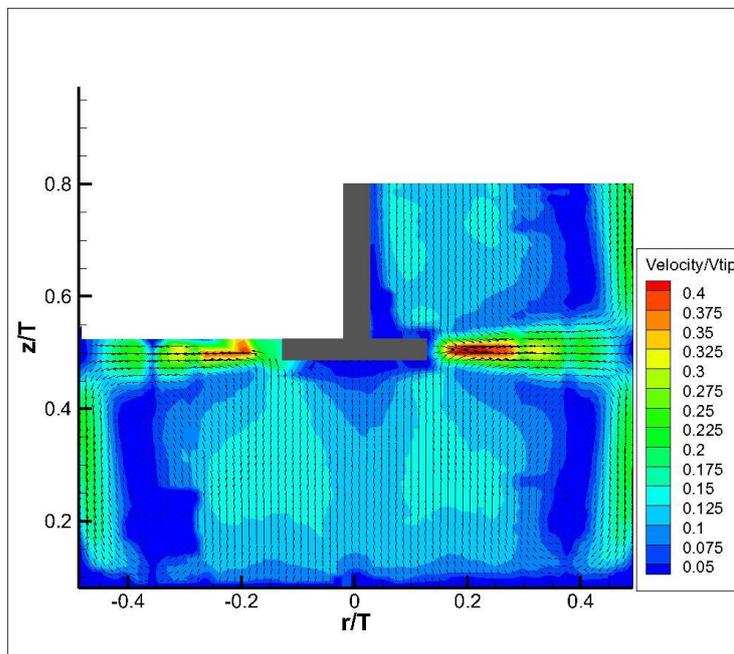


Fig. 5.7:Mappe vettoriale e andamento di $Velocity/V_{tip}$ sul piano del reattore($N=100\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

La fig. 5.8 mostra invece la mappa vettoriale e la relativa variazione di $Velocity/V_{tip}$ alla massima portata del getto ($Q=10,52\text{mL/s}$). La presenza del getto è ancora visibile, ma la sua importanza relativa è molto diminuita. Infatti si può notare come le differenze di campo di moto fra i casi illustrati fra le figure 5.7 e 5.8 siano molto meno marcate di quelle evidenziate nelle figure 5.3 e 5.4. E' da notare come $Velocity/V_{tip}$ in

corrispondenza del getto sia molto più piccola che nei pressi della girante: questo non perché sia diminuita la velocità del getto (che dipende solo dalla portata della pompa) ma perché V_{tip} è raddoppiata rispetto alle misure condotte con $N=50\text{rpm}$.

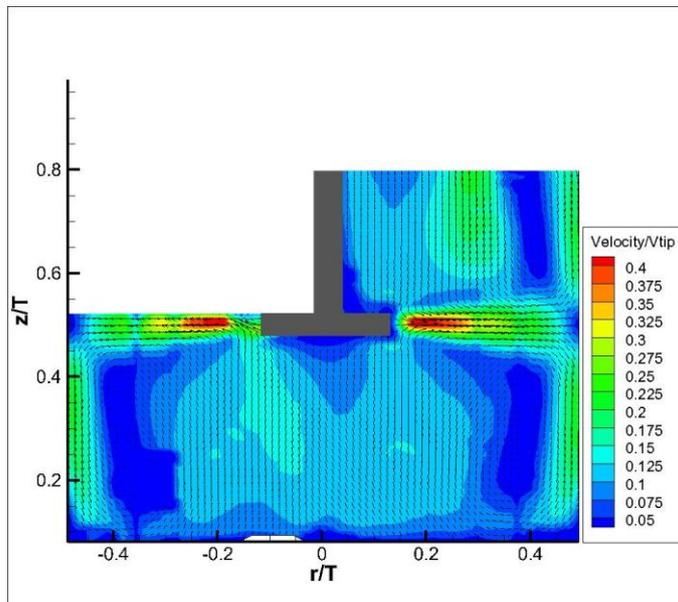


Fig.5.8:Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore($N=100\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Le immagini seguenti (fig.5.9 e fig. 5.10) illustrano le variazioni U/V_{tip} sul piano del reattore. La fig. 5.9 è relativa ad una portata di ricircolo $Q=0\text{mL/s}$, e quindi rappresenta il sistema non perturbato dal getto della pompa.

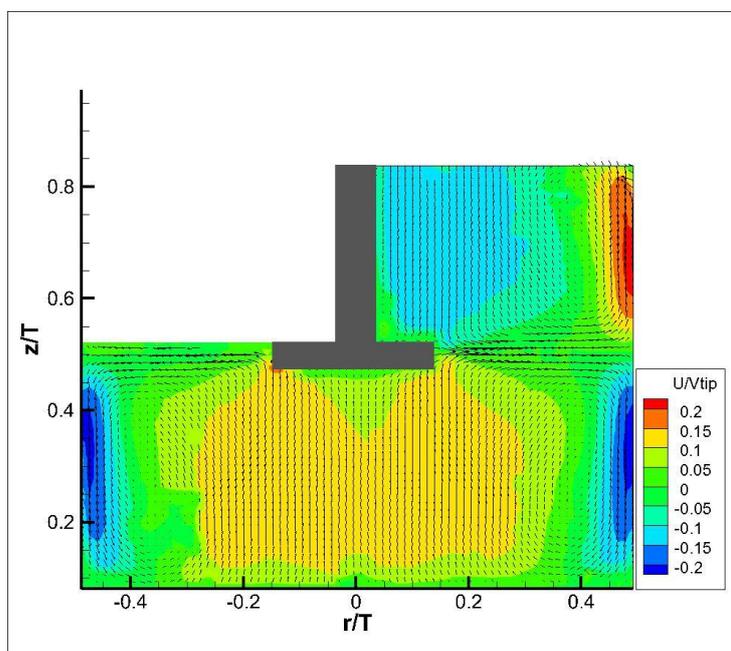


Fig. 5.9:Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore($N=100\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

La fig. 5.10, relativa a un getto della pompa pari a $Q=10,52\text{mL/s}$, mostra invece un andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore molto diverso da quello omologo osservato per $N=50\text{rpm}$. Infatti, nella parte alta del reattore, la zona blu indicante una velocità assiale negativa (in quanto diretta verso il basso) non è molto intensa, segno che il campo di moto medio è essenzialmente indotto dall'agitatore. E' da notare inoltre come la corrente diretta verso l'alto presente sul bordo destro del reattore non sia variata significativamente rispetto alla fig. 5.9. Ciò indica che la girante riesce a far circolare il fluido all'interno del reattore e che il getto della pompa non lo influenza in maniera significativa.

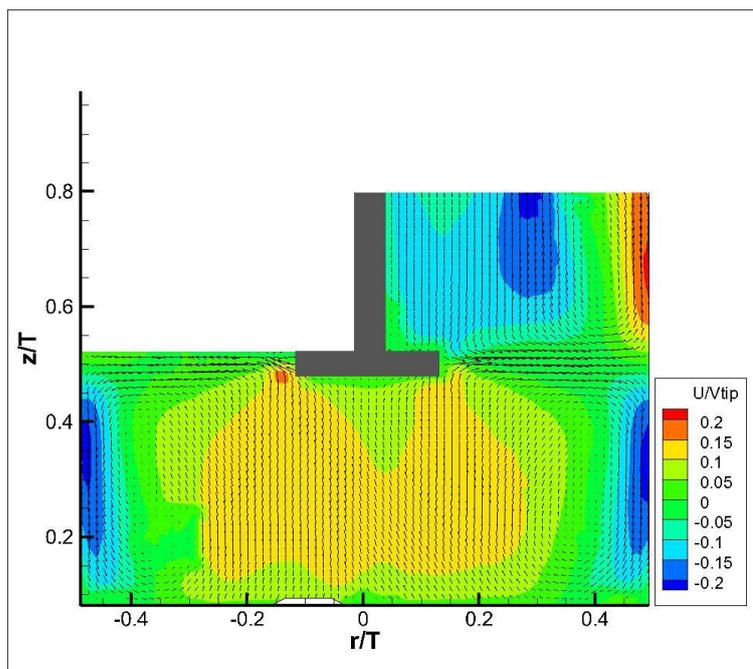


Fig. 5.10: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Vengono ora confrontati gli andamenti di velocità assiale e radiale in corrispondenza dell'entrata del getto (fig. 5.11 e fig. 5.12) per ciascuna delle portate analizzate, mantenendo costante la rotazione dell'albero a $N=100\text{rpm}$.

Per quanto riguarda il profilo della velocità assiale, possiamo notare che la corrente di ricircolo $Q=4,25\text{mL/s}$ non influenza affatto la fluidodinamica del sistema: infatti i due profili di velocità assiale presentano lo stesso andamento sia con la pompa spenta ($Q=0\text{mL/s}$) sia a $Q=4,25\text{mL/s}$. La potenza che la pompa trasferisce al sistema diventa invece di una certa rilevanza alle portate più alte della pompa ($Q=8,69\text{mL/s}$ e

$Q=10,52\text{mL/s}$). Naturalmente maggiore è la portata della pompa, maggiore è l'influenza di questo sul sistema.

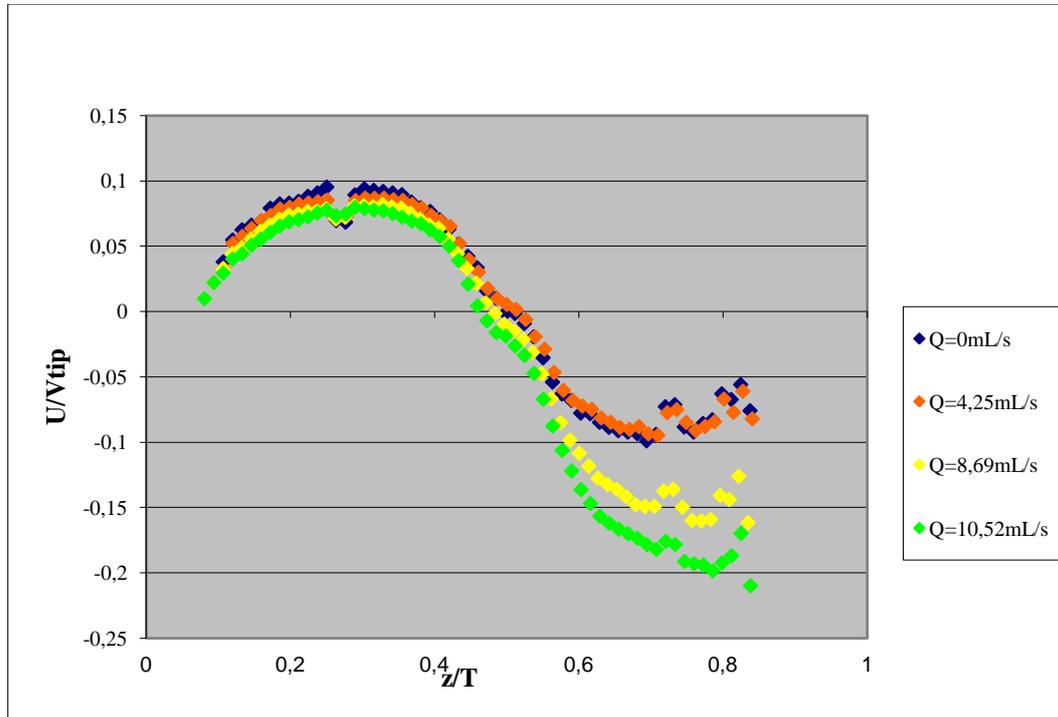


Fig.5.11:Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=100\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Invece, per quanto riguarda l'andamento dei profili di velocità radiale, notiamo come sparisca ogni influenza della corrente di ricircolo (presente invece nelle prove effettuate con $N=50\text{rpm}$): infatti le quattro curve sono praticamente sovrapponibili. Da ciò

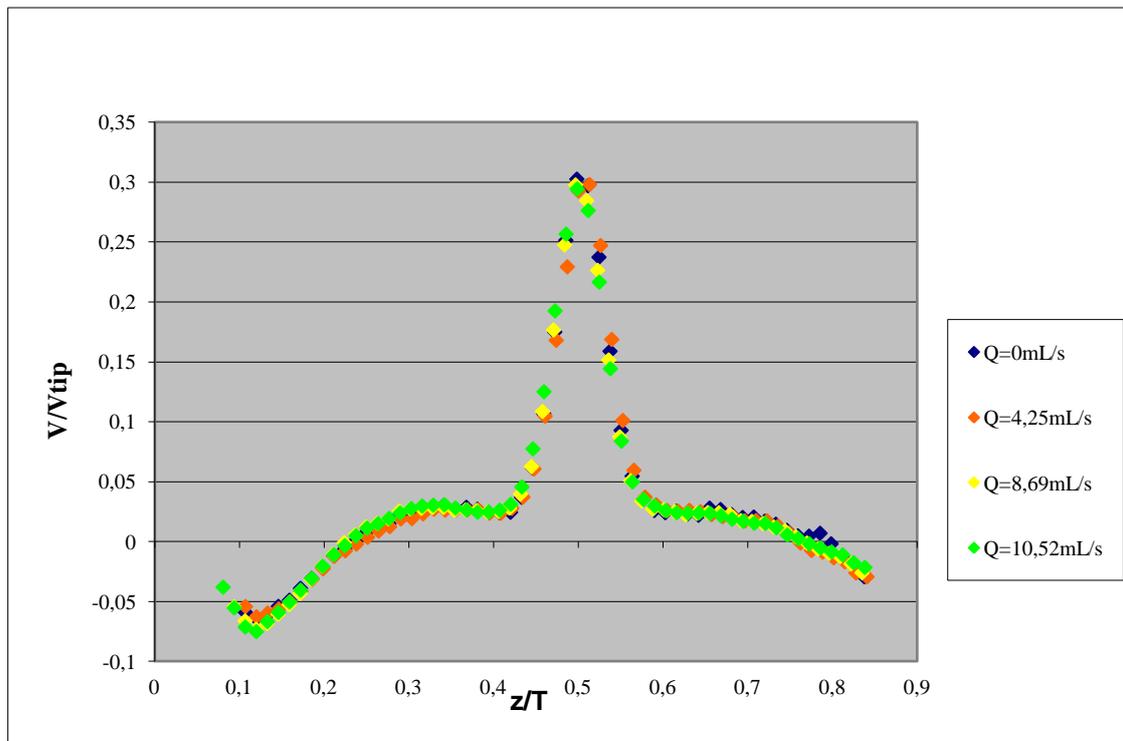


Fig.5.12:Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=100\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

5.1.3 Campo di moto a $N=150\text{rpm}$ e 300rpm

Nel corso del presente lavoro di tesi, si è notato come l'influenza del ricircolo indotto dalla pompa aumenti all'aumentare della portata del getto e diminuisca all'aumentare del numero di giri dell'albero. Ciò comporta, per le acquisizioni condotte a $N=150\text{rpm}$ e 300rpm , una scarsa influenza del getto: questa si registra, per $N=150\text{rpm}$, alla massima portata della pompa, mentre è del tutto assente quando $N=300\text{rpm}$.

Seguono le fig. 5.13 e 5.14, relative rispettivamente a una velocità di rotazione $N=150\text{rpm}$ e l'altra a $N=300\text{rpm}$: in ambedue la portata del ricircolo è $Q=10,52\text{mL/s}$. Le immagini mostrano come varia il rapporto $\text{Velocity}/V_{\text{tip}}$ sul piano del reattore.

Mentre nella fig. 5.13, relativa a una velocità di rotazione di $N=150\text{rpm}$, si può intravedere ancora la presenza del getto indicata dalla zona verde chiaro in alto a destra, nella fig. 5.14 questa traccia del getto sparisce quasi del tutto. Ciò indica che ormai il getto è del tutto ininfluenza per la fluidodinamica del sistema.

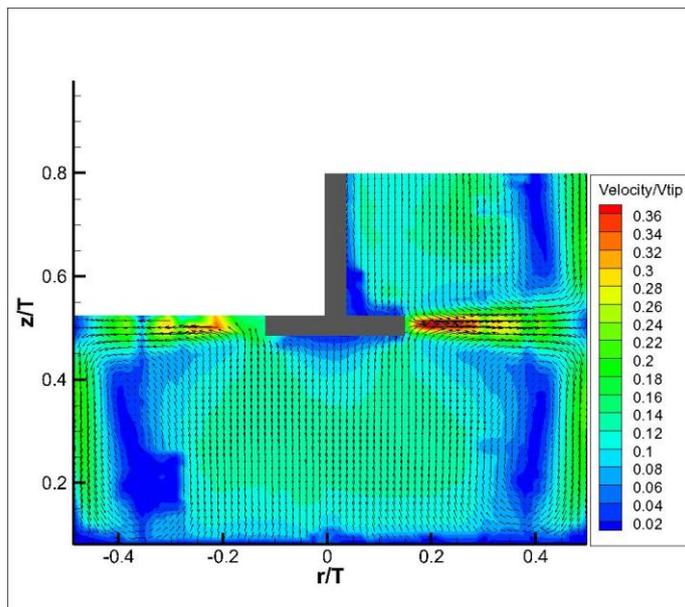


Fig. 5.13:Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore (N=150rpm, Q=10,52mL/s).

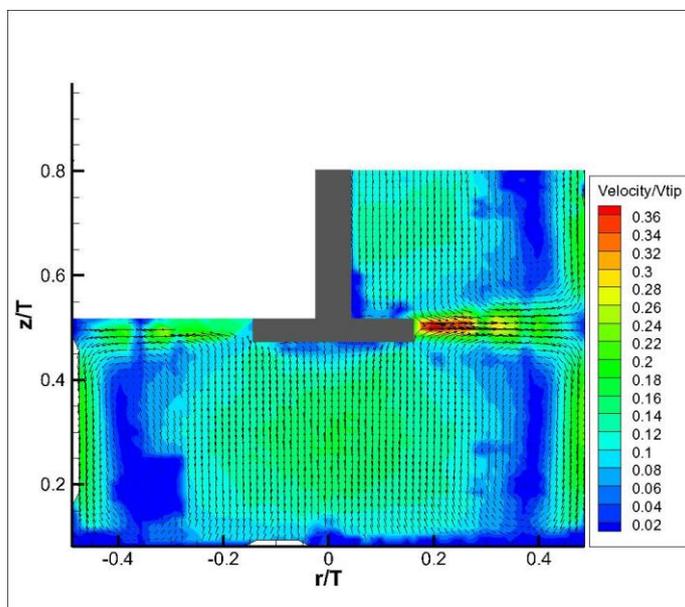


Fig. 5.14:Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore (N=300rpm, Q=10,52mL/s).

Le fig. 5.15 e 5.16 invece rappresentano le mappe vettoriali e gli andamenti di U/V_{tip} rispettivamente a $N=150\text{rpm}$ e $N=300\text{rpm}$, entrambi con una portata del getto di $Q=10,52\text{mL/s}$. Queste figure confermano ciò che è stato illustrato precedentemente: ovvero che ad alti numeri di giri il getto della pompa non riesce a trasferire una potenza tale al sistema da modificarne la fluidodinamica: solo per $N=150\text{rpm}$ si può ancora

notare la presenza del getto (rappresentata dalla zona azzurra in alto a destra, corrispondente a una velocità assiale diretta verso il basso).

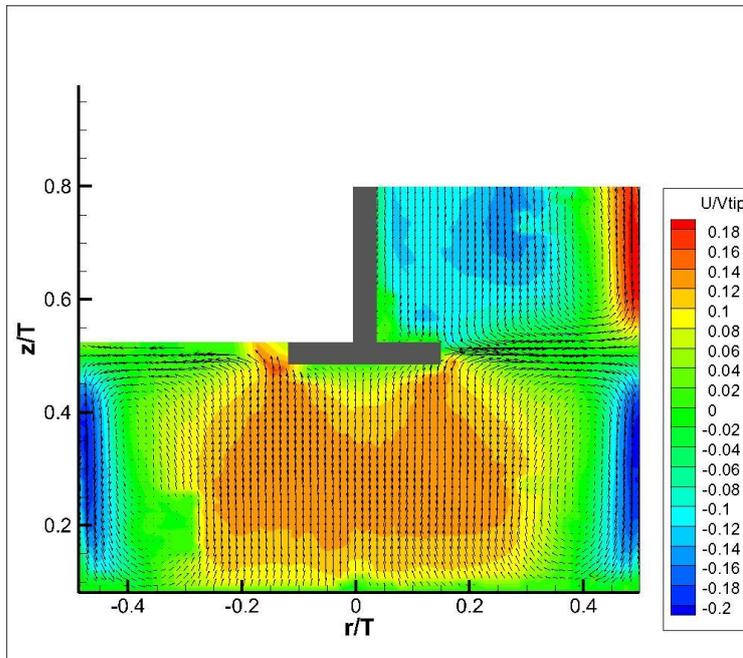


Fig. 5.15: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=150\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

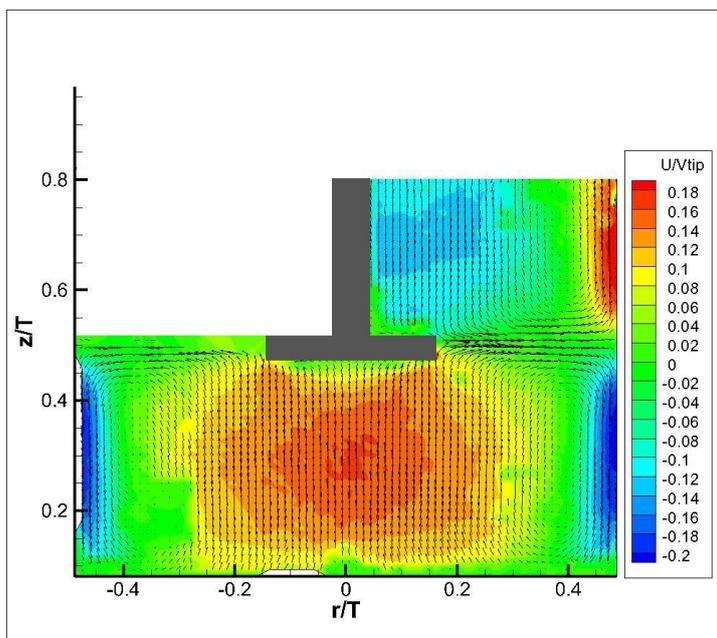


Fig. 5.16: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=300\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Seguono ora gli andamenti dei profili di velocità assiale e radiale in corrispondenza dell'imbocco del getto della pompa relativi ad una velocità di agitazione di $N=150\text{rpm}$ (fig. 5.15 e fig. 5.16).

I grafici non fanno che confermare ciò che le immagini già suggerivano: ovvero che a $N=150\text{rpm}$, il getto della pompa non è più in grado di trasferire potenza al fluido per modificarne la fluidodinamica. Una piccola variazione del profilo di velocità assiale è riscontrabile solo a $Q=10,52\text{mL/s}$.

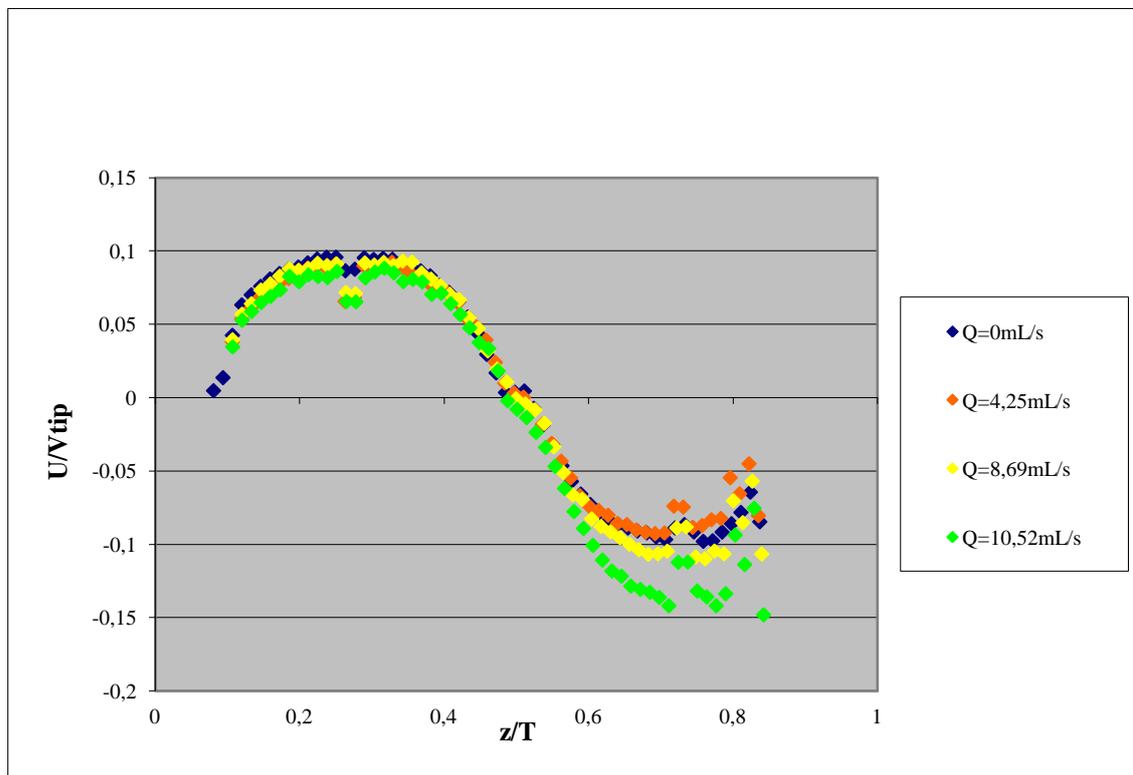


Fig. 5.17: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=150\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

I profili di velocità radiale invece mostrano come il loro andamento sia del tutto indipendente dalla portata del getto.

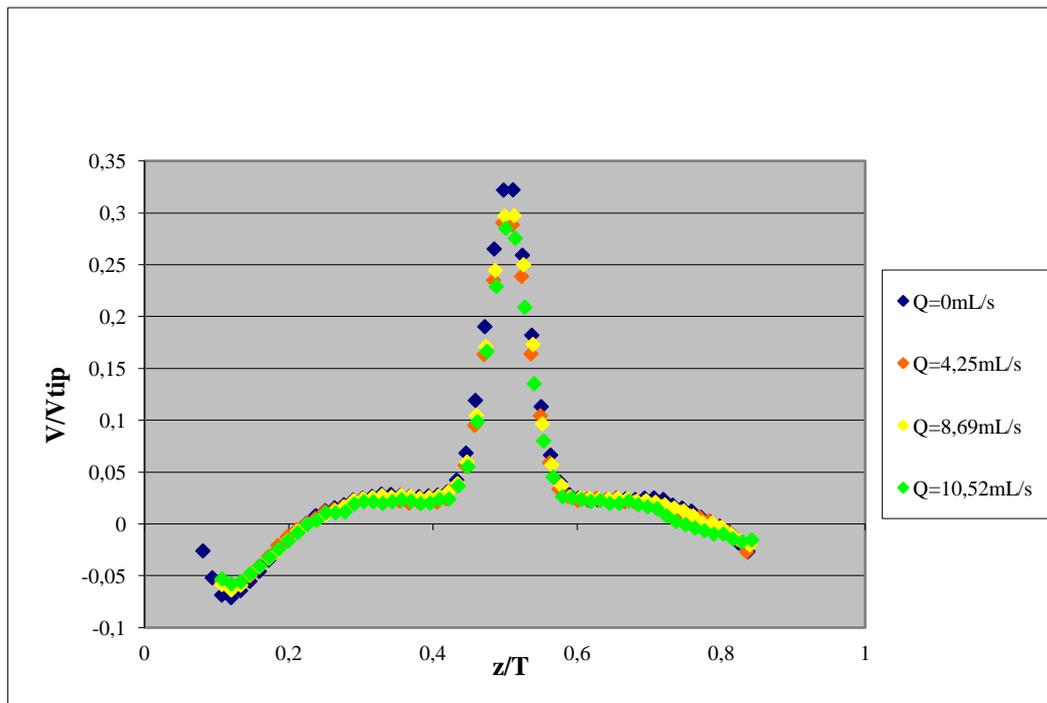


Fig. 5.18: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=150\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Gli andamenti dei profili di velocità assiale e radiale ottenuti con $N=300\text{rpm}$ (fig. 5.19 e 5.20) mostrano altresì come ad alto numero di giri la presenza o meno del getto sia del tutto indifferente per la fluidodinamica del sistema.

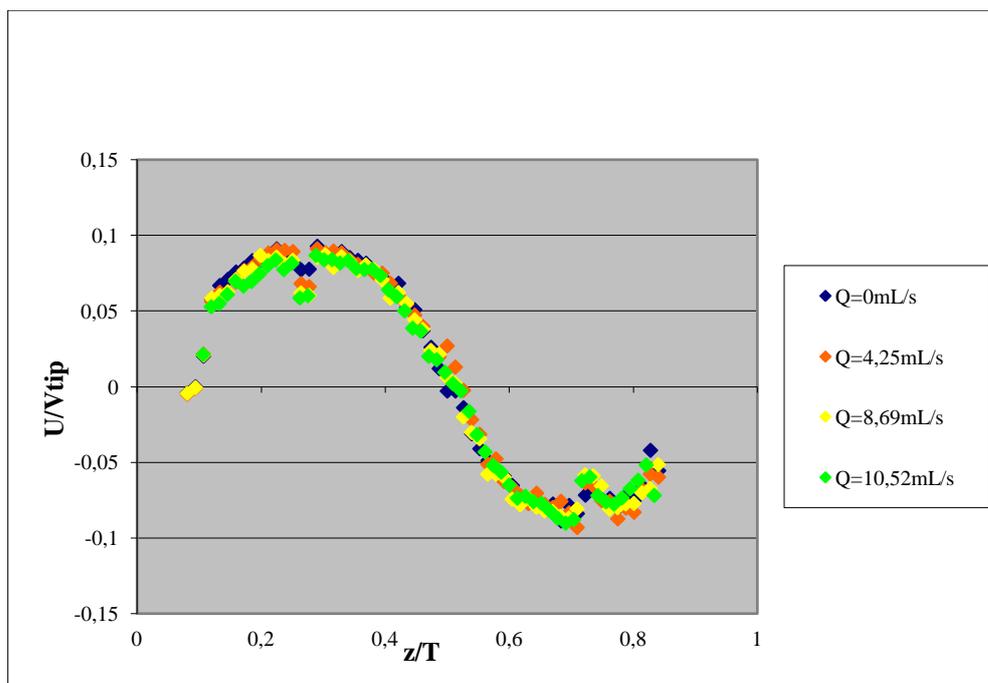


Fig. 5.19: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=300\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

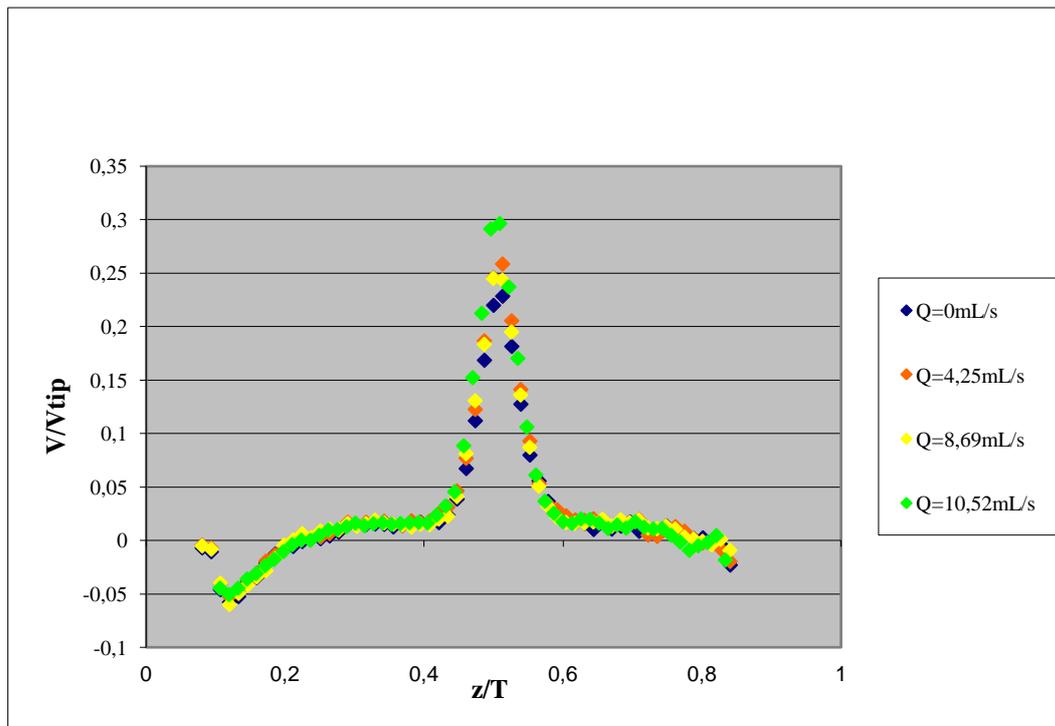


Fig. 5.20: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=300\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

5.2 Studio del campo di moto in un reattore con ricircolo: prove con turbina PBT- up pumping

Il passo successivo dell'analisi sperimentale ha avuto come obiettivo quello di determinare il campo di moto del reattore montando questa volta un diverso tipo di girante. Il reattore è stato infatti equipaggiato con una girante PBT- up pumping, una girante mista che ha come caratteristica principale quella di pompare il fluido verso l'alto. Ciò ha determinato un campo di moto totalmente differente da quello caratteristico della turbina Rushton anche se, come vedremo, l'influenza del getto della pompa sul sistema seguirà gli andamenti già visti in precedenza.

5.2.1 Campo di moto a $N=50\text{rpm}$

Il primo passo in questa seconda serie di misure è stato, analogamente alla prima serie, quello di impostare il numero di giri dell'albero a $N=50\text{rpm}$, e si è aumentata la portata del getto da $Q=0\text{mL/s}$ fino alla portata massima di $Q=10,52\text{mL/s}$.

Essendo la velocità di agitazione piuttosto bassa, si è visto come il campo di moto del sistema sia fortemente influenzato dalla portata del getto. Ciò è particolarmente evidente

nelle immagini che seguono: queste illustrano la mappa vettoriale del sistema e la variazione di Velocity/ V_{tip} in tutto il piano del reattore preso in esame.

La fig. 5.21 illustra il campo di moto indotto da una girante di tipo PBT- up pumping, in assenza di perturbazione dovuta al getto della pompa.

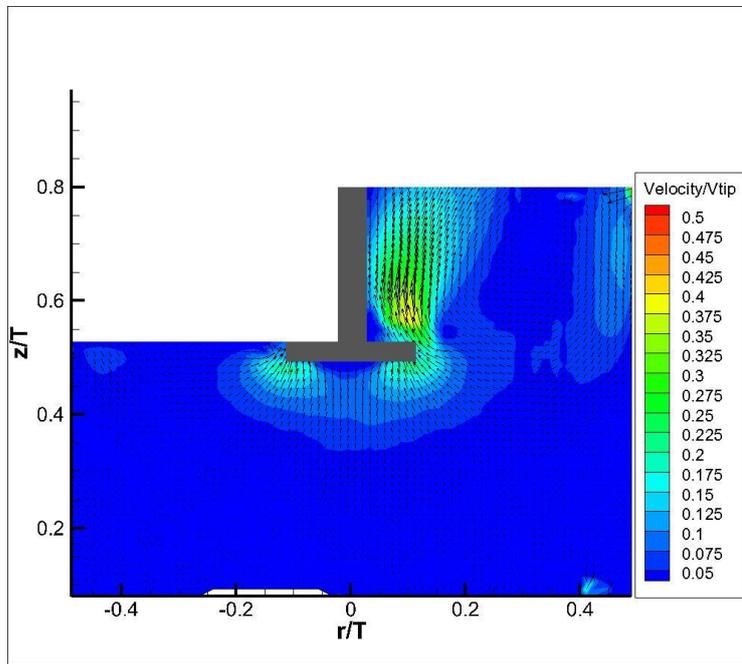


Fig. 5.21: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/ V_{tip} sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

Nella fig. 5.22, relativa a una velocità di rotazione pari a $N=50\text{rpm}$ con una portata del getto $Q=10,52\text{mL/s}$, si può chiaramente osservare che il getto entra dall'alto, viene spinto dalla girante verso la parete del reattore e infine prosegue la sua corsa fino ad interessare la zona posta sul fondo al reattore. Da notare come la velocità di ingresso del getto sia maggiore della velocità del fluido nei pressi della girante.

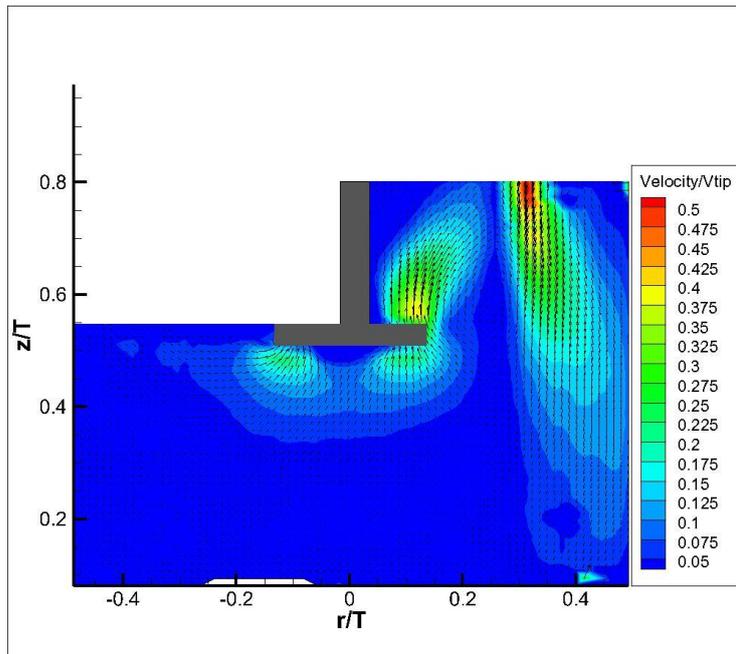


Fig. 5.22: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Particolarmente significative sono anche le immagini che illustrano la mappa vettoriale del sistema e l'andamento U/V_{tip} nel piano del reattore analizzato. Si può ben vedere, nell'immagine relativa a $Q=10,52\text{mL/s}$ (fig. 5.24), la presenza del getto, che risulta essere assente nell'immagine relativa a $Q=0\text{mL/s}$ (fig. 5.23).

L'andamento di U/V_{tip} registrato senza getto della pompa (fig. 5.23), rende chiaro perché la girante in questione sia denominata "up-pumping". Infatti possiamo vedere come i valori di U/V_{tip} sono positivi praticamente su tutto il piano del reattore (indicativo del fatto che la girante spinge il fluido verso l'alto), mentre l'unica zona in cui il fluido è spinto verso il basso è la corrente proveniente dalla pompa e diretta verso il fondo del reattore, presente sull'estremità destra del reattore. Praticamente la girante "aspira" il fluido dal fondo del reattore, lo pompa verso l'alto e una volta arrivato sul coperchio del reattore, il fluido è costretto a scendere lungo le pareti.

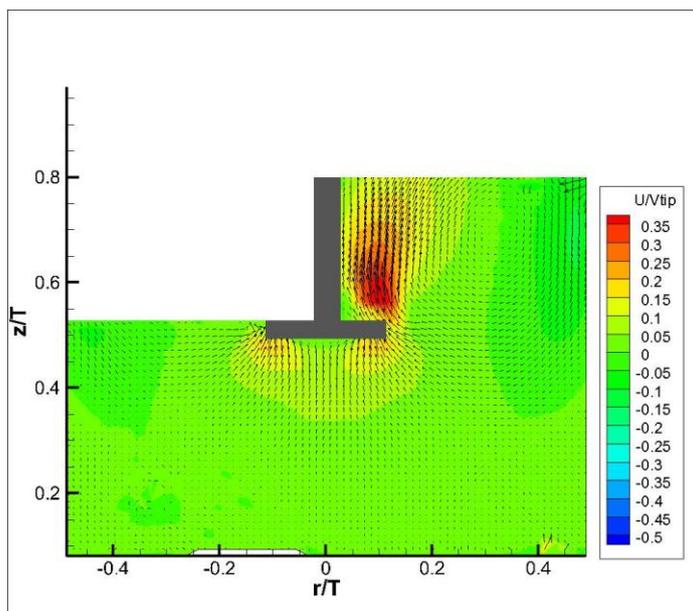


Fig. 5.23: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

L'immagine seguente illustra come cambia il campo di moto quando il getto della pompa ha una portata $Q=10,52\text{mL/s}$. Sono presenti notevoli differenze rispetto all'immagine ottenuta in assenza del getto: innanzitutto in quest'ultima immagine la scia blu presente sulla destra indica chiaramente la presenza del getto. Dobbiamo anche osservare come in valore assoluto la velocità del liquido ricircolato sia maggiore della velocità del fluido nei pressi della girante.

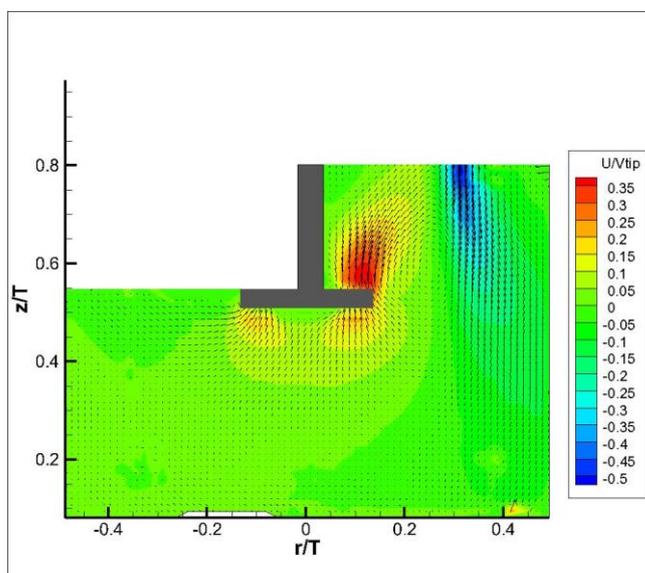


Fig. 5.24: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

I grafici sottostanti (fig. 5.25 e 5.26) mostrano invece rispettivamente gli andamenti dei profili di U/V_{tip} e V/V_{tip} in corrispondenza dell'entrata del getto della pompa. Anche

qui si può notare come sia molto decisa l'influenza della corrente di ricircolo sul campo di moto generale.

In particolar modo gli andamenti U/V_{tip} variano in maniera significativa in funzione della portata del getto. Possiamo notare come, aumentando il getto della pompa, nella parte alta del reattore ($0,5 < z < 0,8$) i valori di U/V_{tip} diventano sempre più negativi in quanto prevale la corrente di ricircolo diretta verso il basso. Si deve anche notare come, aumentando la portata della pompa, il punto in cui U/V_{tip} tende a zero si sposta da $z/T = 0,8$ (nel caso di $Q = 0 \text{ mL/s}$) a $z/T = 0,2$ (nel caso di $Q = 10,52 \text{ mL/s}$): Ciò vuol dire che quando la portata è massima il getto arriva indisturbato praticamente fino al fondo del reattore.

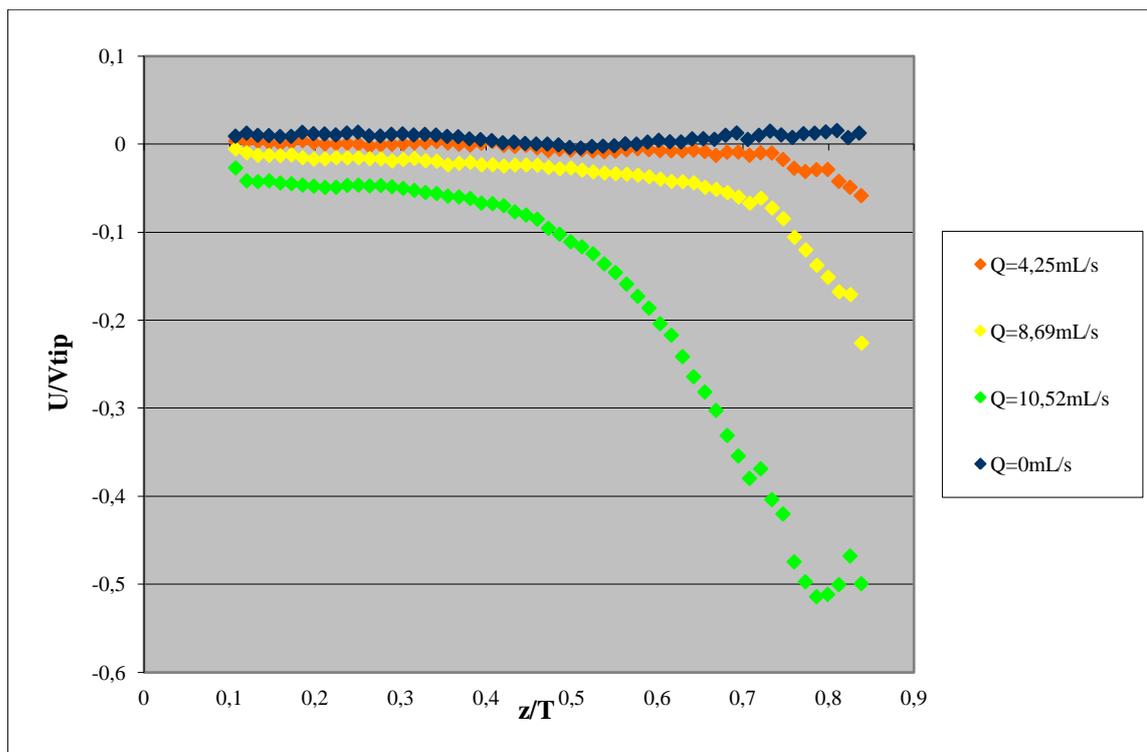


Fig. 5.25: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T = 0,31$ e $N = 50 \text{ rpm}$, per ciascuna delle portate esaminate.

Per quanto riguarda invece gli andamenti dei profili di V/V_{tip} possiamo notare che, come nel caso della turbina Rushton, l'influenza del getto della pompa sia tutto sommato limitato alla portata $Q = 10,52 \text{ mL/s}$ e comporta sostanzialmente una riduzione del valore di V/V_{tip} a $z/T = 0,5$, ovvero proprio in corrispondenza della girante.

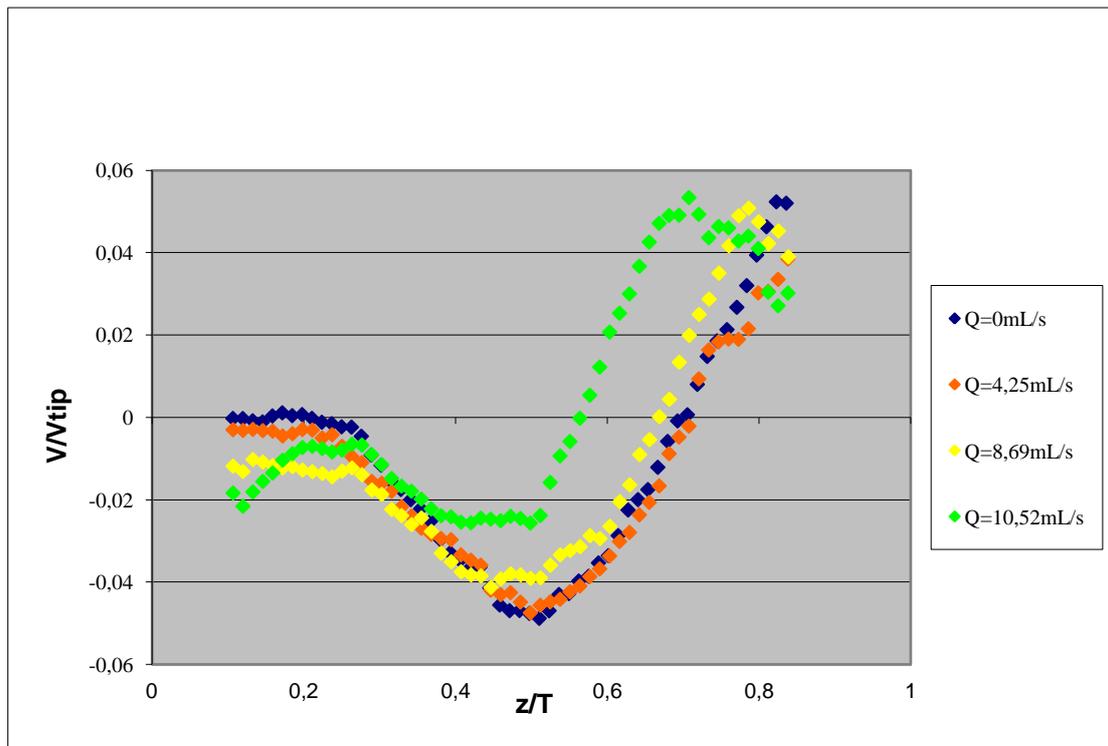


Fig. 5.26: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=50$ rpm per ciascuna delle portate esaminate.

5.2.2 Campo di moto a $N=100$ rpm

Terminato lo studio del campo di moto a $N=50$ rpm, si sono ripetute le medesime prove aumentando però il numero di giri dell'albero a $N=100$ rpm.

Impostando la velocità di rotazione dell'albero a $N=100$ rpm, analogamente a quanto accaduto per la girante Rushton, si è notata una diminuzione dell'influenza della corrente di ricircolo sul campo di moto del reattore.

Ciò si può notare nelle figure 5.27 e 5.28 che illustrano la mappa vettoriale e l'andamento di $Velocity/V_{tip}$ sul piano del reattore rispettivamente a $Q=0$ mL/s e $Q=10,52$ mL/s.

Dal confronto delle due immagini emerge, analogamente a quanto osservato per una girante Rushton, che l'influenza del getto sulla fluidodinamica del reattore è notevolmente diminuita rispetto al caso di $N=50$ rpm.

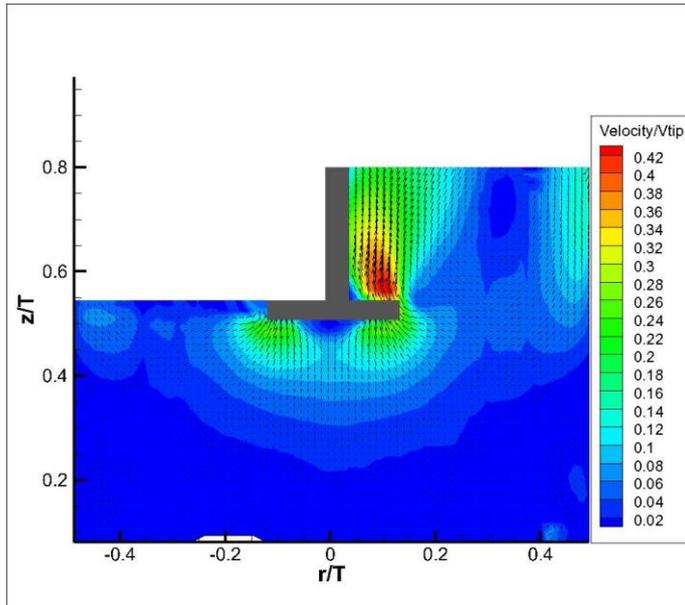


Fig. 5.27: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$)

Nella fig. 5.28, relativa ad una portata del getto $Q=10,52\text{mL/s}$, si può notare come il getto non riesca più a raggiungere indisturbato il fondo del reattore (come invece accadeva con $N=50\text{rpm}$) ma venga intercettato dalla corrente proveniente dalla girante e spostato dunque verso la parete del reattore. Emerge inoltre come la velocità del getto per queste condizioni operative è molto minore della velocità del fluido vicino la girante: ciò naturalmente implica una diminuzione dell'influenza del getto sul campo di moto nel reattore.

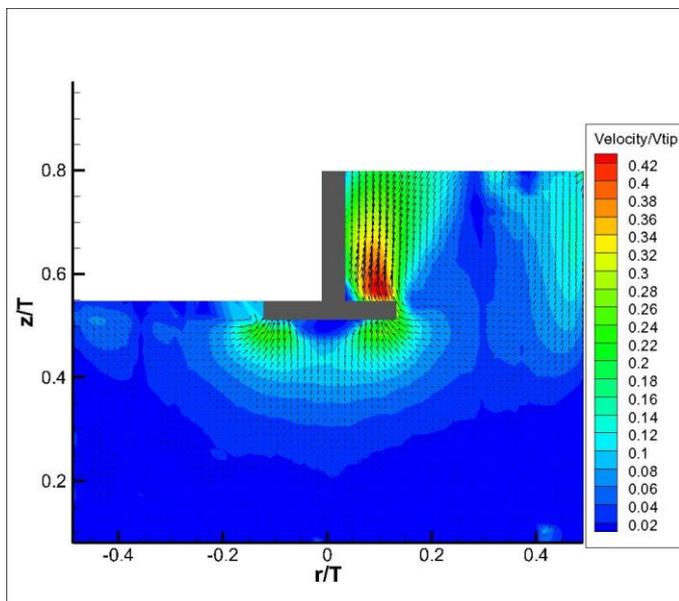


Fig. 5.28: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Seguono ora le figure 5.29 e 5.30 che illustrano rispettivamente gli andamenti di U/V_{tip} sul piano del reattore con $Q=0\text{mL/s}$ e $Q=10,52\text{mL/s}$. Anche qui si nota una diminuzione dell'importanza del getto sul comportamento fluidodinamico.

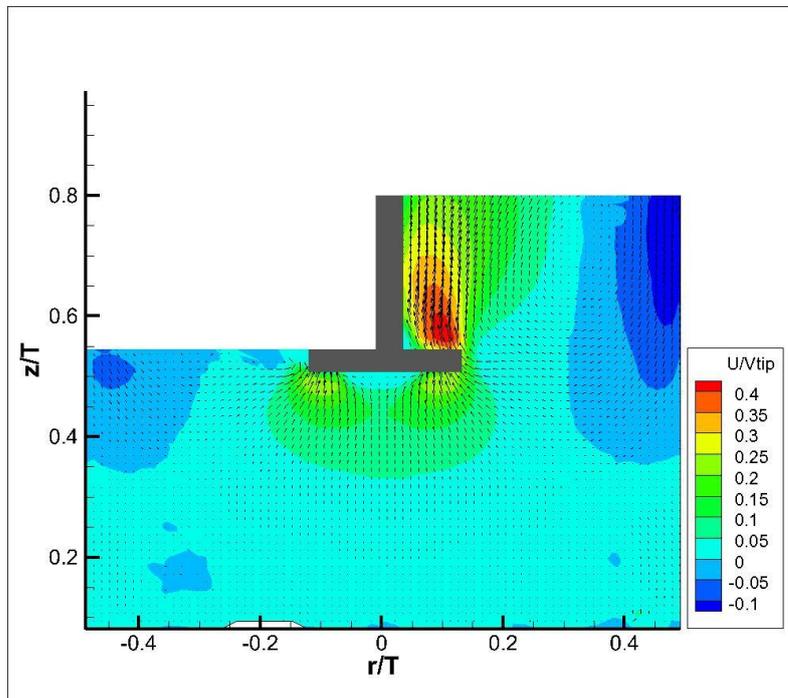


Fig. 5.29:Mappe vettoriale e andamenti di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

La mappa vettoriale e l'andamento di U/V_{tip} registrato con una portata del getto $Q=10,52\text{mL/s}$ (fig. 5.30) conferma quanto osservato precedentemente. Dall'immagine possiamo notare come nella parte del reattore corrispondente all'entrata del getto siano presenti due correnti dirette verso il basso: una di dimensioni minori che rappresenta appunto il getto in entrata, e una di dimensioni maggiori che rappresenta la corrente originata dal moto dell'agitatore e diretta verso il basso. Osservando l'immagine si evince come il getto appena entrato confluisca abbastanza rapidamente nella corrente diretta verso il basso proveniente dalla girante. Si nota come la velocità del getto sia paragonabile alla velocità fluido spostato dalla girante solo nelle immediate vicinanze dell'entrata.

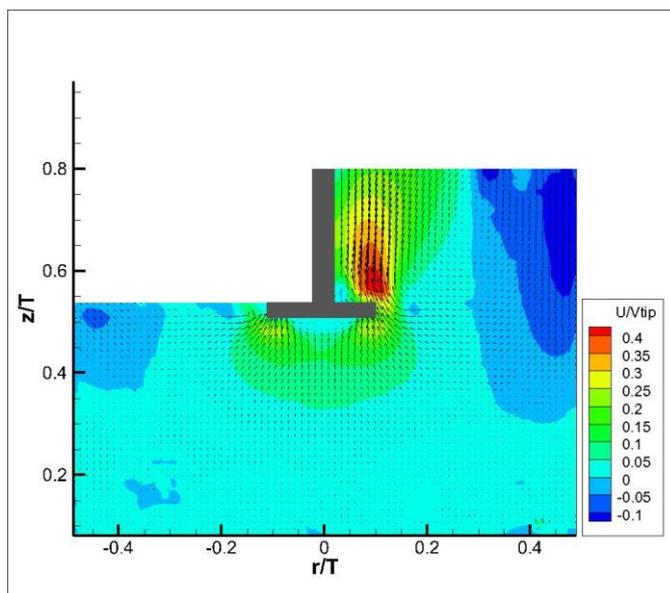


Fig. 5.30: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Le considerazioni tratte dall'osservazione delle figure precedenti trova riscontro negli andamenti dei profili di velocità assiale e radiale registrati in corrispondenza dell'imbocco del getto (fig. 5.31 e fig. 5.32). Dal grafico sottostante emerge come una portata del getto $Q=4,25\text{mL/s}$ non influisca in alcun modo sul profilo di U/V_{tip} . Invece aumentando la portata del getto si riscontrano variazioni consistenti (ma molto meno significative di quelle riscontrate con una velocità di rotazione $N=50\text{rpm}$) dei profili di U/V_{tip}

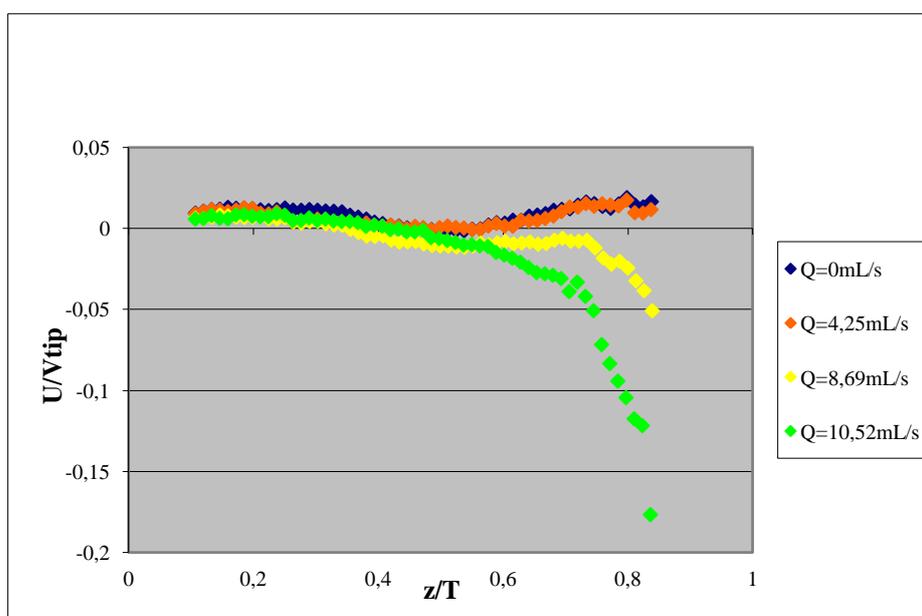


Fig. 5.31: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=100\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Osservando invece gli andamenti dei profili di velocità radiale (fig. 5.32) possiamo notare che il getto della pompa ha un effetto trascurabile sulla fluidodinamica del sistema.

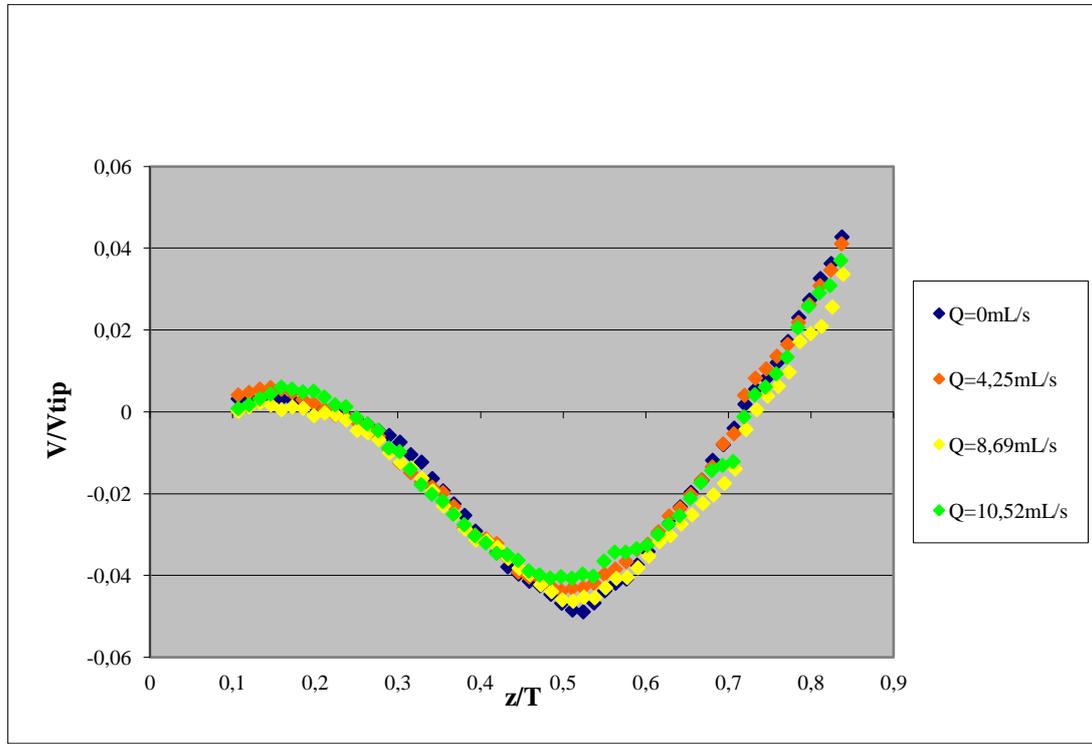


Fig. 5.32: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=100\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

5.2.3 Campo di moto a $N=150\text{rpm}$ e 300rpm

Durante lo studio del campo di moto del reattore equipaggiato con una girante PBT- up pumping si è notato, analogamente a quanto riscontrato nella fase di studio con la girante Rushton, come l'influenza del ricircolo indotto dalla pompa aumenti all'aumentare della portata del getto e diminuisca all'aumentare del numero di giri dell'albero.

Seguono le fig. 5.33 e 5.34, relative rispettivamente a una velocità di rotazione $N=150\text{rpm}$ e l'altra a $N=300\text{rpm}$: in ambedue la portata del ricircolo è $Q=10,52\text{mL/s}$. Le immagini mostrano come varia il rapporto $Velocity/V_{tip}$ sul piano del reattore: è importante notare come l'entrata del getto sia ormai del tutto indistinguibile sia a velocità di rotazione $N=150\text{rpm}$ sia a $N=300\text{rpm}$.

In realtà un'analisi approfondita dei campi di moto mostra che per velocità di rotazione $N=300\text{rpm}$ non si registra alcuna variazione del profilo di U/V_{tip} , mentre quando la

velocità è $N=150\text{rpm}$ il profilo di velocità assiale relativo ad una portata $Q=10,52\text{mL/s}$ mostra una residuale influenza del getto.

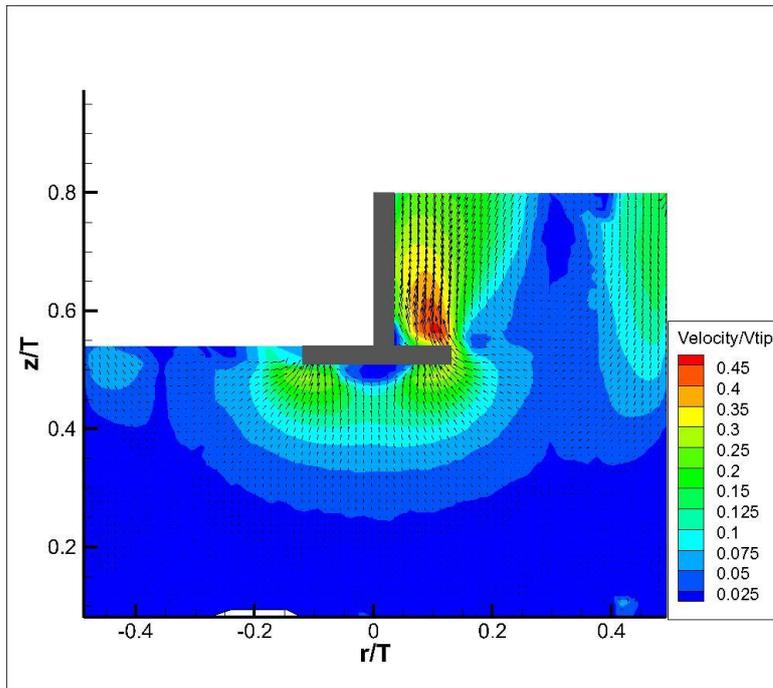


Fig. 5.33: Mappa vettoriale e andamento di $\text{Velocity}/V_{\text{tip}}$ sul piano del reattore ($N=150\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

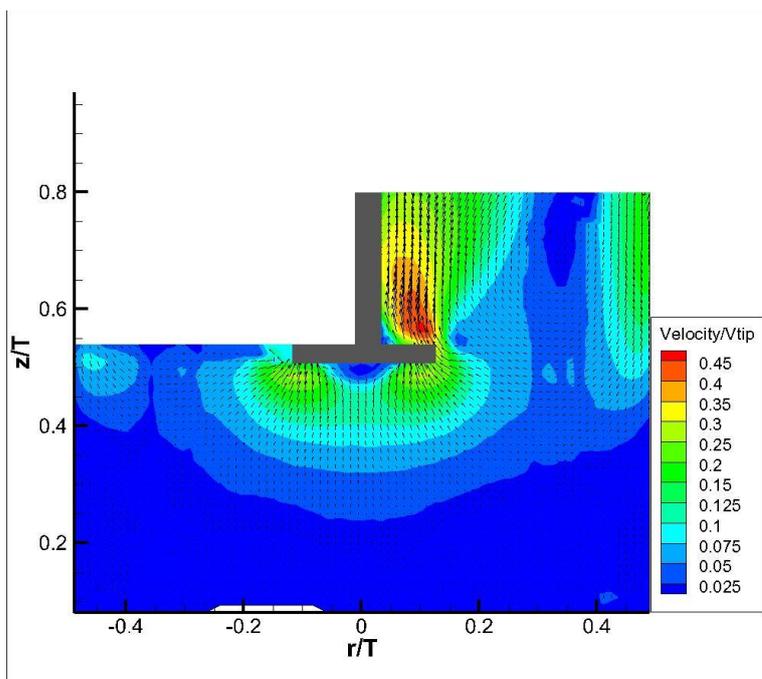


Fig. 5.34: Mappa vettoriale e andamento di $\text{Velocity}/V_{\text{tip}}$ sul piano del reattore ($N=300\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Le immagini 5.35 e 5.36 illustrano la mappa vettoriale e il profilo U/V_{tip} su tutto il piano del reattore rispettivamente a velocità di rotazione $N=150\text{rpm}$ e $N=300\text{rpm}$, entrambe con portata del getto della pompa $Q=10,52\text{mL/s}$.

Naturalmente anche in queste immagini non è più possibile riscontrare la presenza del getto, in quanto il campo di moto è esclusivamente influenzato dal moto della girante.

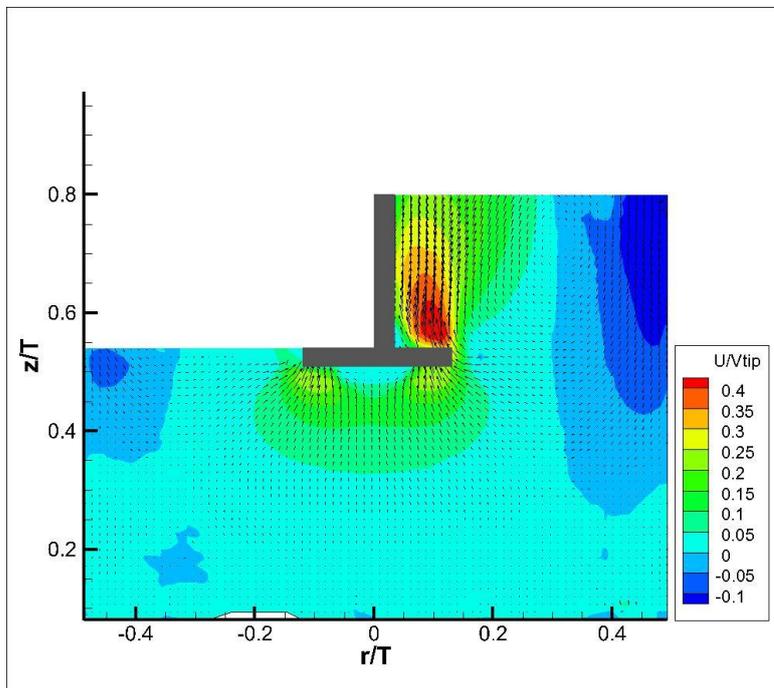


Fig. 5.35: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=150\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

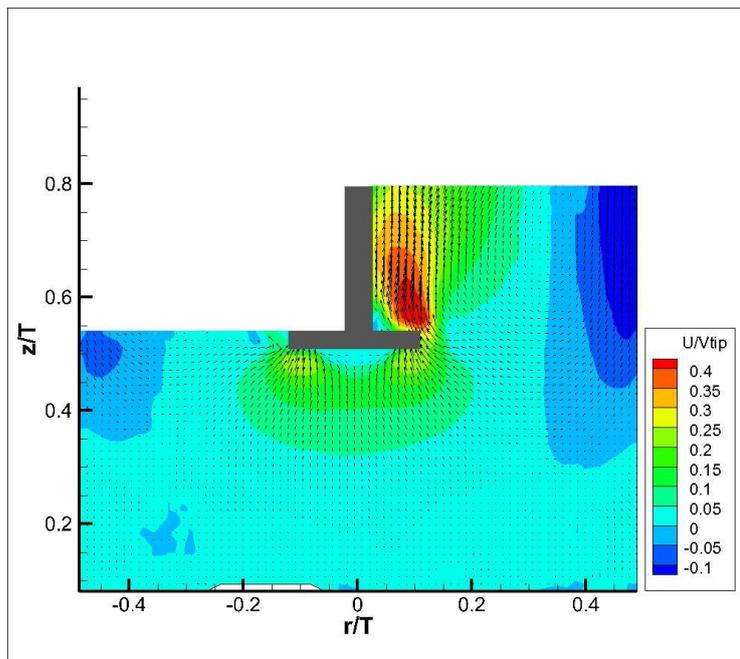


Fig. 5.36: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=300\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Verranno ora illustrati gli andamenti dei profili di velocità assiale e radiale in corrispondenza dell'imbocco del getto, con velocità di rotazione della girante $N=150\text{rpm}$ per ciascuna portata esaminata (fig. 5.37 e fig. 5.38).

Gli andamenti dei profili di velocità assiale indicano un'influenza del getto limitata alle portate $Q=8,69\text{mL/s}$ e, in misura maggiore, alla portata $Q=10,52\text{mL/s}$. È da notare come non solo in valore assoluto la variazione di U/V_{tip} rispetto al profilo mostrato per $Q=0\text{mL/s}$ sia molto piccola, ma anche che l'influenza del getto è limitata alla parte superiore del reattore.

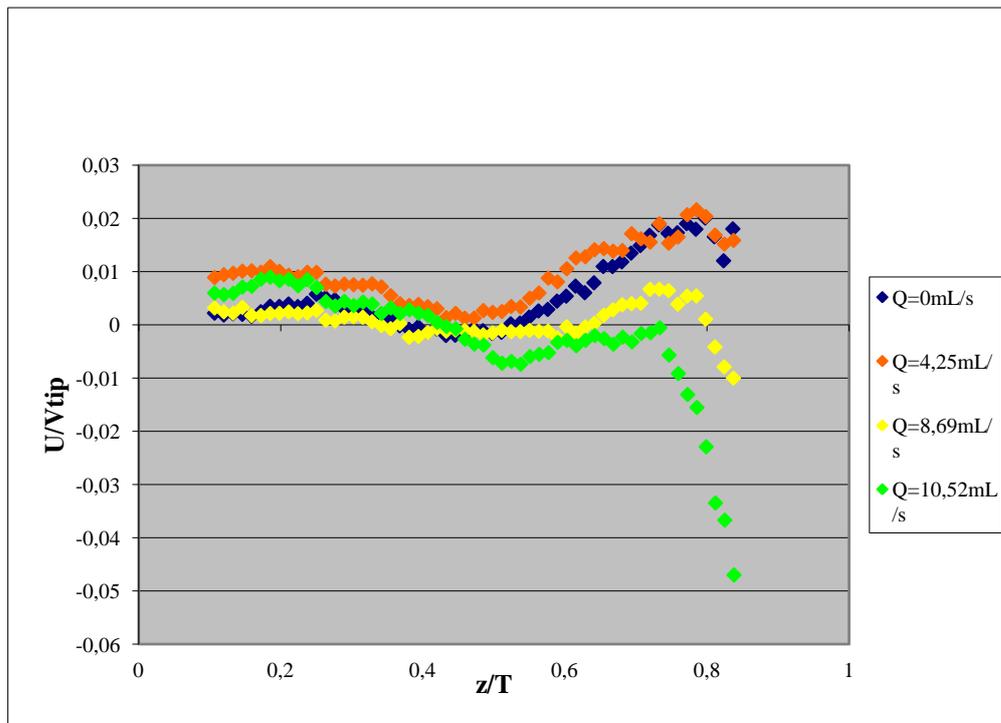


Fig. 5.37: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=150\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Analogamente a quanto visto in precedenza, gli andamenti dei profili di velocità radiale non sembrano essere in alcun modo influenzati dalla presenza del getto.

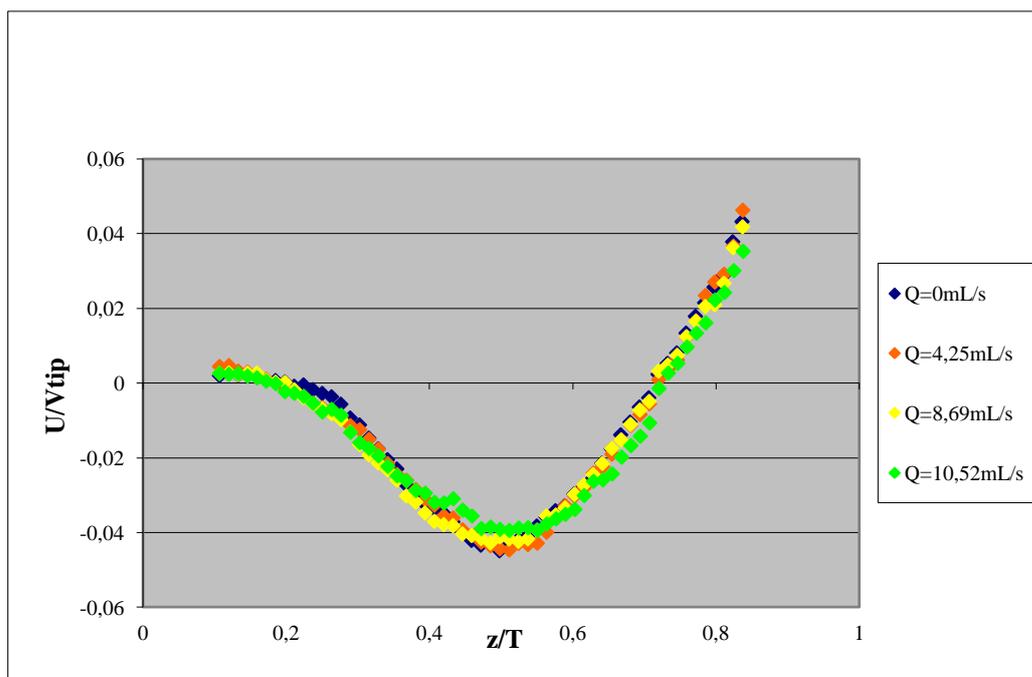


Fig. 5.38: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=150\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Seguono ora le immagini relative agli andamenti dei profili di velocità assiale e radiale in corrispondenza dell'imbuco del getto (rispettivamente fig. 5.39 e 5.40), acquisite con una velocità di rotazione dell'albero pari a $N=300\text{rpm}$.

I grafici confermano che, ad alto numero di giri, il getto della pompa non è più in grado di influenzare la fluidodinamica del sistema: sia i profili di velocità assiale che quelli di velocità radiale presentano, per le diverse portate analizzate, andamenti praticamente sovrapponibili.

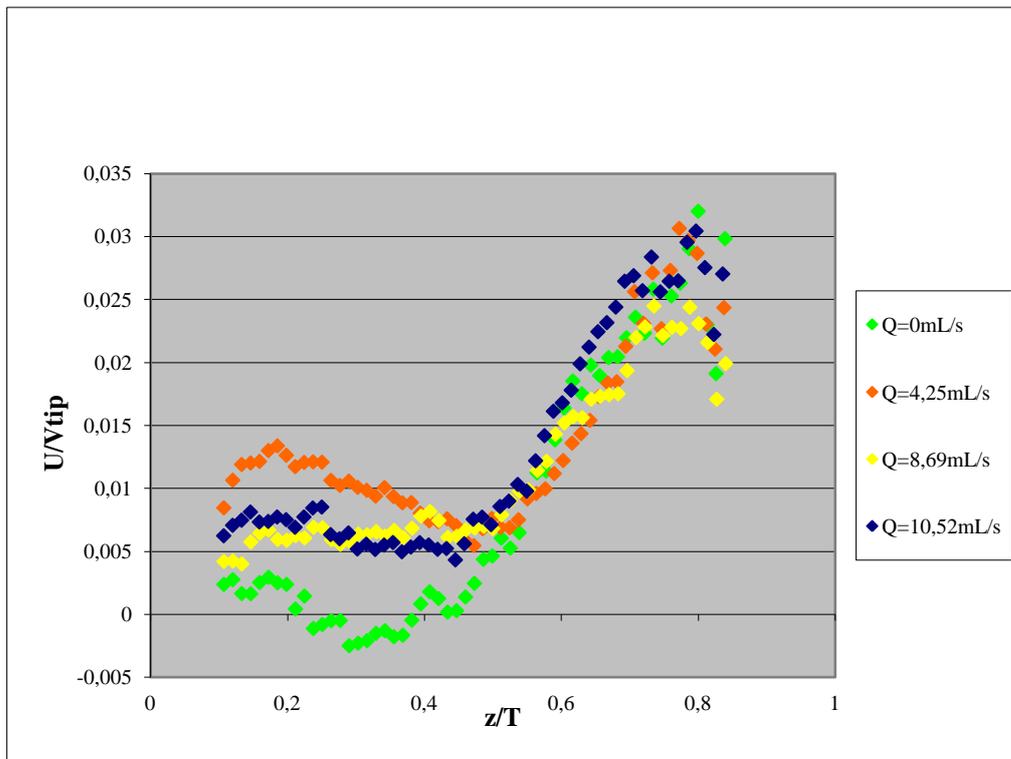


Fig. 5.39: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=300\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

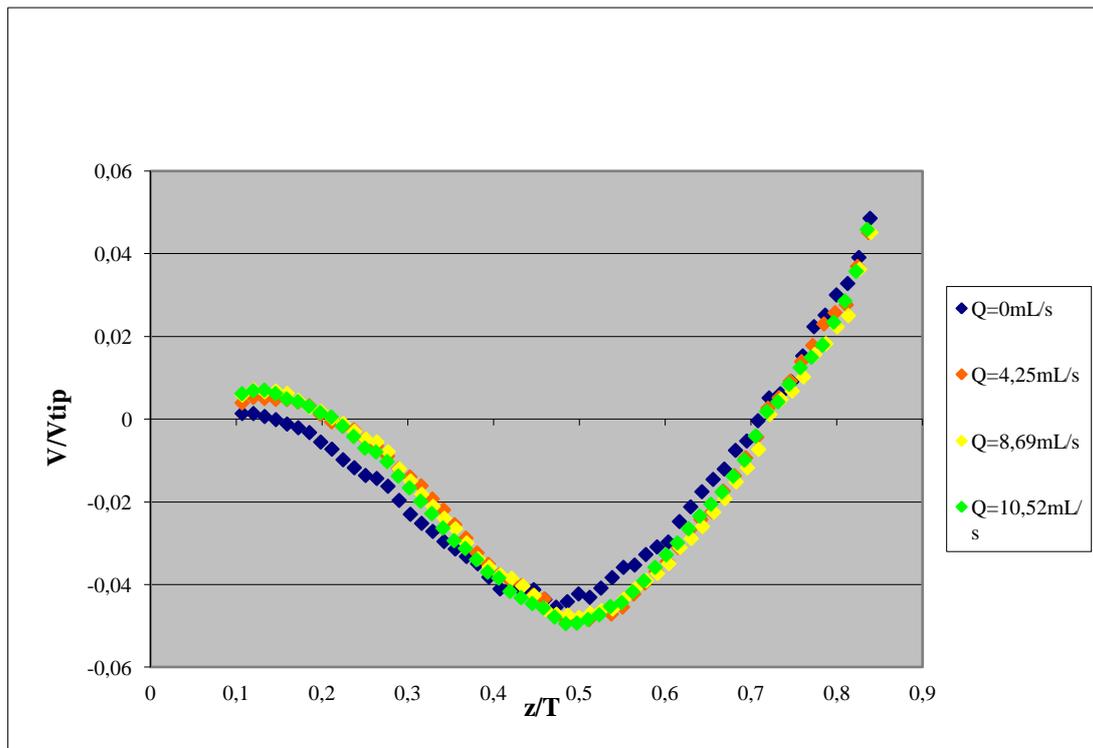


Fig. 5.40: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=300\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

5.3 Studio del campo di moto in un reattore con ricircolo. Prove con turbina PBT- down pumping

Terminate le prove con la girante PBT- up pumping, si è passati all'ultima fase della caratterizzazione del reattore: è stato invertito il senso di rotazione dell'albero e la PBT- up pumping si è trasformata in PBT down- pumping. Le caratteristiche geometriche di questa girante sono identiche a quelle della precedente: l'unica differenza fluidodinamica è che quest'ultima induce un moto del fluido verso il basso.

5.3.1 Campo di moto a $N=50\text{rpm}$

Analogamente a quanto riscontrato negli studi sui precedenti campi di moto, anche in questa serie di misure si è notata una forte influenza del getto della pompa per basse velocità di rotazione dell'albero.

La fig. 5.41 rappresenta la mappa vettoriale e l'andamento di Velocity/ V_{tip} sul piano del reattore in condizioni non perturbate dal getto della pompa: dall'immagine si può vedere come il fluido venga spinto dalla girante verso il fondo del reattore e successivamente risalga lungo le pareti del reattore.

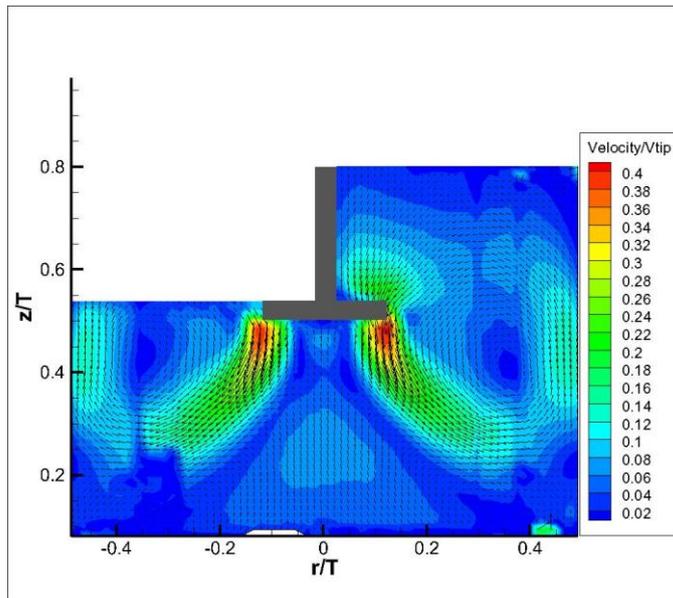


Fig. 5.41: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

La fig. 5.42 invece illustra come varia la mappa vettoriale e l'andamento di Velocity/Vtip quando il getto della pompa ha una portata $Q=10,52\text{mL/s}$. In queste condizioni il getto riesce ad arrivare fin sotto la girante, dove si unisce alla corrente diretta verso il basso generata dalla girante. Si noti come la velocità d'ingresso del getto sia maggiore della velocità del fluido nei pressi della girante e la marcata asimmetria del campo di moto.

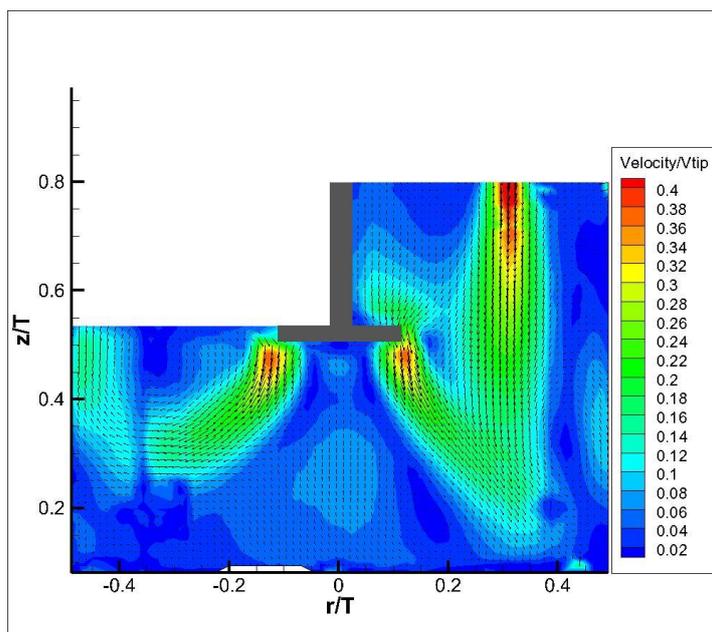


Fig. 5.42: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

L'immagine che segue (fig. 5.43) illustra la mappa vettoriale e il profilo di U/V_{tip} sul piano del reattore, in condizioni non perturbate dal getto della pompa: nella figura è

possibile identificare in blu le correnti generate dalla pompa e dirette verso il basso, mentre sui lati del reattore sono osservabili in rosso le correnti di risalita.

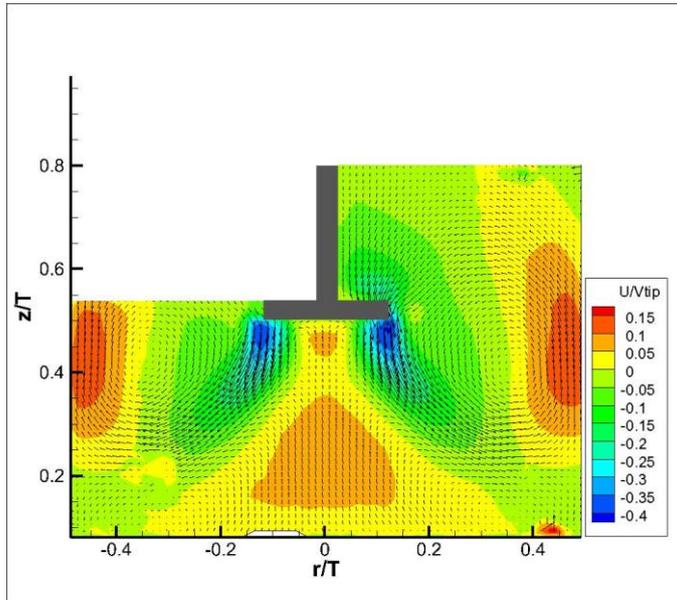


Fig. 5.43: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$)

Quando invece la portata del getto della pompa è pari a $Q=10,52\text{mL/s}$, il profilo di U/V_{tip} sul piano del reattore viene completamente modificato: il getto della pompa si unisce alla corrente in uscita dalla girante arrivando in tal modo sul fondo del reattore, e la zona del reattore rappresentata in figura sulla destra è quindi caratterizzata da un moto assiale prevalentemente diretto verso il fondo del reattore.

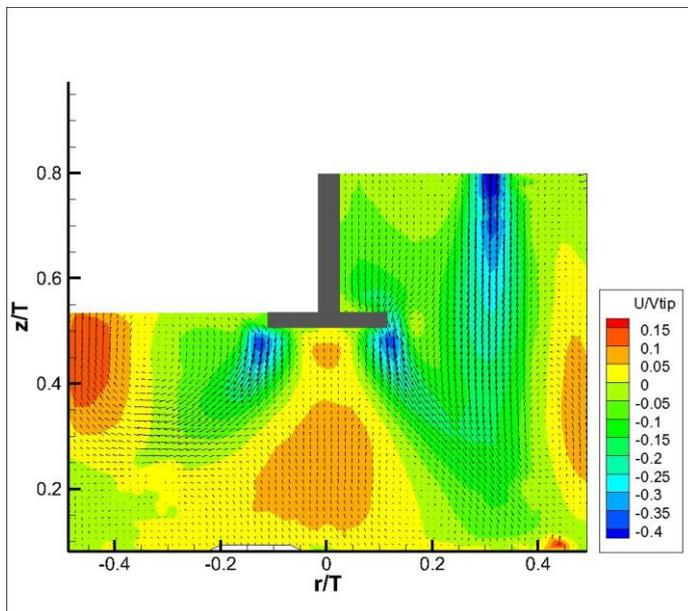


Fig. 5.44: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=50\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Gli andamenti dei profili di velocità assiale e radiale registrati nella sezione di imbocco del reattore (fig. 5.45 e fig. 5.46) confermano quanto emerso dalle mappe vettoriali.

In particolare possiamo vedere come all'aumentare della portata del getto, il profilo di U/V_{tip} nella sezione di imbocco (fig. 4.47) assuma valori sempre più negativi. Quando la portata del getto è pari a $Q=10,52\text{mL/s}$ la velocità assiale è negativa su tutto il profilo radiale del reattore, a dimostrazione del fatto che il moto è in quella zona diretto verso il fondo del reattore.

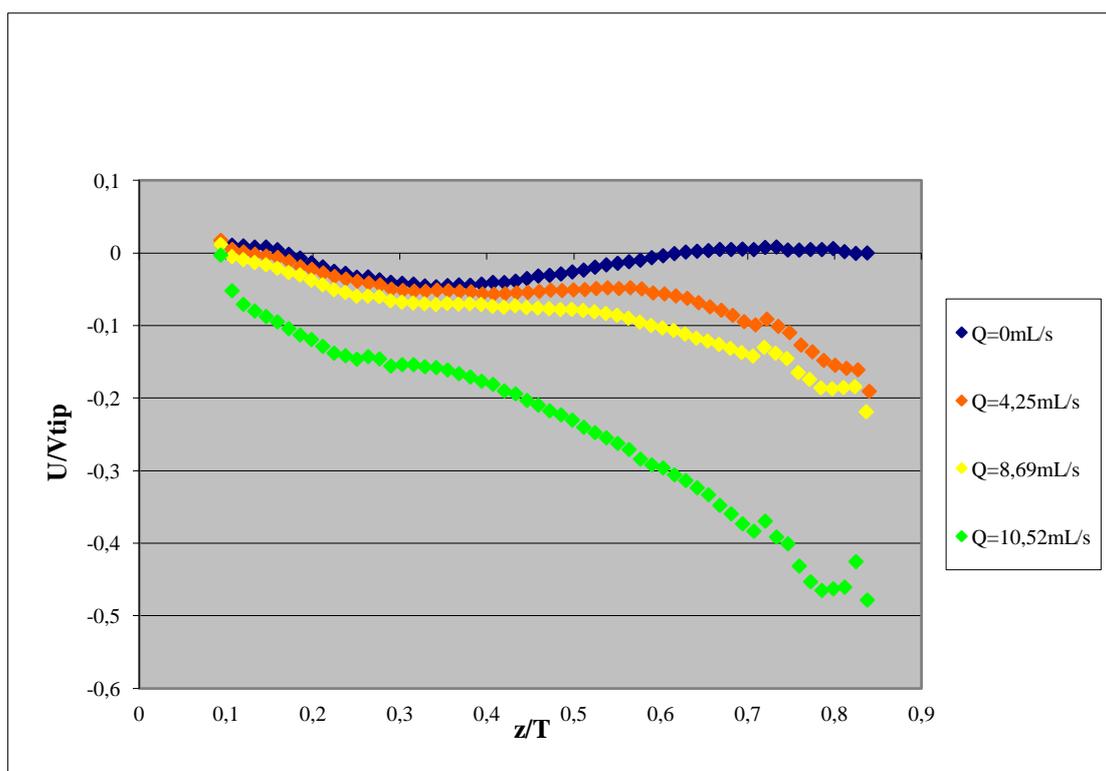


Fig. 5.45: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=50\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Analogamente a quanto riscontrato con la turbina Rushton e la PBT- up pumping, anche in questo caso (fig. 5.46) la velocità radiale viene influenzata in misura molto minore della velocità assiale. Si può notare tuttavia come i profili V/V_{tip} a portate maggiori del getto presentino dei picchi notevolmente più bassi degli omologhi registrati a portate del getto minori. E' quindi possibile concludere che all'aumentare della portata del liquido alimentato al reattore la capacità di pompaggio della girante diminuisca.

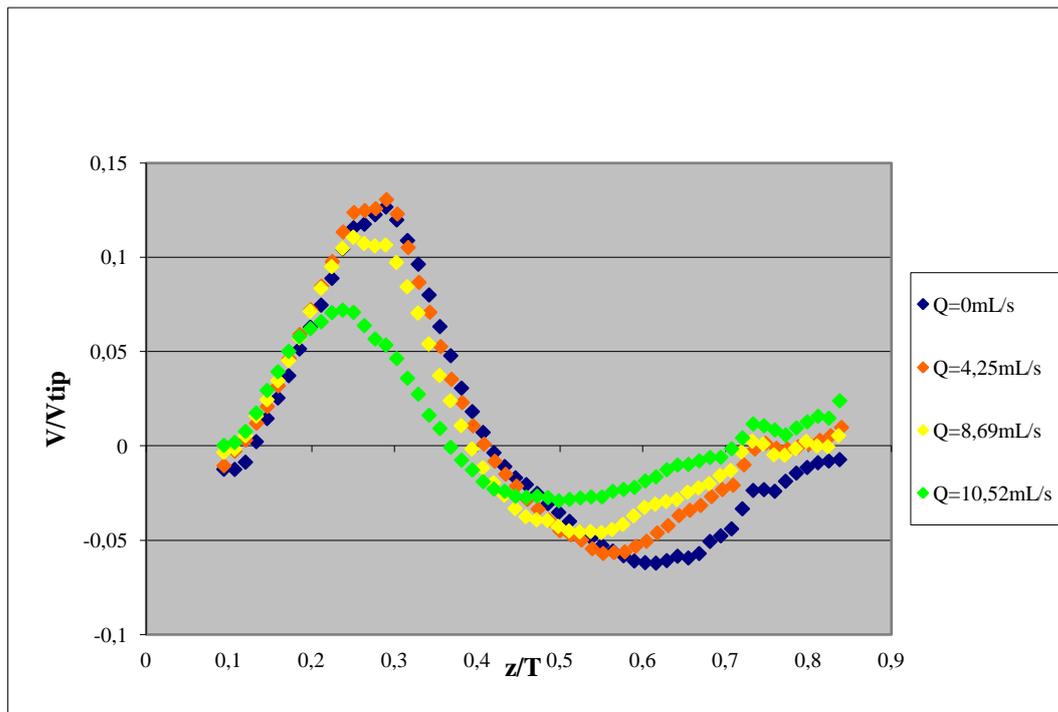


Fig. 5.46: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=50\text{rpm}$, per ciascuna delle portate esaminate.

5.3.2 Campo di moto a $N=100\text{rpm}$

Aumentando la velocità di rotazione dell'albero da $N=50\text{rpm}$ a $N=100\text{rpm}$ si è registrata una netta diminuzione dell'influenza del getto della pompa. Questo fenomeno, riscontrato anche nei precedenti campi di moto studiati, è dovuto essenzialmente alla maggiore potenza che l'albero della girante trasferisce al fluido. L'importanza del getto indotto dal liquido immesso tende quindi a ridursi a favore di quella generata dall'agitatore.

L'immagine che segue (fig. 5.47) rappresenta la mappa vettoriale e l'andamento di V/V_{tip} su tutto il piano del reattore in assenza di perturbazioni dovuta al getto.

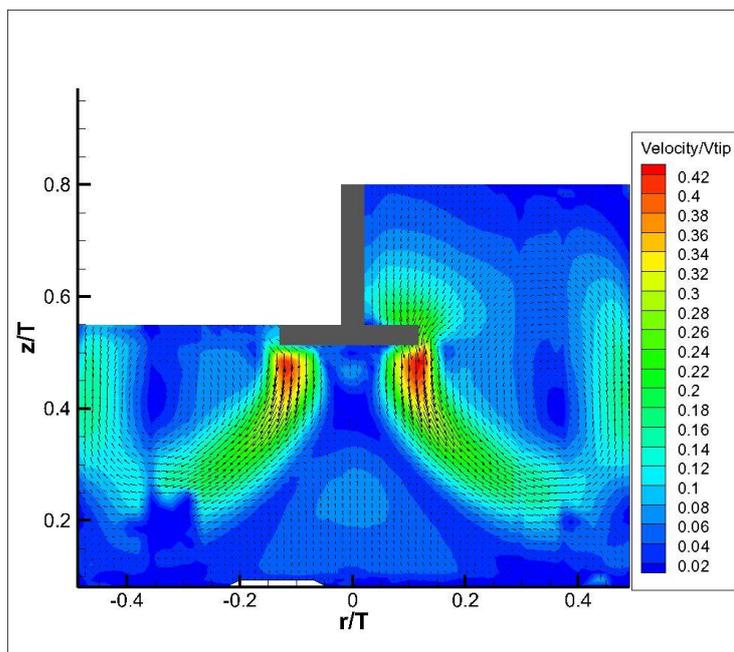


Fig. 5.47: Mappa vettoriale e andamento di $Velocity/V_{tip}$ sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=0\text{mL/s}$).

La fig. 5.48 illustra invece come varia il profilo $Velocity/V_{tip}$ nel piano del reattore quando la portata del getto è $Q=10,52\text{mL/s}$: si può notare abbastanza facilmente l'entrata del getto ma, diversamente da quanto registrato a basse velocità di agitazione, questo ha una velocità adimensionale piuttosto bassa se confrontata con quella del fluido vicino la girante e di conseguenza la sua capacità di influire sulla fluidodinamica del reattore diminuisce notevolmente.

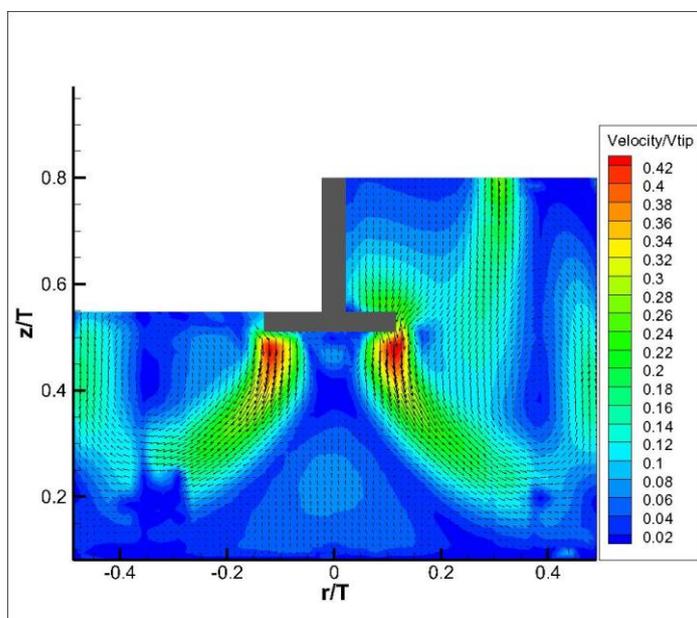


Fig. 5.48: Mappa vettoriale e andamento di $Velocity/V_{tip}$ sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Le immagini rappresentati i valori di U/V_{tip} registrate a portate del getto $Q=0\text{mL/s}$ e $Q=10,52\text{mL/s}$ (fig. 5.49 e fig. 5.50) confermano quanto emerso dalle mappe vettoriali precedenti.

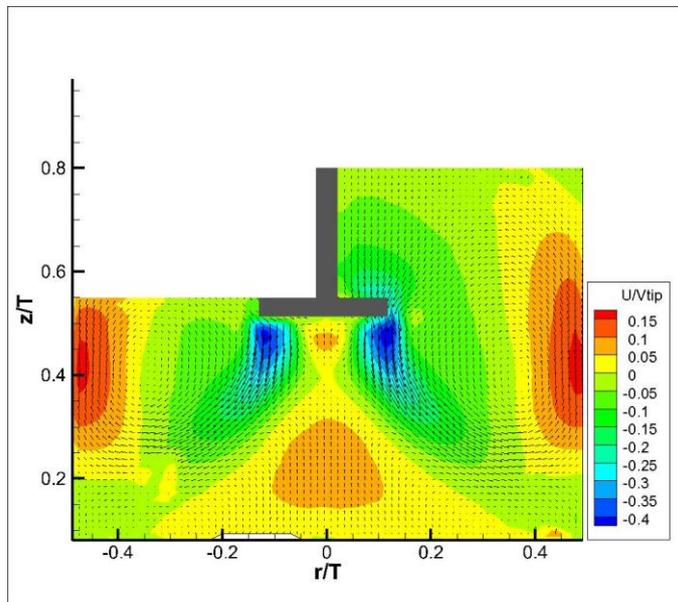


Fig. 5.49: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=0/\text{s}$).

Dal profilo di U/V_{tip} registrato con una portata del ricircolo $Q=10,52$, emerge che il getto non ha più una velocità tale da poter arrivare sul fondo del reattore: inoltre le due correnti di risalita provenienti dalla girante (in rosso ai suoi lati) hanno dimensioni e velocità paragonabili.

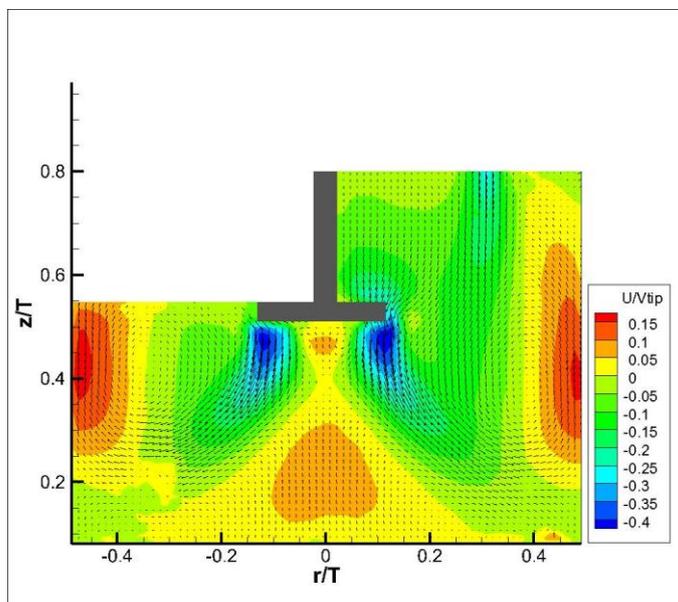


Fig. 5.50: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=100\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Vengono ora confrontati gli andamenti di velocità assiale e radiale in corrispondenza dell'entrata del getto (fig. 5.51 e fig. 5.52) per ciascuna delle portate analizzate, mantenendo costante la rotazione dell'albero a $N=100\text{rpm}$.

Per quanto riguarda il profilo della velocità assiale, possiamo notare che la corrente di ricircolo $Q=4,25\text{mL/s}$ possiede una velocità sufficiente per modificare solo la zona immediatamente vicina all'imbocco (i profili registrati con $Q=0\text{mL/s}$ e $Q=4,25\text{mL/s}$ sono sovrapponibili per $z/T < 0,6$). L'effetto della portata del liquido immesso diventa invece di una certa rilevanza per le prove condotte a $Q=8,69\text{mL/s}$ e $Q=10,52\text{mL/s}$.

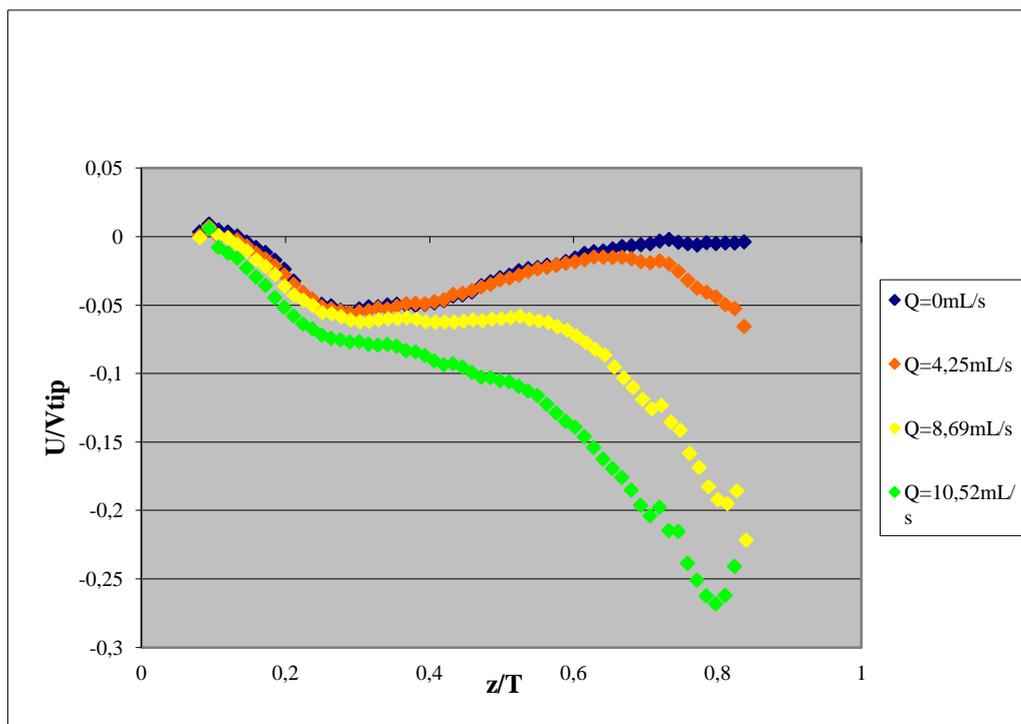


Fig. 5.51: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=100\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Per quanto riguarda invece gli andamenti dei profili di velocità radiale, il loro andamento è indipendente dalla portata del getto.

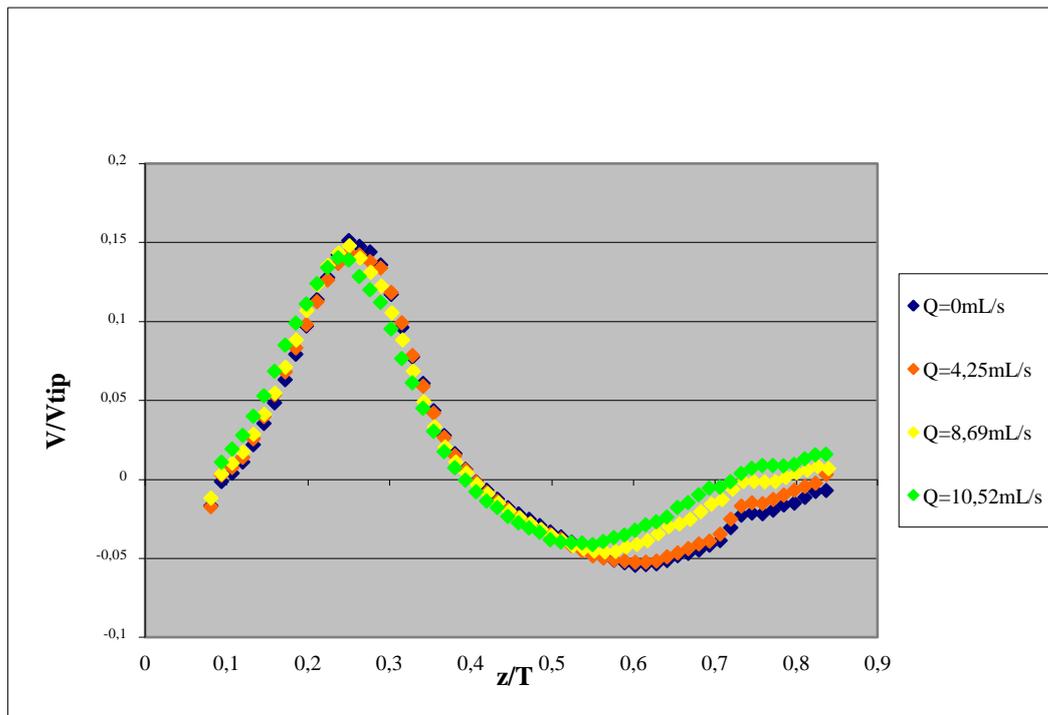


Fig. 5.52: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=100\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

5.3.3 Campo di moto a $N=150\text{rpm}$ e 300rpm

Durante lo studio del campo di moto del reattore equipaggiato con una girante PBT-down pumping si è notato, analogamente a quanto riscontrato nei due studi precedenti, come l'influenza del ricircolo indotto dalla pompa sia proporzionale alla portata del getto e inversamente proporzionale alla velocità di rotazione dell'albero.

Seguono le fig. 5.53 e 5.54, relative rispettivamente la prima ad una velocità di rotazione $N=150\text{rpm}$ e la seconda a $N=300\text{rpm}$: in ambedue la portata del ricircolo è $Q=10,52\text{mL/s}$. Le immagini mostrano come varia il rapporto Velocity/ V_{tip} sul piano del reattore: è importante notare come l'entrata del getto sia a stento distinguibile ad una agitazione pari a $N=150\text{rpm}$ mentre scompare del tutto a $N=300\text{rpm}$.

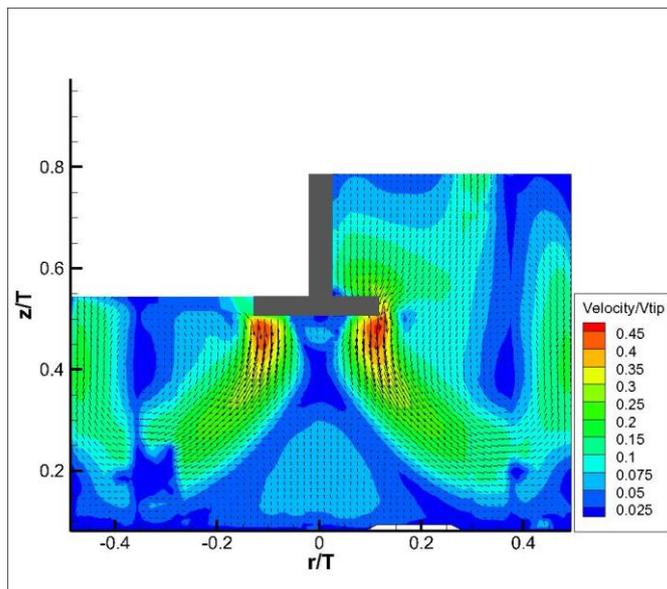


Fig. 5.53: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore (N=150rpm, Q=10,52mL/s).

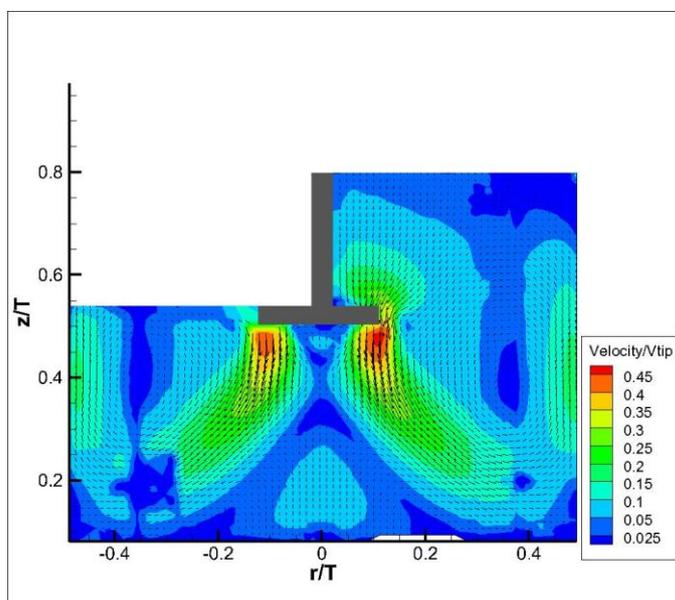


Fig. 5.54: Mappa vettoriale e andamento di Velocity/Vtip sul piano del reattore (N=150rpm, Q=10,52mL/s).

Le mappe vettoriali e gli andamenti di U/V_{tip} registrati a $N=150\text{rpm}$ e $N=300\text{rpm}$, con una portata del getto $Q=10,52\text{mL/s}$, confermano quanto emerso dalle analisi delle immagini precedenti.

Infatti, nella fig. 5.55, ottenuta con una velocità di rotazione $N=150\text{rpm}$, è ancora visibile in corrispondenza della sezione di imbocco una zona di verde più intenso imputabile senza dubbio all'ingresso della corrente di ricircolo.

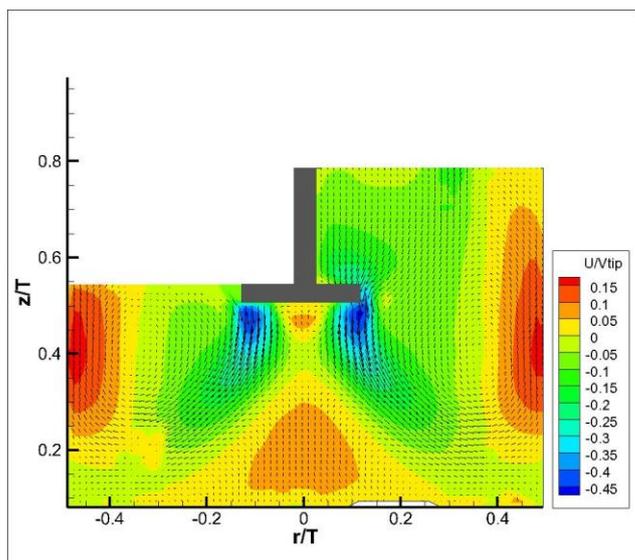


Fig. 5.55: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=150\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Ogni influenza del getto della pompa scompare quando la velocità di agitazione è $N=300\text{rpm}$ - Infatti in corrispondenza dell'imbocco del getto non si nota alcun effetto dello stesso sulla mappa di flusso di U/V_{tip} .

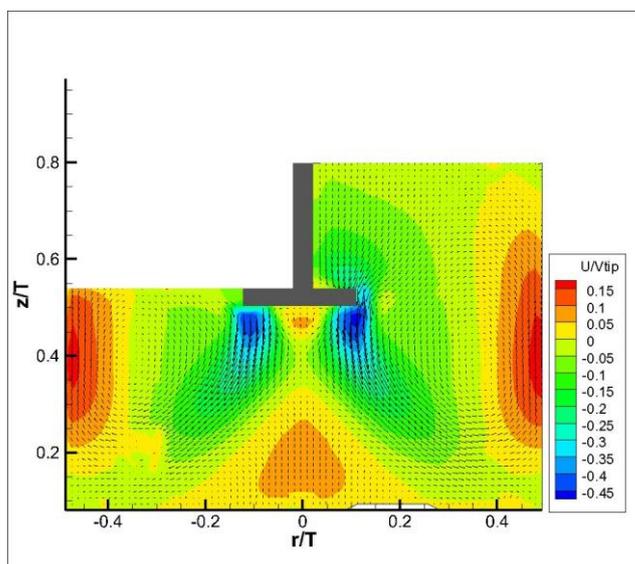


Fig. 5.56: Mappa vettoriale e andamento di U/V_{tip} sul piano del reattore ($N=300\text{rpm}$, $Q=10,52\text{mL/s}$).

Gli andamenti dei profili delle velocità assiali ottenuti a $N=150\text{rpm}$ in corrispondenza della sezione di imbocco, confermano ciò che le mappe vettoriali suggerivano: l'influenza del getto sul profilo di velocità assiale è limitato alle alte portate della pompa, ma è comunque, in valore assoluto, molto più piccola rispetto a velocità di agitazione più basse.

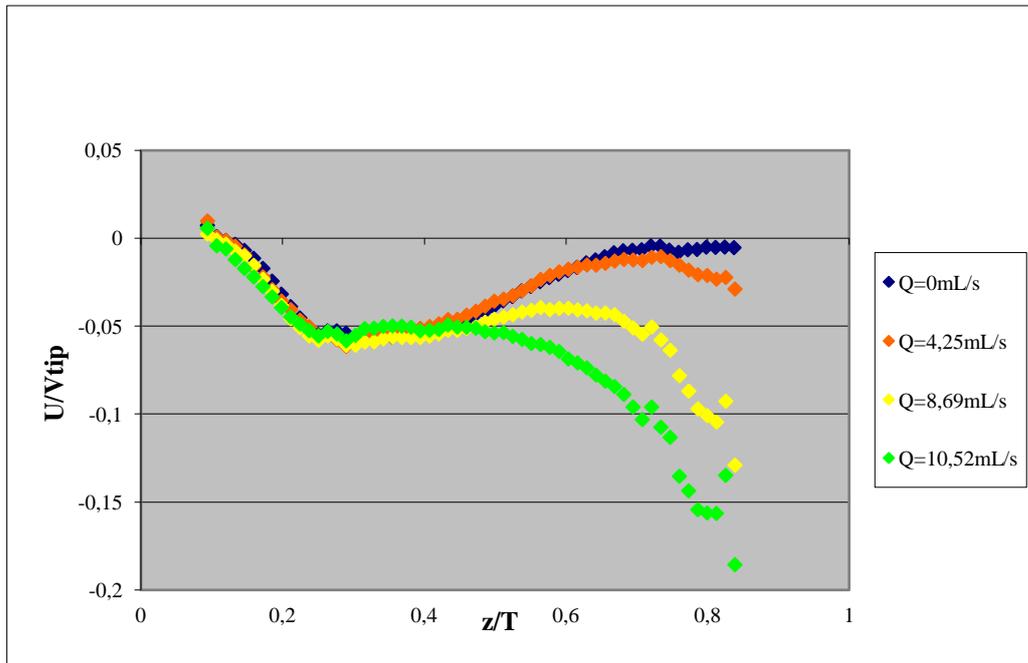


Fig. 5.57: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=150\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Non si registra invece alcuna influenza significativa del getto della pompa sui profili di velocità radiale.

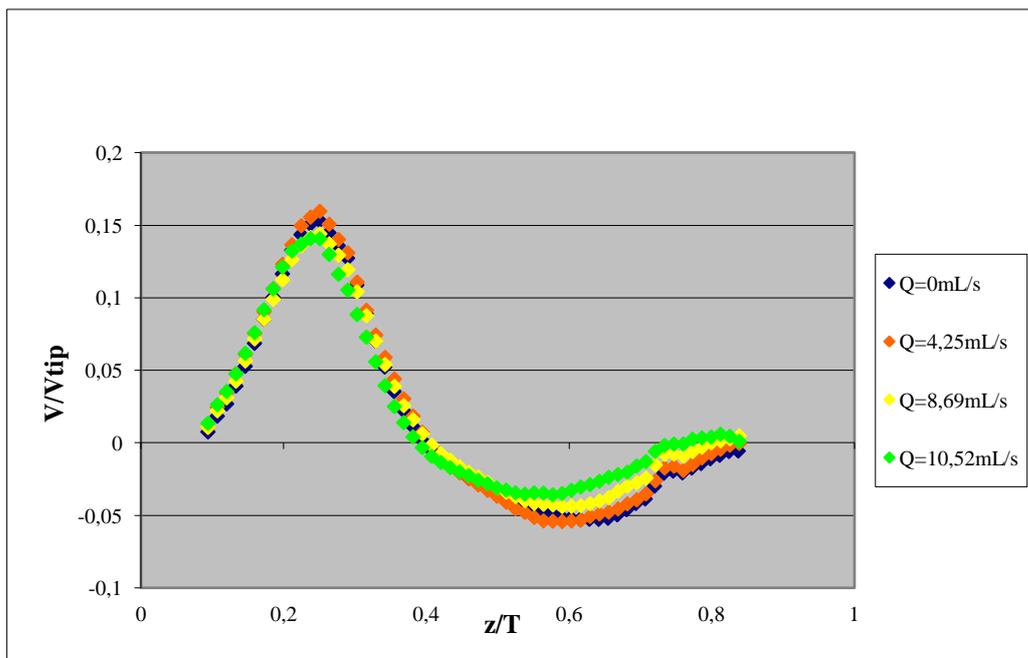


Fig. 5.58: Andamento dei profili di velocità radiale con $r/T=0,31$ e $N=150\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

Gli andamenti dei profili delle velocità assiali ottenuti a $N=300\text{rpm}$ in corrispondenza della sezione di imbocco, registrano ancora una minima influenza del getto della pompa, ma è limitata nella zona immediatamente vicine all'ingresso del getto, e in valore assoluto del tutto trascurabile.

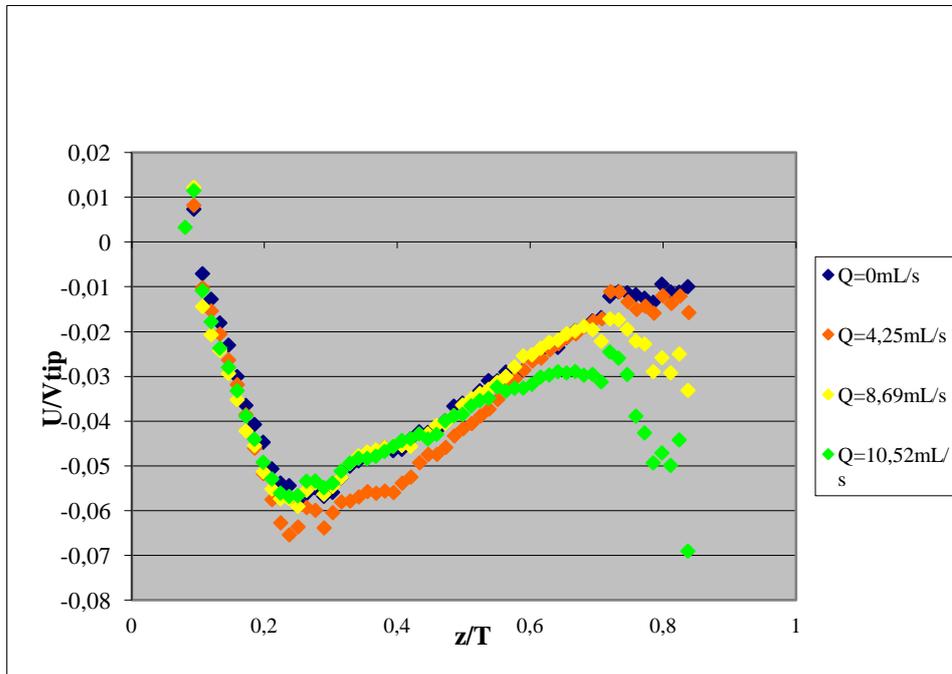


Fig. 5.59: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=300\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

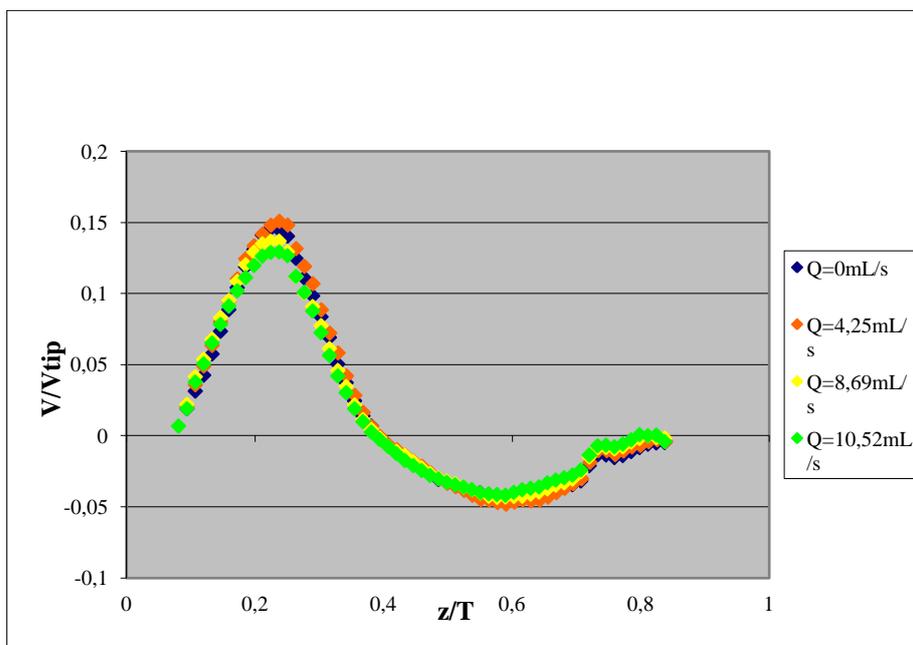


Fig. 5.60: Andamento dei profili di velocità assiale con $r/T=0,31$ e $N=300\text{rpm}$ per ciascuna delle portate esaminate.

5.4 Tecnica PIV. Considerazioni finali

Dallo studio condotto sui tre diversi campi di moto si evince come i profili di velocità assiale dipendano sia dal numero di giri dell'albero sia dalla portata del getto della pompa. In particolare, a basse velocità di rotazione della girante, la portata del ricircolo è in grado di modificare in maniera significativa il campo di moto medio del reattore. Ad velocità di agitazione, invece, la portata del liquido immesso dalla pompa non è più in grado di influenzare in maniera significativa la fluidodinamica del sistema.

L'influenza del ricircolo indotto dalla pompa sul campo di moto medio è stato quantificato analizzando la variazione di velocità assiale in funzione del rapporto tra le potenze della pompa e della girante: ciò ha permesso di determinare il rapporto minimo delle potenze necessario per rendere significativa l'influenza della pompa.

Per fare ciò è stata calcolata una varianza "S" tra i valori di velocità assiali riscontrate sul piano per ciascuna delle portate esaminate:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{i,Q} - V_{i,Q=0})^2}{N} \quad (5.3)$$

- $V_{i,Q=0}$: è la il rapporto U/V_{tip} i- esimo riscontrato per $Q=0$;
- $V_{i,Q}$: è il rapporto U/V_{tip} i-esimo riscontrato a una delle Q prese in esame;
- N è il numero di valori U/V_{tip} presenti su ciascuna mappa del campo di moto, in corrispondenza del profilo $r/T=0,31$.

I valori trovati sono funzione del rapporto tra le potenze della pompa (relazione 1.5) e la potenza della girante (relazione 5.2). Dalla figura 5.61 si può vedere come il liquido immesso dalla pompa influenzi diversamente il campo di moto medio indotto da ciascuna delle tre giranti utilizzate.

Dall'analisi della figura sottostante è possibile notare che:

- I valori di U/V_{tip} registrati con le giranti PBT mostrano una varianza maggiore al variare del rapporto $W_{pompa} / W_{girante}$: il liquido immesso dalla pompa influenza quindi in misura maggiore il campo di moto indotto dalle PBT.
- A parità del rapporto delle potenze fornite dalla pompa e dalla girante, il reattore equipaggiato con una girante PBT down- pumping presenta una variazione del

campo di moto più decisa, mentre quello indotto dalla turbina Rushton sembra essere quello meno influenzato dalla presenza della corrente di ricircolo.

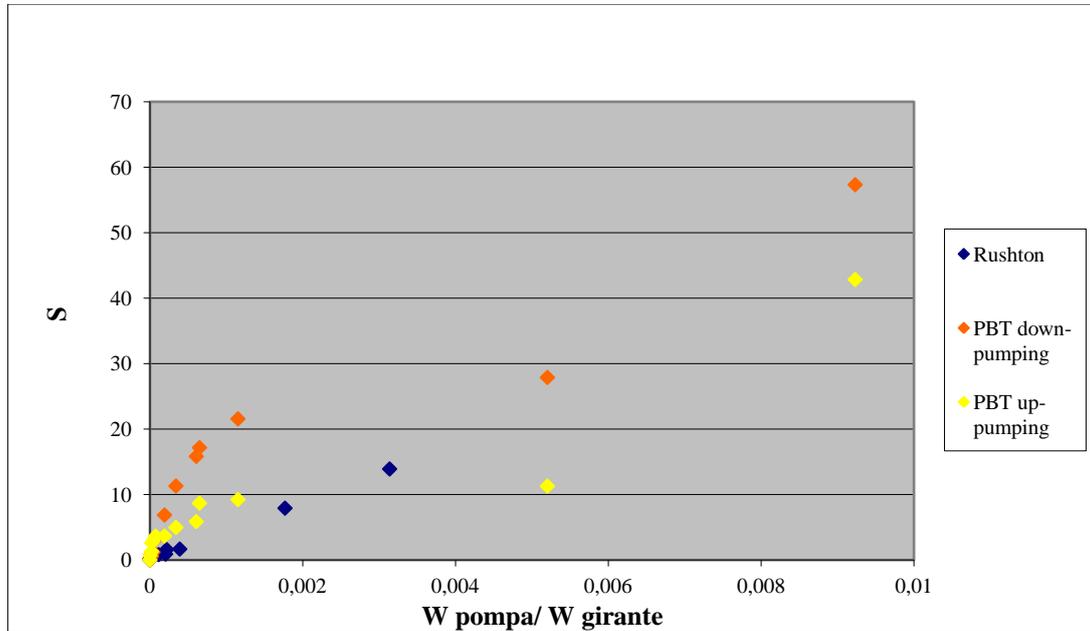


Fig. 5.61: Varianza S in funzione del rapporto W pompa/ W girante per ciascuna delle giranti utilizzate. La curva relativa alla girante Rushton termina a rapporti di potenza minori in quanto la potenza da essa fornita è maggiore.

Analogamente è stato redatto un grafico (fig. 5.62) in cui la varianza S è funzione del rapporto tra di liquido immesso dalla pompa e la portata indotta dalla girante.

Il grafico sottostante conferma quanto già emerso dalla analisi precedente.

A parità del rapporto delle portate movimentate da pompa e girante, il reattore equipaggiato con una girante PBT down-pumping presenta una variazione del campo di moto più decisa. La configurazione con la PBT-up pumping presenta delle variazioni del campo di moto leggermente inferiori, mentre un reattore equipaggiato con una girante Rushton è quello che meno di tutti risente della corrente di liquido immesso dalla pompa.

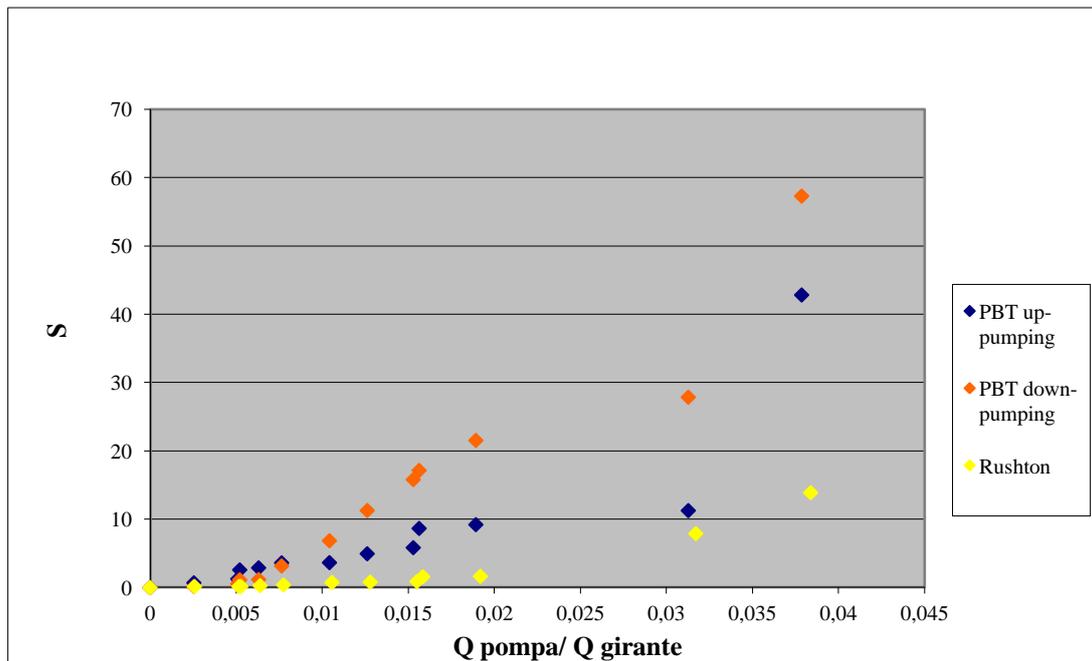


Fig. 5.62: Varianza S in funzione del rapporto Q pompa/ Q girante per ciascuna delle giranti utilizzate. Le tre curve questa volta terminano per valori uguali del rapporto Q pompa/ Q girante in quanto Rushton e PBT presentano capacità di pompaggio paragonabili.

Lo studio condotto finora evidenzia inoltre come la velocità assiale e radiale vengano perturbate in maniera differente dalla corrente di ricircolo: mentre il profilo di velocità assiale è influenzato dalla pompa fino ad un discreto numero di giri dell'albero, il profilo di velocità radiale è perturbato solo a velocità di agitazione molto basse.

Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che la portata di liquido ricircolato viene immessa nel reattore in direzione assiale.

E' possibile che, in casi di immissione radiale l'effetto del liquido ricircolato possa influenzare prevalentemente la componente radiale del campo di moto.

6. RISULTATI SPERIMENTALI. TECNICA PLIF. DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI OMOGENEIZZAZIONE IN UN REATTORE CON RICIRCOLO

In questo capitolo verranno esposti i risultati sperimentali ottenuti nella seconda parte del presente lavoro di tesi: la determinazione del tempo di omogeneizzazione in un reattore con ricircolo.

Le configurazioni sottoposte ad analisi PLIF sono le medesime analizzate con la PIV. Sono stati calcolati i tempi di omogeneizzazione con i tre diversi tipi di girante visti precedentemente.

Per ciascun tipo di girante è stato calcolato il tempo di omogeneizzazione (d'ora in avanti t_{mix}) a diverse velocità di agitazione. Sono state scelte le stesse velocità di agitazione analizzate con la PIV: $N=50, 100, 150, 300$ rpm. Per ciascuna velocità di agitazione è stata variata la portata del getto aumentandone la portata da $Q=0$ mL/s a $Q=10,52$ mL/s, passando per le portate intermedie $Q=4,25$ mL/s e $Q=8,69$ mL/s.

L'obiettivo di tali prove è verificare se vi fosse un' eventuale variazione del tempo di omogeneizzazione attribuibile alla corrente di ricircolo.

6.1 Prove con turbina Rushton

6.1.1 Valutazione del t_{mix} a $N=50$ rpm

Impostando la velocità di agitazione a $N=50$ rpm, si è registrato un andamento del t_{mix} inversamente proporzionale alla portata del getto.

Per basse velocità di agitazione, si è visto che ad un aumento della portata del getto corrisponde una diminuzione del tempo di omogeneizzazione. Questo accade perché a basse velocità di agitazione, la corrente di ricircolo apporta una potenza aggiuntiva significativa che si traduce in una maggiore movimentazione del fluido stesso e quindi in una omogeneizzazione più rapida dell'additivo immerso nel reattore.

Una portata del getto $Q=10,52$ mL/s comporta una diminuzione del tempo di omogeneizzazione di circa il 17% rispetto al caso di corrente ricircolata pari a zero.

La fig. 6.1 mostra l'andamento del t_{mix} in funzione della portata del getto della pompa: emerge chiaramente che aumentando la portata del getto, il tempo necessario per la completa omogeneizzazione passa da 19,3 a 15,9 secondi.

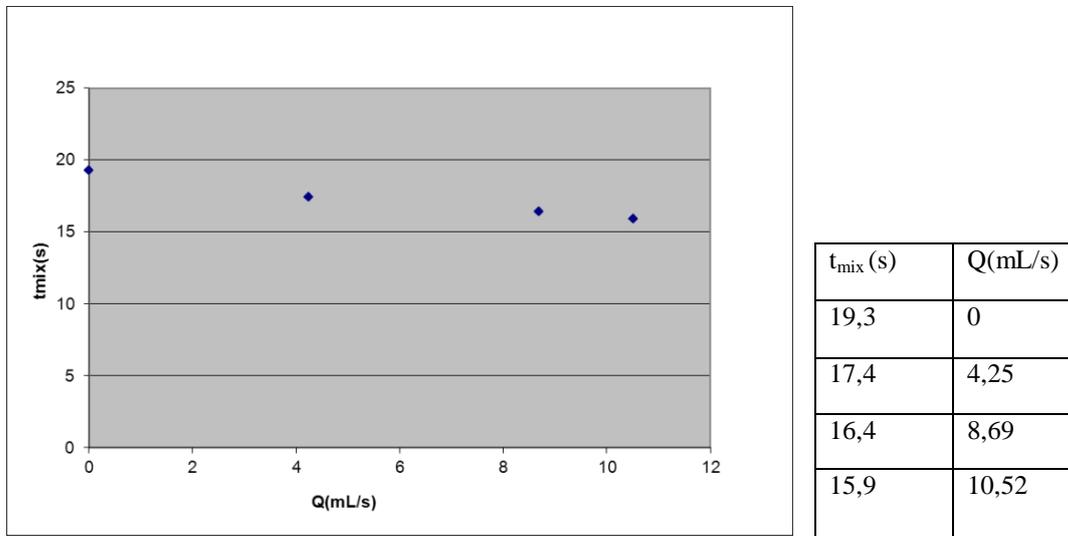


Fig.6.1:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di Q(mL/s) con velocità di agitazione $N=50$ rpm.

6.1.2 Valutazione del t_{mix} a $N=100$ rpm

Un aumento della velocità della rotazione dell'albero ha naturalmente ridotto il tempo di completa omogeneizzazione del sistema. Parallelamente si è potuto notare come a $N=100$ rpm persista un effetto della portata di liquido ricircolato dalla pompa sul t_{mix} .

Anche in questa serie di prove, un graduale aumento della portata immessa ha comportato una diminuzione del tempo di omogeneizzazione da 12,8 secondi, registrati per $Q=0$ mL/s, a 10,6 secondi, registrati a $Q=10,52$ mL/s.

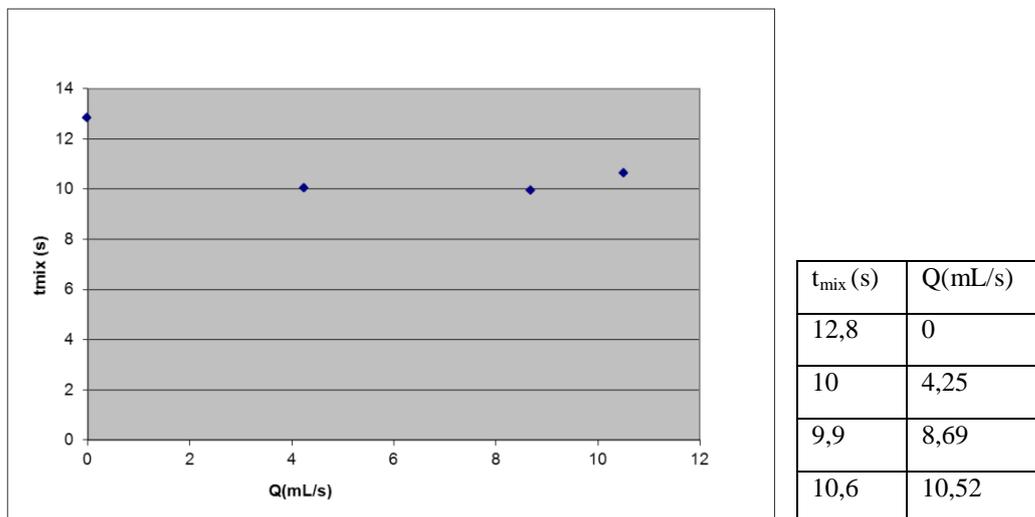


Fig.6.2:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di Q (mL/s) con velocità di agitazione $N=100$ rpm.

6.1.3 Valutazione del t_{mix} a $N=150$ rpm

Un ulteriore aumento della velocità di agitazione, da $N=100$ a $N=150$ rpm, comporta ovviamente una diminuzione del tempo di omogeneizzazione.

Ciò che è possibile notare è come, dall'analisi della Fig. 6.3, l'influenza della portata immessa sia praticamente trascurabile. Questo comportamento è possibile che sia originato dal fatto che, ad una velocità di agitazione pari a $N=150$ rpm, la potenza immessa nel sistema dal liquido movimentato dalla pompa è trascurabile rispetto a quella originata dal moto della girante.

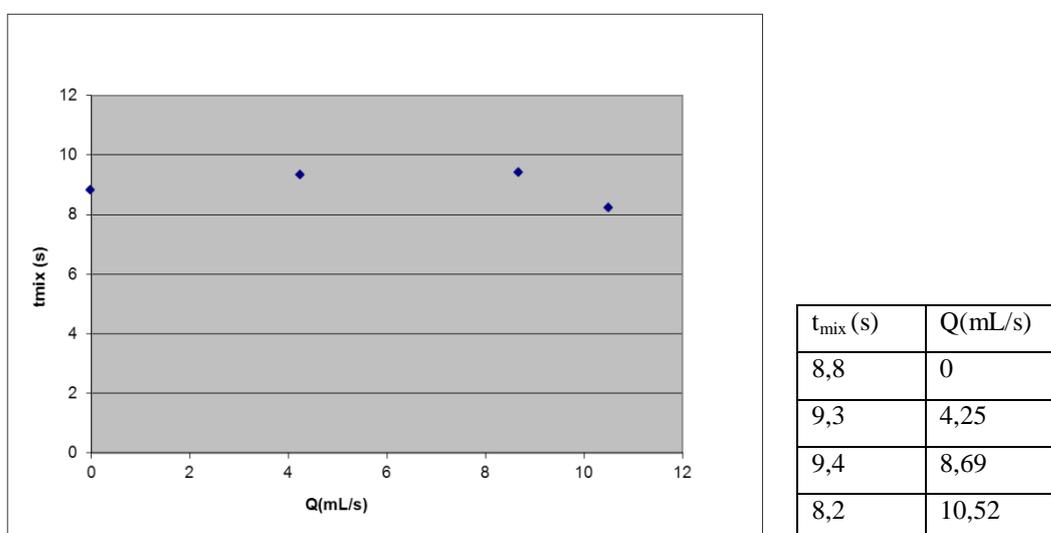


Fig.6.3:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di Q (mL/s) con velocità di agitazione $N=150$ rpm.

6.1.4 Valutazione del t_{mix} a $N=300rpm$

Naturalmente ciò ha comportato una accentuazione dei fenomeni già descritti in precedenza: un aumento della velocità di agitazione a $N=300rpm$ ha diminuito drasticamente il tempo di omogeneizzazione del sistema e naturalmente, come già notato per $N=150rpm$, i valori di t_{mix} sono del tutto indipendenti dalla portata del getto.

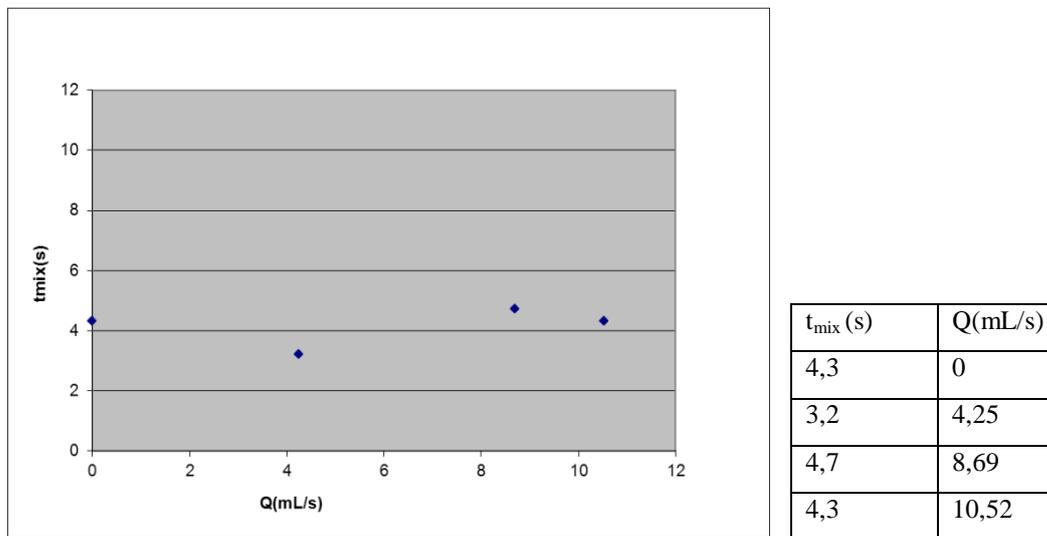


Fig.6.4:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di $Q(mL/s)$ con velocità di agitazione $N=300rpm$.

6.1.5 Confronto dei t_{mix} ottenuti per ciascuna velocità di agitazione

In fig. 6.5 è rappresentato l'andamento dei t_{mix} in funzione della portata del getto, per ciascuna delle velocità di agitazione esaminate.

Possiamo osservare innanzitutto come un aumento della velocità di agitazione induca una diminuzione del tempo di omogeneizzazione. L'influenza della portata ricircolata è ben visibile a $N=50rpm$, dove ad ogni aumento della portata corrisponde parimenti una diminuzione del t_{mix} .

Per $N=100rpm$ invece l'influenza del getto continua ad essere rilevante, ma possiamo notare come i valori del t_{mix} per valori di $Q=4,25mL/s$, $Q=8,69mL/s$ e $Q=10,52mL/s$ siano tra loro molto simili, mentre differiscono notevolmente dal valore di t_{mix} per $Q=0mL/s$. Ciò indica una minore dipendenza di t_{mix} dalla portata del getto rispetto al caso precedente.

Ad alte velocità di agitazione ($N=150\text{rpm}$ e $N=300\text{rpm}$) invece i tempi di omogeneizzazione risultano essere praticamente indipendenti dalla portata del liquido immesso.

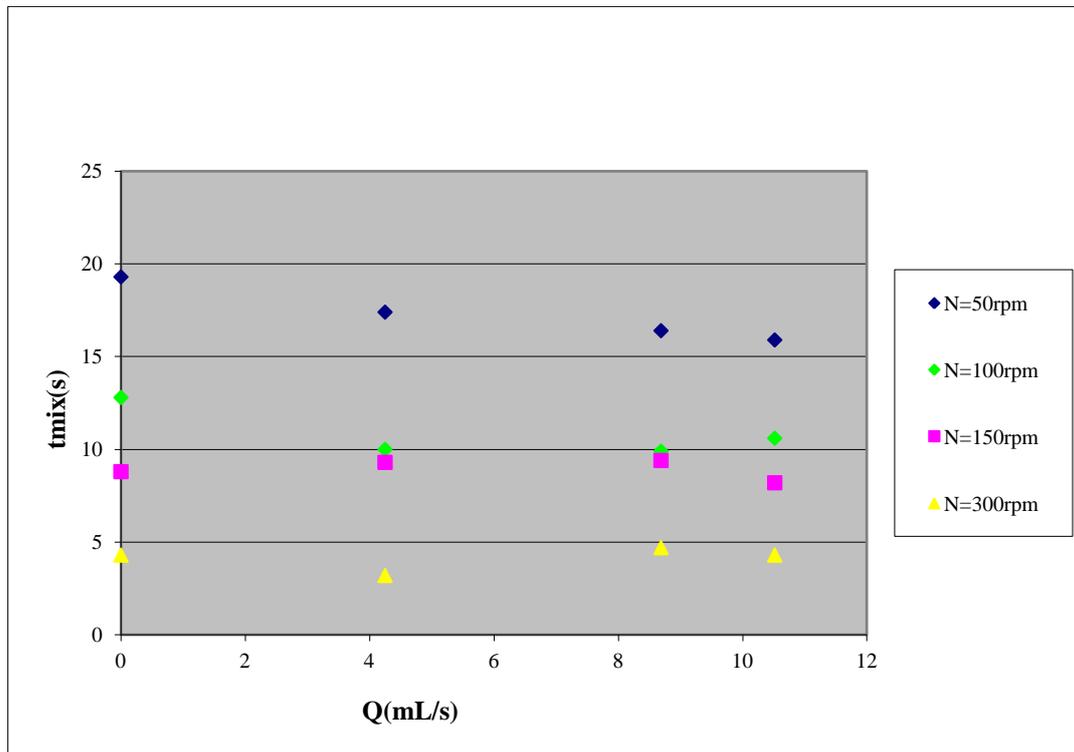


Fig. 6.5: Andamento dei t_{mix} in funzione di Q (mL/s) per tutte le velocità di agitazione esaminate.

6.2 Prove con turbina PBT- up pumping

Terminate le acquisizioni con la girante Rushton, il lavoro sperimentale è andato avanti sostituendo questa con una girante PBT- up pumping (utilizzata in precedenza con le misure PIV).

I valori del t_{mix} registrati in funzione della velocità di agitazione e della portata del getto, mostrano un andamento qualitativo del tutto simile a quello riscontrato per la girante Rushton.

6.2.1 Valutazione del t_{mix} a $N=50\text{rpm}$

In fig. 5.6 sono riportati i dati acquisiti a $N=50\text{rpm}$, e analogamente a quanto mostrato per una girante Rushton, si può notare una evidente dipendenza del tempo di omogeneizzazione dalla portata ricircolata.

Infatti aumentando gradualmente la portata del getto da $Q=0\text{mL/s}$ al valore finale di $Q=10,52\text{mL/s}$, si è notata una netta e graduale diminuzione dei valori dei tempi di omogeneizzazione da 37,6 a 27 secondi corrispondente ad una diminuzione del t_{mix} del 28%(fig. 6.6).

Questo fenomeno è originato dal fatto che perché a basse velocità di agitazione, la corrente di ricircolo riesce ad apportare una potenza aggiuntiva significativa che si traduce in una maggiore movimentazione del fluido stesso e quindi in una omogeneizzazione più rapida del liquido nel reattore.

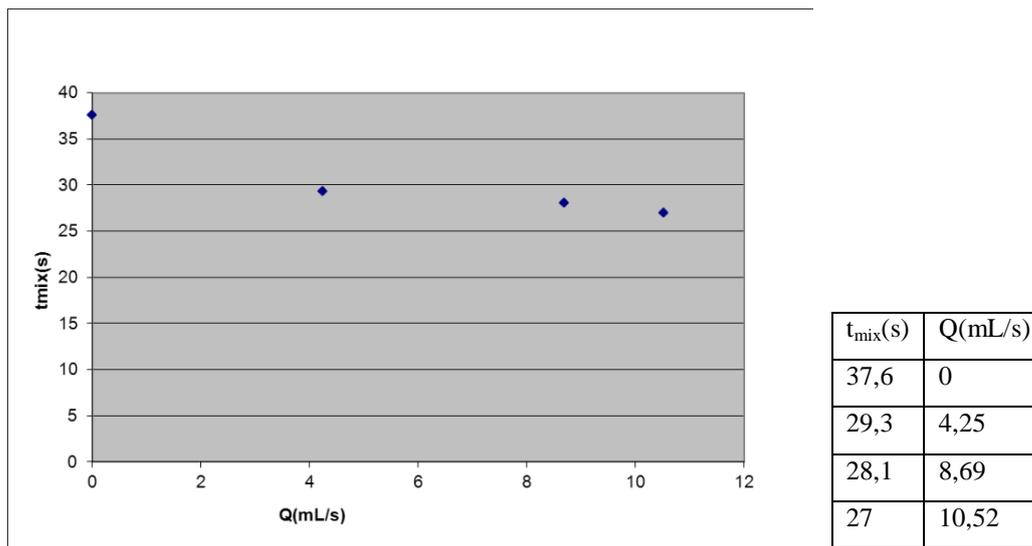


Fig.6.6:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di $Q(\text{mL/s})$ con velocità di agitazione $N=50\text{rpm}$.

6.2.2 Valutazione del t_{mix} a $N=100\text{rpm}$

Sebbene in misura minore che per velocità di agitazione più bassa, anche a $N=100\text{rpm}$ si riscontra un effetto del getto sul tempo di omogeneizzazione del liquido nel reattore.

Infatti, come emerge dall'analisi della fig. 6.7, a ciascun aumento della portata ricircolata corrisponde una relativa diminuzione del tempo di omogeneizzazione; tuttavia tale diminuzione è molto inferiore a quella registrata con $N=50\text{rpm}$, in quanto la girante trasferisce una potenza molto maggiore al fluido.

Aumentando la portata ricircolata si passa da un valore di $t_{\text{mix}}=10,6\text{secondi}$ (registrato per $Q=0\text{mL/s}$) ad un valore minimo di $t_{\text{mix}}=8,8\text{secondi}$ (registrato a $Q=10,52\text{mL/s}$), corrispondente ad una diminuzione del t_{mix} del 17%.

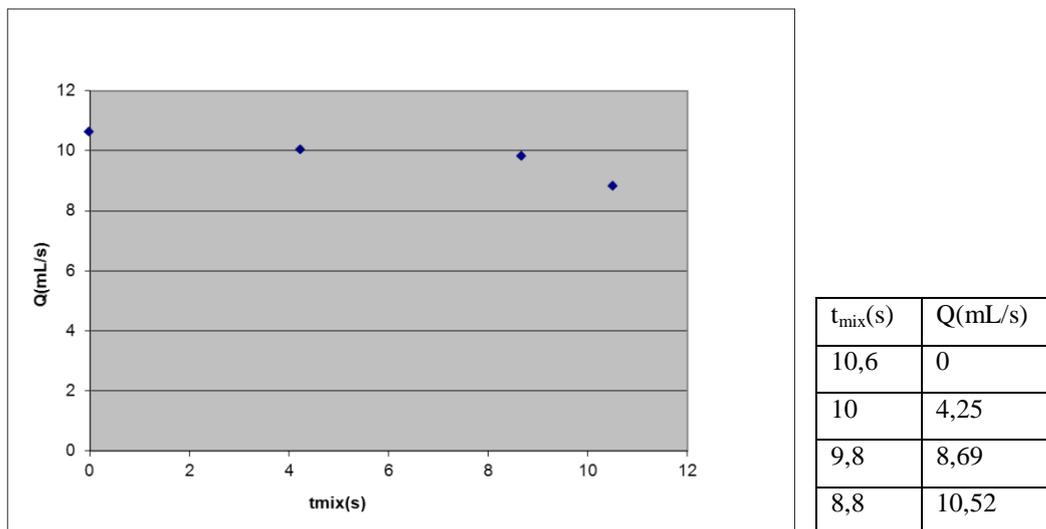


Fig.6.7:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di $Q(mL/s)$ con velocità di agitazione $N=100rpm$.

6.2.3 Valutazione del t_{mix} a $N=150rpm$

Aumentando la velocità di agitazione da $N=100$ a $N=150rpm$ registriamo ovviamente una diminuzione del tempo di omogeneizzazione. Inoltre emerge come, a queste velocità di agitazione, il getto indotto dal liquido immesso non sia più in grado di influenzare il t_{mix} che, come si può vedere in fig. 6.8, è ormai indipendente dalla portata ricircolata. Ne deduciamo con una velocità $N=150rpm$ la potenza che la pompa trasferisce al sistema diventa trascurabile se confrontata con quella ceduta dalla girante: questo fenomeno si traduce in una indipendenza del t_{mix} dalla portata del getto.

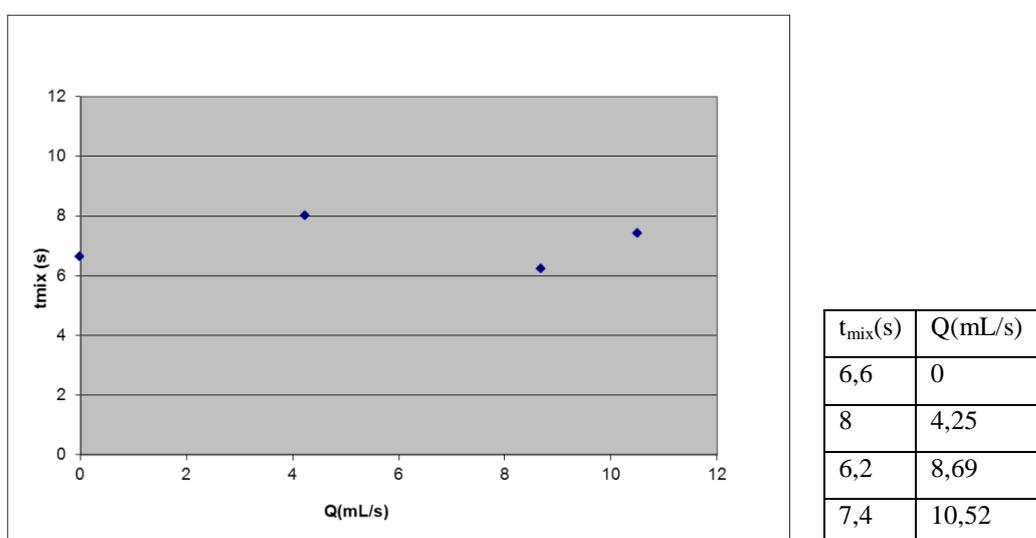


Fig.6.8:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di $Q(mL/s)$ con velocità di agitazione $N=150rpm$.

6.2.4 Valutazione del t_{mix} a $N=300rpm$

Ad una velocità di agitazione pari a $N=300rpm$ si può osservare una accentuazione dei fenomeni già descritti in precedenza: l'aumento della velocità di agitazione a $N=300rpm$ ha diminuito drasticamente il tempo di omogeneizzazione del sistema e naturalmente, come già notato per $N=150rpm$, i valori di t_{mix} sono del tutto indipendenti dalla portata ricircolata.

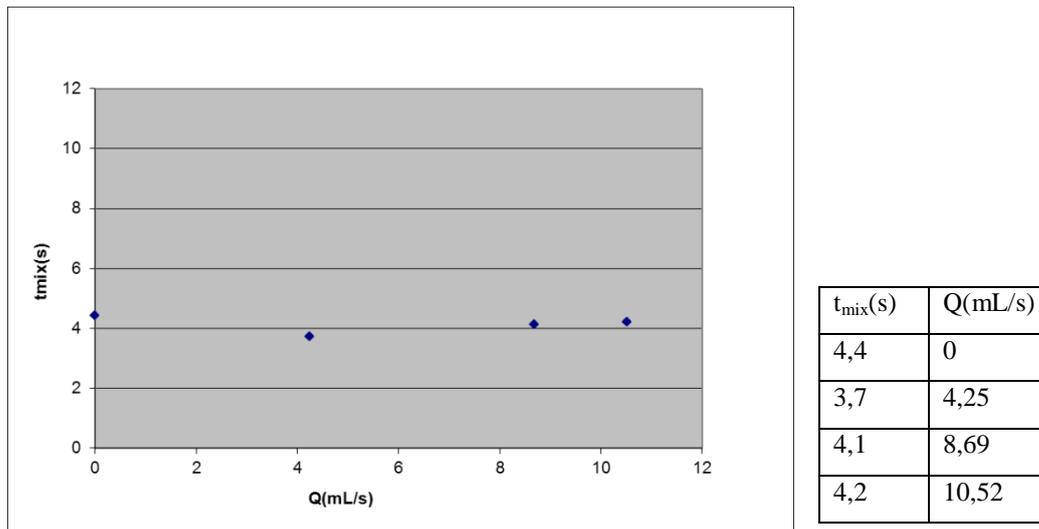


Fig.6.9:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di $Q(mL/s)$ con velocità di agitazione $N=300rpm$.

6.2.5 Confronto dei t_{mix} ottenuti per ciascuna velocità di agitazione

In fig. 6.10 sono riportati i dati sperimentali di t_{mix} in funzione della portata del getto, per ciascuna delle velocità di agitazione esaminate.

E' possibile notare che un aumento della velocità di agitazione induce una diminuzione del tempo di omogeneizzazione. L'influenza del liquido ricircolato dalla pompa è ben visibile a $N=50rpm$, dove ad ogni aumento della portata corrisponde parimenti una diminuzione del t_{mix} .

Per $N=100rpm$ l'influenza del getto diventa meno rilevante, e mentre possiamo notare come i valori del t_{mix} per valori di $Q=4,25mL/s$, $Q=8,69mL/s$ e $Q=10,52mL/s$ siano tra loro simili, invece differiscono notevolmente dal valore di t_{mix} registrato in assenza del getto della pompa. Ciò indica una minore dipendenza di t_{mix} dalla portata del getto rispetto al caso precedente.

Ad alte velocità di agitazione ($N=150\text{rpm}$ e $N=300\text{rpm}$) invece i tempi di omogeneizzazione risultano essere indipendenti dalla portata ricircolata.

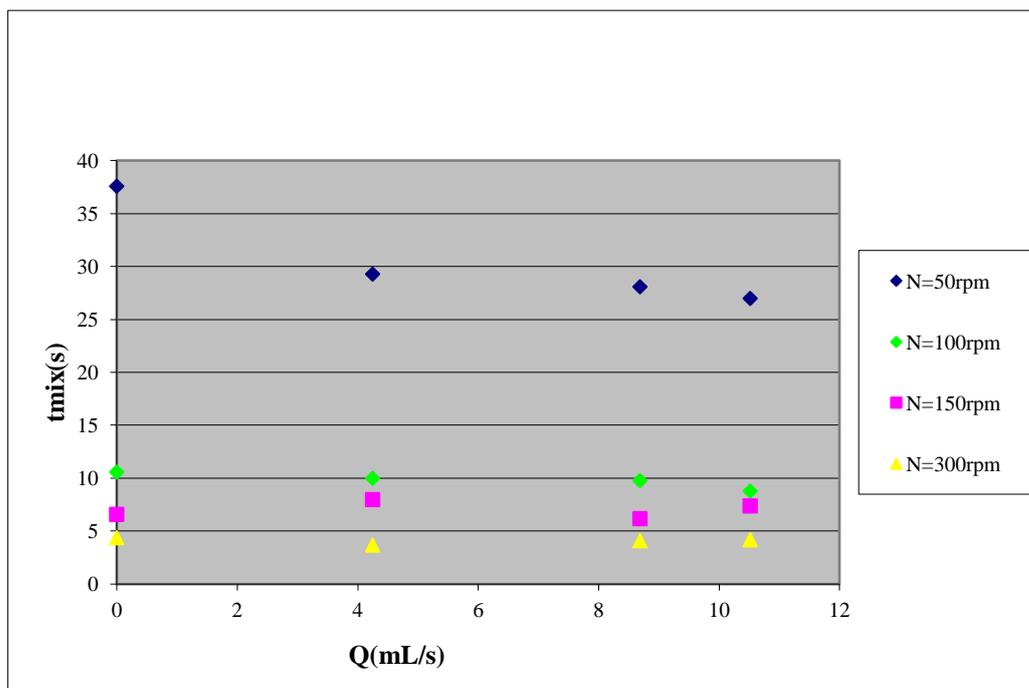


Fig. 6.10 Andamento dei t_{mix} in funzione di Q (mL/s), per tutte le velocità di agitazione esaminate.

Dalla fig. 6.10 emerge che il t_{mix} registrato a $N=50\text{rpm}$ è molto maggiore dei t_{mix} rilevati a velocità di agitazione maggiori. Questo fenomeno ha una duplice causa: da una parte il valore piuttosto elevato del t_{mix} è senza dubbio legato alla bassa velocità di agitazione, ma dall'altra è legato, come dimostrano le immagini (fig. 6.11), alla metodologia di iniezione del tracciante.

Infatti questo, per mezzo di una siringa graduata, viene iniettato dall'alto, in corrispondenza della sezione di imbocco, con una notevole velocità (per identificare poi con sicurezza il valore di t_{iniz}); di conseguenza il tracciante arriva immediatamente sul fondo, dove rimane per alcuni secondi in quanto, essendo la velocità della girante molto bassa, quest'ultima non riesce a tirarlo verso l'alto.

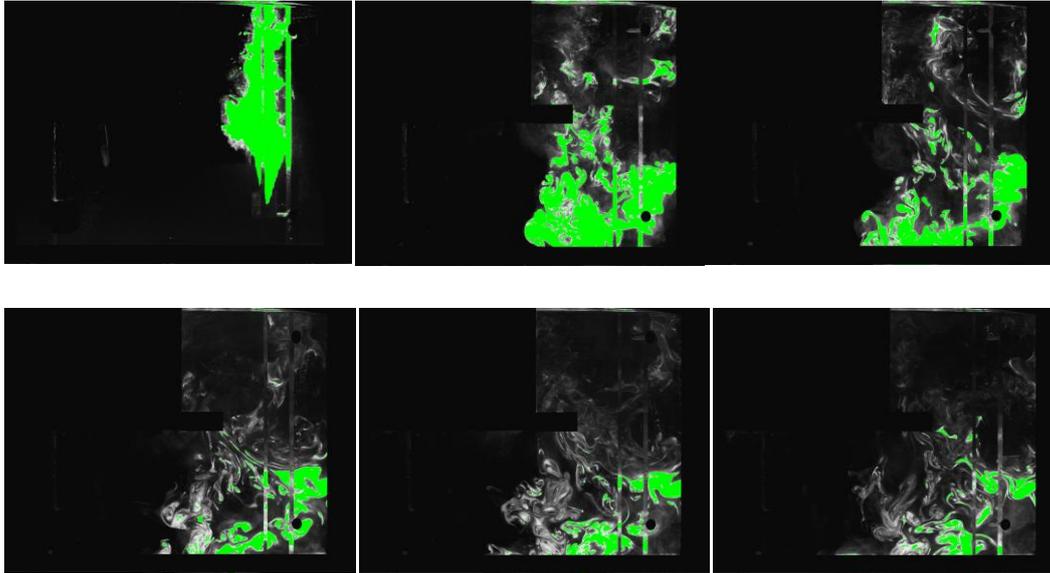


Fig. 6.11: Le immagini evidenziano la presenza di un fenomeno di ritenzione del tracciante sul fondo del reattore, cagione di un consistente aumento del valore di t_{mix} . Le immagini (da in alto a sinistra a in basso a destra) sono state registrate a: $t=t_0$; $t=1$ sec; $t=2$ sec; $t=3$ sec; $t=4$ sec; $t=5$ sec.

Per elevati valori della portata ricircolata, il fenomeno sopra descritto persiste, ma viene notevolmente attenuato in quanto il liquido ricircolato dalla pompa, in moto concorde con il tracciante, riesce a disperdere la Rhodamina- 6G in maniera più efficace.

6.3 Prove con turbina PBT down- pumping

Terminate le prove con la girante PBT- up pumping, è stato invertito il senso di rotazione dell'albero e la girante PBT ha indotto nel reattore un moto verso il basso.

6.3.1 Valutazione del t_{mix} a $N=50$ rpm

Le prove effettuate a con una velocità di agitazione $N=50$ rpm (fig. 5.11) evidenziano, in analogia con quanto già mostrato per le altre due giranti, una decisa influenza del liquido ricircolato sul tempo di omogeneizzazione. Ad ogni aumento della portata corrisponde dunque una diminuzione del t_{mix} , in quanto il liquido immesso trasferisce una potenza tale da consentire una migliore movimentazione del fluido all'interno del reattore.

Si parte da un valore del $t_{mix}=27,9$ s per $Q=0$ mL/s, per arrivare ad un $t_{mix}=22,8$ s in presenza di una portata del getto $Q=10,52$ mL/s. Ciò indica che una tale portata del getto induce una diminuzione del t_{mix} di circa il 19%.

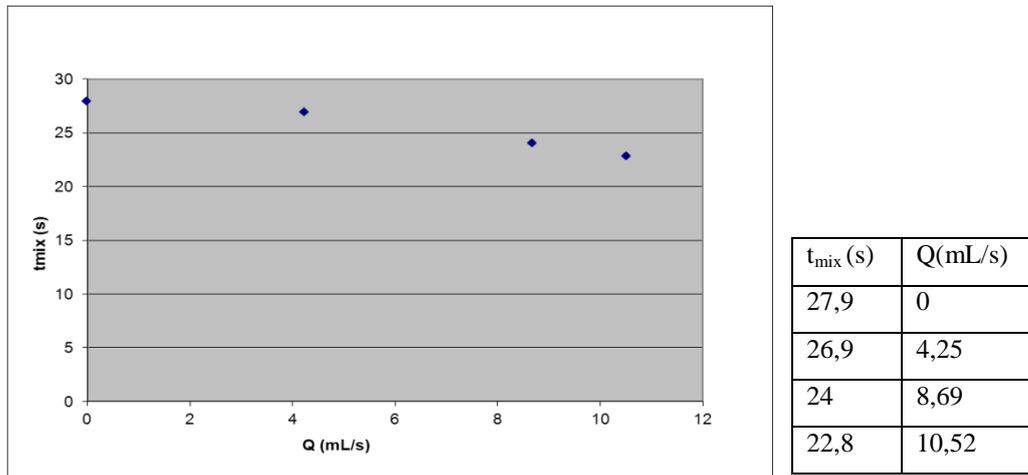


Fig. 6.12: Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di Q (mL/s) con velocità di agitazione $N=50$ rpm.

6.3.2 Valutazione del t_{mix} a $N=100$ rpm

Aumentando la velocità di agitazione a $N=100$ rpm si è può notare che il tempo di omogeneizzazione si riduce notevolmente rispetto al caso precedente. Parimenti, come si può ben vedere in fig. 6.13, già con $N=100$ rpm il tempo di omogeneizzazione diventa indipendente dalla portata del getto. Ciò è in contrasto con quanto rilevato per la girante Rushton e PBT up- pumping: questo diverso comportamento è probabilmente dovuto al diverso campo di moto che la girante PBT- down pumping genera nel reattore. Infatti nel paragrafo 5.3.2 si mostra come, nelle stesse condizioni sperimentali nel caso in questione, il getto della pompa (che nelle nostre misure PLIF coincide con l'iniezione del tracciante) entra facilmente nel campo di moto generato dalla girante: questo fattore può contribuire a diminuire la dipendenza del t_{mix} dalla portata del getto.

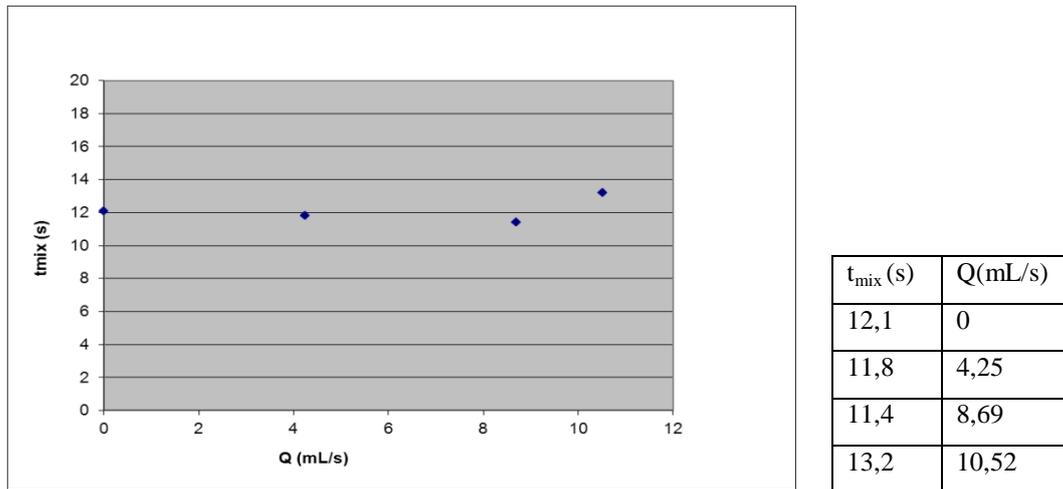


Fig.6.13:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di Q (mL/s) con velocità di agitazione $N=100$ rpm.

6.3.3 Valutazione del t_{mix} a $N=150$ rpm

L'aumento della velocità di agitazione a $N=150$ rpm ha comportato naturalmente una diminuzione del tempo di omogeneizzazione. Anche con questa girante, analogamente a quanto riscontrato con le altre due giranti studiate nel presente lavoro di tesi, si è riscontrata una indipendenza del valore di t_{mix} rispetto alla portata del getto. Ciò avviene in quanto la potenza che il getto trasferisce al fluido è trascurabile rispetto a quella trasferita dalla girante, e questa si traduce appunto in un'indipendenza del t_{mix} dalla portata del getto.

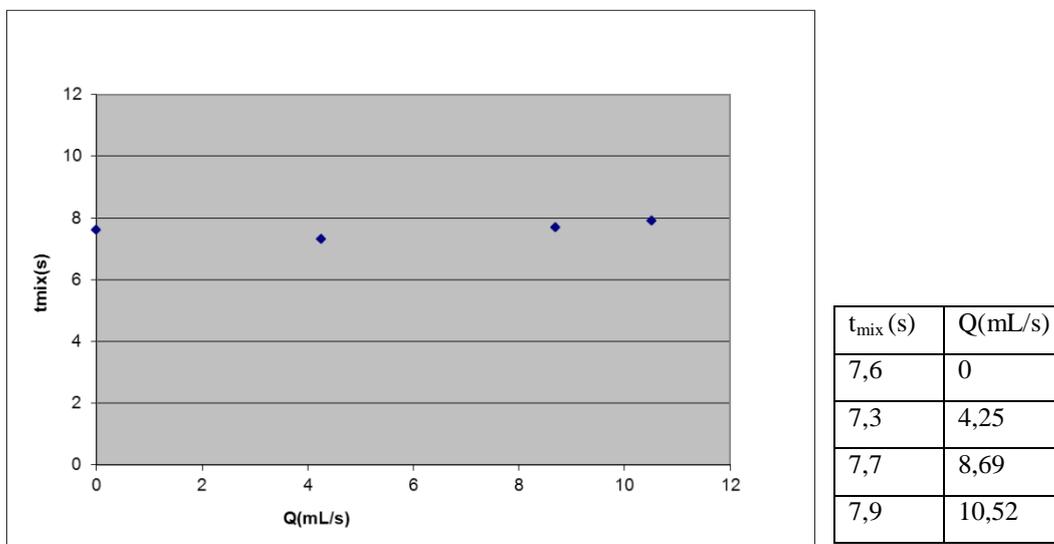


Fig.6.14:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di Q (mL/s) con velocità di agitazione $N=150$ rpm.

6.3.4 Valutazione del t_{mix} a $N=300rpm$

Aumentando la velocità di agitazione da $N=150rpm$ a $N=300rpm$, debbono farsi le stesse considerazioni riportate nel caso precedente. Il valore del t_{mix} diminuisce in maniera considerevole, e naturalmente i valori di t_{mix} registrati risultano essere del tutto indipendenti dalla portata del liquido ricircolato.

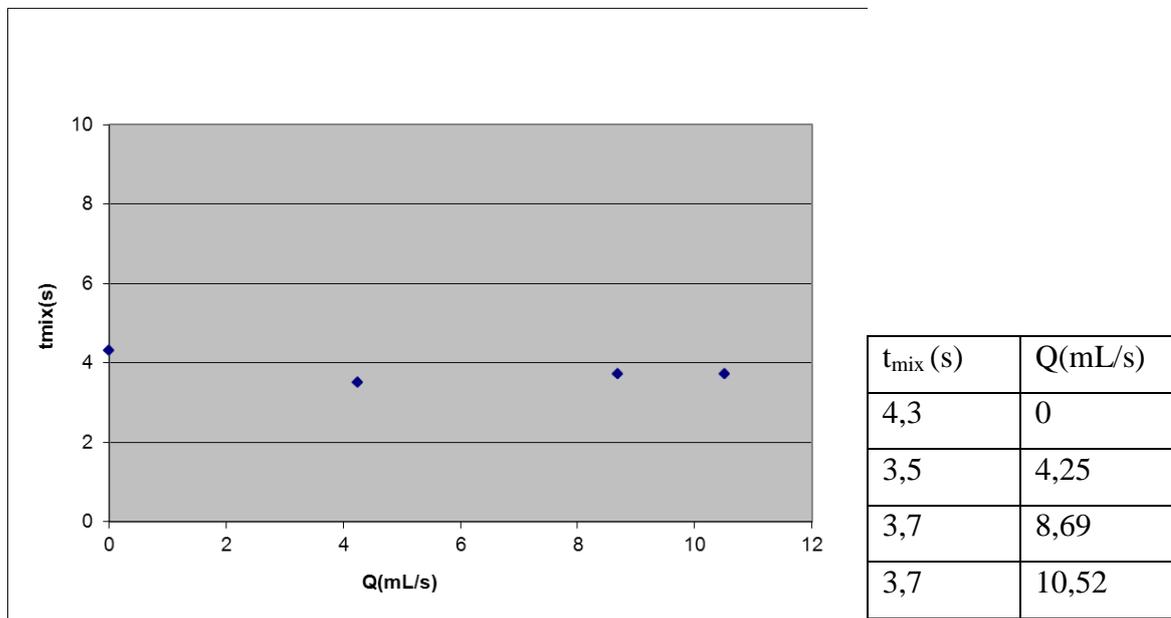


Fig.6.15:Grafico, con relativa tabella, che mostra i valori di t_{mix} (s) in funzione di Q (mL/s) con velocità di agitazione $N=300rpm$.

6.3.5 Confronto dei t_{mix} ottenuti per ciascuna velocità di agitazione

In fig. 6.16 vengono confrontati i valori dei t_{mix} registrati per ciascuna velocità di agitazione esaminata.

Oltre a registrare un andamento del valore di t_{mix} che diminuisce all'aumentare della velocità di agitazione, si può notare come i valori di t_{mix} ottenuti con $N=50rpm$ siano fortemente dipendenti dalla portata del getto. Questo fenomeno, come già spiegato nei paragrafi precedenti, è quasi irrilevante per velocità di agitazione maggiori in quanto la potenza che il liquido immesso fornisce al sistema è una frazione poco significativa rispetto a quella fornita dalla girante.

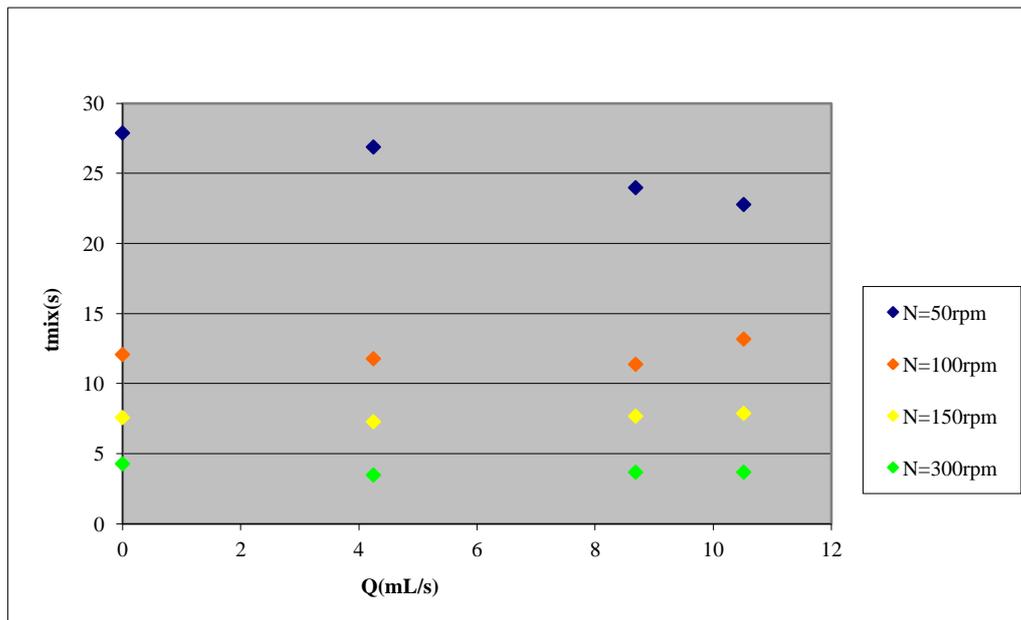


Fig. 6.16 Andamento dei t_{mix} in funzione di Q (mL/s) per tutte le velocità di agitazione esaminate.

7. ANALISI COMPARATIVA DEI t_{mix} OTTENUTI CON CIASCUNA GIRANTE

7.1 Analisi comparativa a $N=50\text{rpm}$

In figura 7.1 vengono illustrati i valori di t_{mix} in funzione della portata del getto, registrati con una velocità di agitazione pari a $N=50\text{rpm}$.

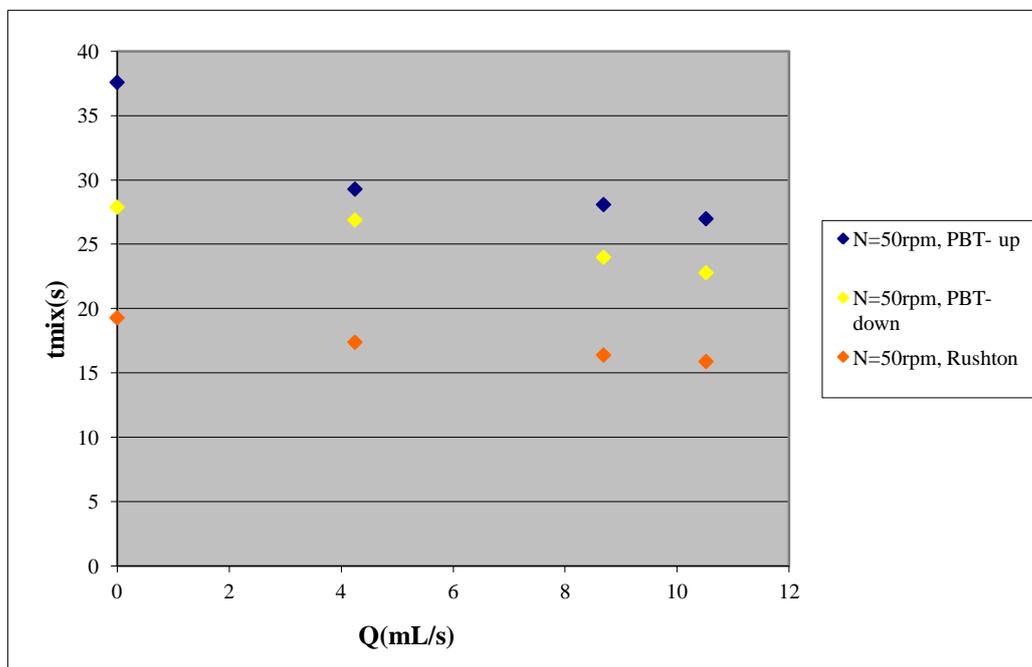


Fig. 7.1: Confronto dei profili dei t_{mix} (s) in funzione della portata del getto, con una rotazione dell'albero pari a $N=50\text{rpm}$.

Dal grafico emerge che ciascuna girante presenta un andamento dei t_{mix} dipendente dalla portata del getto: questo avviene in quanto la potenza che il getto trasferisce al sistema si traduce in una migliore movimentazione del fluido.

La girante Rushton presenta, a parità di portata del getto, un tempo di omogeneizzazione di gran lunga minore rispetto alle due giranti di tipo PBT. È da notare come questo comportamento si manifesta solo a velocità di agitazione molto basse.

Al contrario la girante PBT- up pumping presenta il tempo di omogeneizzazione più elevato perché, una volta iniettato, il tracciante permane alcuni secondi sul fondo del reattore (Fig. 6.11) sul fondo del reattore. Ciò avviene per tutti gli agitatori analizzati, ma nel caso della PBT- up pumping questo fatto diventa piuttosto importante: la girante

PBT- up pumping infatti (soprattutto in assenza di liquido ricircolato), a basse velocità di agitazione, non riesce a movimentare efficacemente il fondo del reattore.

7.2 Analisi comparativa con N=100rpm

In fig. 7.2 vengono illustrati i valori di t_{mix} in funzione della portata del getto, registrati con una velocità di agitazione pari a N=50rpm.

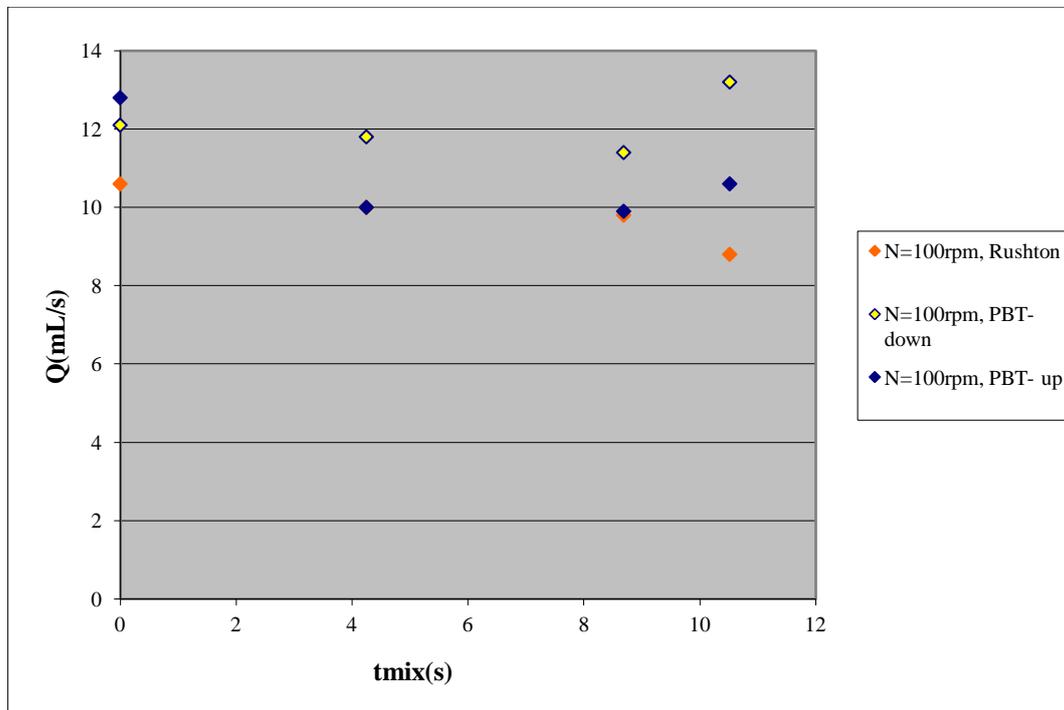


Fig.7.2:Confronto dei profili dei $t_{mix}(s)$ in funzione della portata del getto, con una rotazione dell'albero pari a N=100rpm.

Un aumento della velocità di agitazione a N=100rpm comporta, per tutte le giranti, una significativa diminuzione dei tempi di omogeneizzazione.

Tuttavia quando N=100rpm non tutte le giranti presentano lo stesso comportamento.

Le giranti Rushton e PBT up- pumping presentano un andamento dei tempi di omogeneizzazione dipendenti (seppur in maniera minore che a N=50rpm) della portata di liquido ricircolata.

Invece, come spiegato nel paragrafo 6.3.2, la girante PBT- down pumping presenta un andamento dei tempi di omogeneizzazione indipendente dalla portata trattata dalla pompa

7.3 Analisi comparative con N=150rpm e N=300rpm

In fig. 7.3 e 7.4 vengono confrontati gli andamenti dei tempi di omogeneizzazione in funzione della portata del getto ottenuti con ciascuna girante rispettivamente con N=150rpm e N=300rpm.

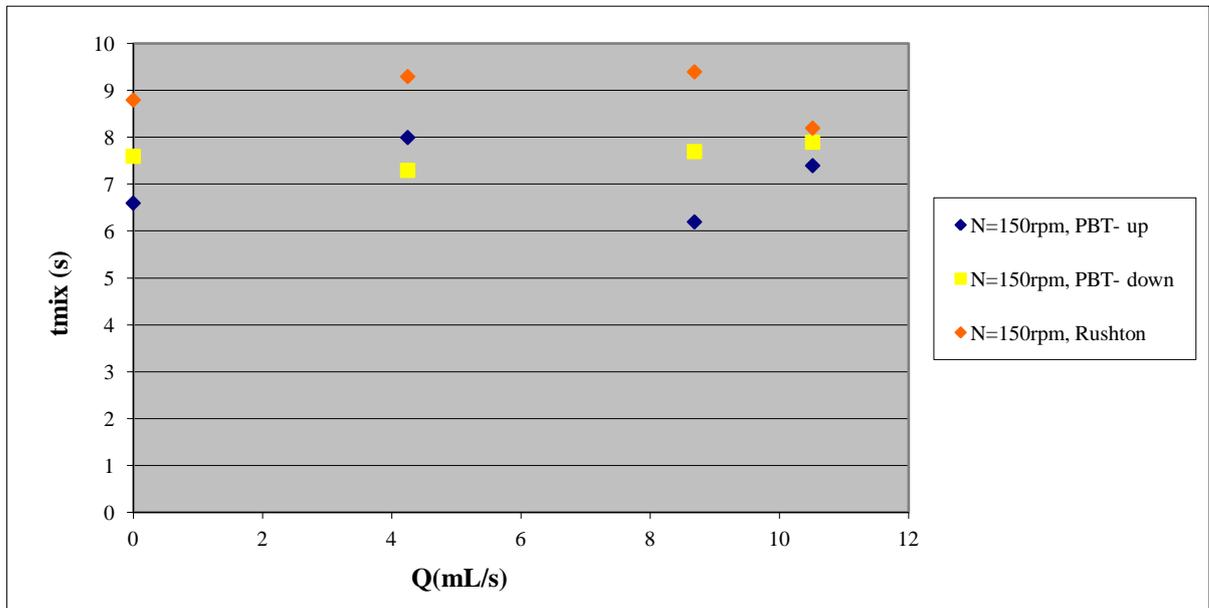


Fig.7.3:Confronto dei profili dei $t_{mix}(s)$ in funzione della portata del getto, con una rotazione dell'albero pari a N=150rpm.

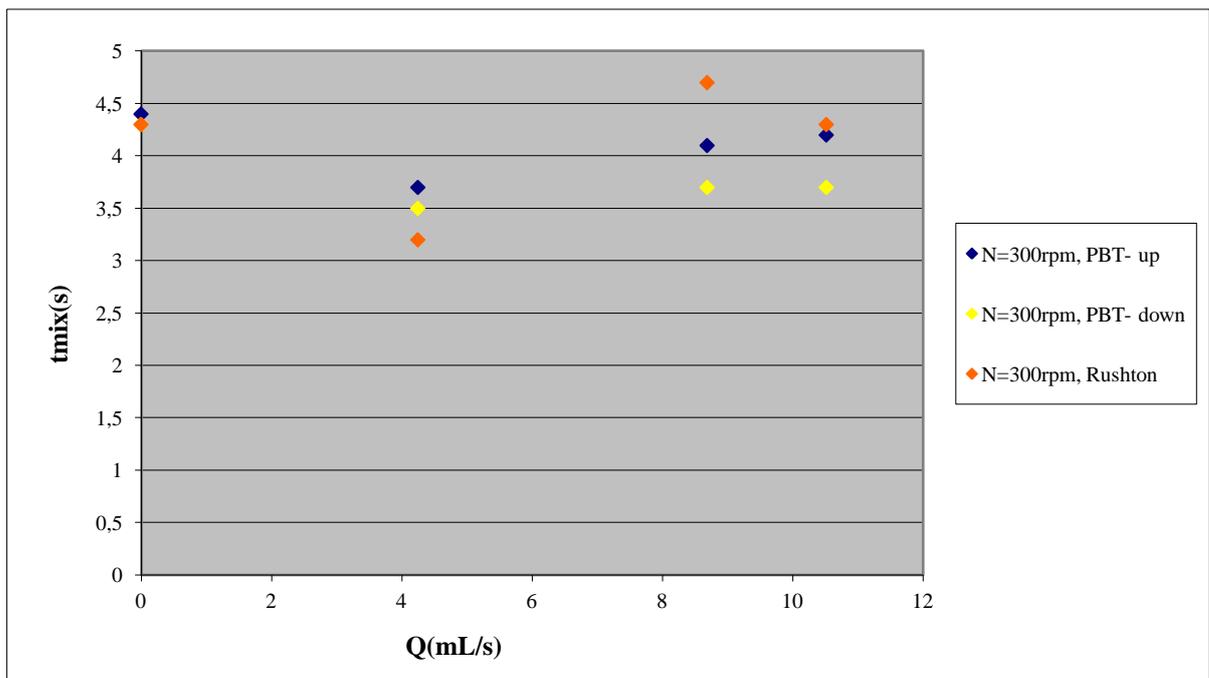


Fig. 7.4:Confronto dei profili dei $t_{mix}(s)$ in funzione della portata del getto, con una rotazione dell'albero pari a N=300rpm.

Tanto a $N=150\text{rpm}$, quanto a $N=300\text{rpm}$, tutte le giranti presentano tempi di omogeneizzazione piuttosto simili tra loro.

Come si evince dai grafici, sia a $N=150\text{rpm}$ che $N=300\text{rpm}$, tutte le giranti presentano andamenti dei tempi di omogeneizzazione indipendenti dalla portata di liquido ricircolata. Questa osservazione sperimentale è pienamente giustificata dal fatto che per velocità di agitazioni maggiori di $N=150\text{rpm}$, la potenza trasferita dal liquido ricircolato al reattore è una frazione poco significativa della potenza trasferita dall'agitatore.

7.4 Analisi e confronto delle potenze agenti sul sistema

Nella stesura della presente tesi sperimentale si è voluta dare una grande importanza a quei fattori che hanno determinato, in fin dei conti, la fluidodinamica del sistema: la potenza trasmessa dalla girante e la potenza trasmessa dalla pompa.

Come emerge dalla relazione 1.3, la potenza trasmessa dalla girante è espressa come:

$$P = N_p \rho D^5 N^3 \quad (7.1)$$

La potenza trasmessa invece dalla pompa è rappresentata dall'equazione 1.5 che, sostituita dalle relazioni 1.6 e 1.7, diventa:

$$W = S \cdot v \quad (7.2)$$

Dal calcolo della potenza monodimensionale su tutto il sistema emerge che la potenza trasferita al sistema dalla girante è, in ciascuna condizione operativa sottoposta ad analisi, molto maggiore della potenza trasferita al fluido dalla pompa. Da ciò si potrebbe desumere che la potenza trasferita dalla pompa è trascurabile e che quindi non dovrebbe influenzare la fluidodinamica del sistema. Tuttavia si è visto che i dati di “*mixing time*” dimostrino come questo sia vero solo per alti numeri di giri della girante. Infatti i dati raccolti sulle potenze semplificate non rappresentano ciò che accade nel sistema per basse velocità di agitazione: in questi caso occorrerebbero infatti non dati su tutto il sistema, ma dati locali sul campo di moto legati alla potenza locale dissipata.

In altre parole, se valutiamo la potenza trasferita dal getto su tutto il corpo del reattore, questa risulta irrisoria in quanto vengono valutate zone del reattore molto lontane dall'imbocco del getto; se invece vengono considerate esclusivamente le zone del

reattore contigue all'imbocco del getto emerge chiaramente come questo sia in grado di trasferire una potenza tale da migliorare notevolmente la movimentazione del sistema.

7.5 Tecnica PLIF. Considerazioni finali

Dallo studio condotto nel presente lavoro di tesi si deduce che il tempo di omogeneizzazione di un sistema dipende da diversi fattori.

Certamente il fattore che più influenza il tempo che un sistema impiega a miscelarsi perfettamente è la velocità di rotazione della girante. Nel caso di reattori operanti con una reimmissione di liquido l'effetto di questa portata non è però trascurabile nel caso di basse velocità di agitazione.

L'influenza del ricircolo indotto dalla pompa sul campo di moto medio è stato quantificato analizzando la variazione di velocità assiale in funzione del rapporto tra le potenze della pompa e della girante: ciò ha permesso di determinare il rapporto minimo delle potenze necessario per rendere significativa l'influenza della pompa.

Per fare ciò è stata calcolata una varianza "S" tra il valori di t_{mix} rilevato alla portata Q e il t_{mix} misurato alla portata $Q=0$ mL/s:

$$S = \frac{t_Q - t_{Q=0}}{t_{Q=0}} \quad (7.3)$$

dove t_Q rappresenta il t_{mix} rilevato alla portata Q, e $t_{Q=0}$ indica il t_{mix} relativo alla portata $Q=0$ mL/s.

I valori trovati sono funzione del rapporto tra le potenze della pompa (relazione 7.2) e la potenza della girante (relazione 7.1). Dalla figura 7.5 si può notare che:

- Il liquido ricircolato dalla pompa comporta una variazione sostanziale del tempo di completa miscelazione già per rapporti di potenza pompa/girante molto bassi. Man mano che questo rapporto sale, la varianza tende a diventare costante. Ciò indica che per indurre una variazione del valore di t_{mix} basta ricircolare portate di liquido modeste.
- Per bassi rapporti di potenza pompa/ turbina, tutti gli agitatori si comportano allo stesso modo. Variazioni sostanziali tra le tre tipologie di turbine prese in esame si notano solo per rapporti di potenza maggiori.

- Le turbine Rushton e PBT- up pumping presentano performance paragonabili, mentre la PBT down- pumping sembra risentire meno del ricircolo indotto dalla pompa.

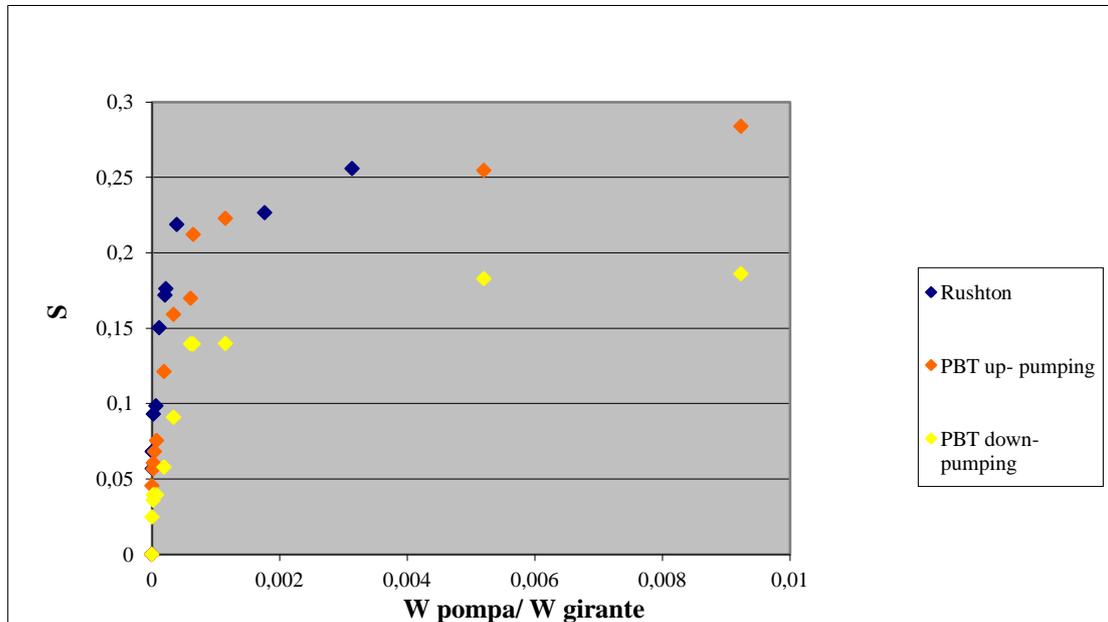


Fig. 7.5: Varianza S in funzione del rapporto W pompa/ W girante per ciascuna delle giranti utilizzate. La curva relativa alla girante Rushton termina a rapporti di potenza minori in quanto la potenza da essa fornita è maggiore.

Nella figura 7.6 le varianze trovate sono funzione del rapporto tra la portata indotta dalla pompa e la portata movimentata dalla girante (relazione 7.4).

$$(7.4)$$

Anche in questo caso si può notare come variazioni sostanziali del t_{mix} si hanno già per rapporti di portata pompa/ girante abbastanza bassi. All'aumentare della portata di liquido ricircolata l'influenza di quest'ultimo sul t_{mix} aumenta in maniera meno considerevole.

Se si esamina la curva relativa alla PBT down- pumping si può notare come la varianza abbia cominciato ad assumere un andamento pressoché costante rispetto al rapporto tra le portate.

Questo indica che non si può abbassare oltre un certo valore critico il tempo di miscelamento di un reattore agendo solo sulla portata del liquido ricircolato.

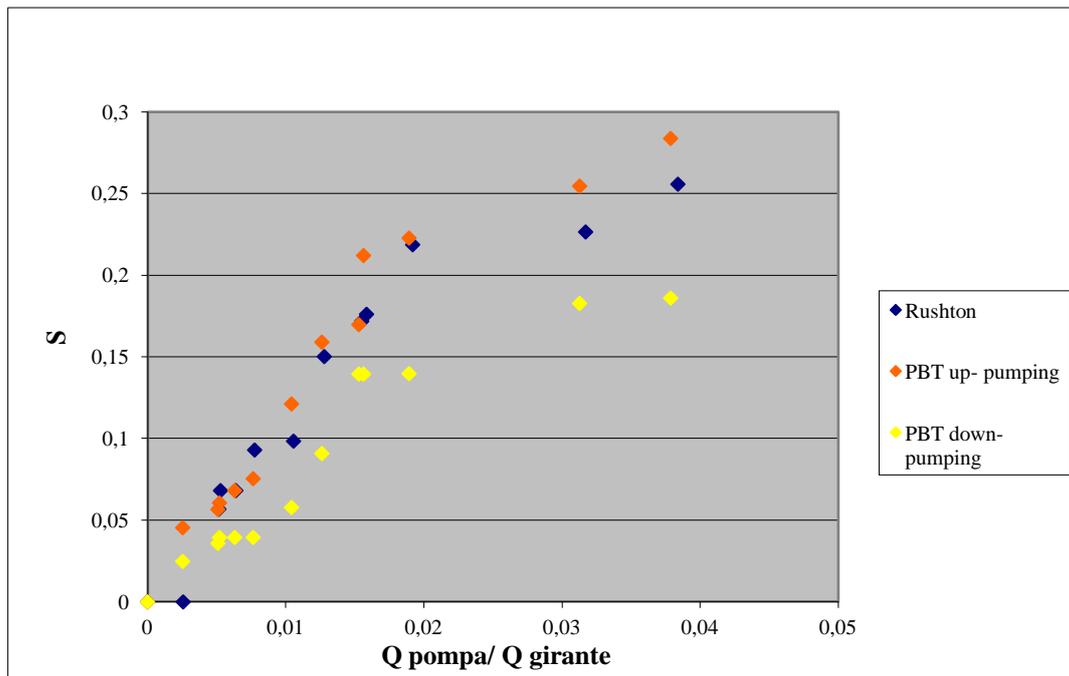


Fig. 7.6: Varianza S in funzione del rapporto Q pompa/Q girante per ciascuna delle giranti utilizzate. Le tre curve questa volta terminano per valori uguali del rapporto Q pompa/Q girante in quanto Rushton e PBT presentano capacità di pompaggio paragonabili.

Infine anche il modo in cui si inietta il tracciante può influenzare il t_{mix} : si è visto come, a causa del diverso campo di moto che ciascuna girante provoca, il modus operandi scelto si ripercuote negativamente sulle prestazioni della girante PBT- up pumping, mentre risulta essere indifferente per le altre due giranti.

8. CONCLUSIONE

Lo sviluppo delle tecniche PIV e PLIF ha fornito uno strumento d'analisi potente e non invasivo per la caratterizzazione fluidodinamica locale degli apparati e in particolare per la determinazione di importanti parametri operativi utili per l'ottimizzazione dei reattori agitati.

In questo lavoro di tesi, svolto presso il DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali), tali tecniche sono state utilizzate per caratterizzare il campo di moto e il tempo di completa miscelazione di un reattore monofase continuo agitato meccanicamente equipaggiato con tre diverse tipologie di agitatori.

Il campo di moto medio del fluido è stato misurato in un piano selezionato all'interno del reattore al variare della velocità di agitazione e della portata di ricircolo. I risultati sperimentali hanno consentito di determinare sia le caratteristiche del campo di moto medio in tutte le configurazioni indagate sia la dinamica di omogeneizzazione determinando la dispersione di un tracciante (alimentato in testa) ed il tempo di miscelazione del sistema.

In conclusione, le tecniche sperimentali adottate hanno consentito una caratterizzazione completa del reattore continuo agitato meccanicamente oggetto dello studio e un pieno raggiungimento degli obiettivi preposti.

9. BIBLIOGRAFIA

- (1) Doran P.M., "Bioprocess Engineering Principles", Elsevier Science, Academic Press (1995).
- (2) Paul E.L., Atiemo- Oberg V.A., Kresta S.M., "*Handbook of industrial mixing. Science and practice*". Wiley- Interscience, Wiley Editore (2004).
- (3) Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., "Fenomeni di trasporto", Casa editrice Ambrosiana-Milano (1979).
- (4) Raffael M., Willer C.E., Kompenhans J. "*Particle Image Velocimetry – A practical guide*" Springer Editore (1998).
- (5) Grant I., "*Particle Image Velocimetry- a review*", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 211, 1, 55 (1997) .
- (6) Hu Y., Liu Z., Yang J., Cheng., "*Study on the reactive mixing processes in an unbaffled stirred tank using planar laser- induced fluorescence (PLIF) technique*", Chemical Engineering Science 4511- 4518 (2010).
- (7) Fall A., Lecoq O., David R., "*Characterization of mixing in a stirred tank by laser-induced fluorescence (P.L.I.F.)*" Chemical Engineering Research and Design 79, 876-882 (2001).
- (8) Ugolini G., "*Caratterizzazione fluidodinamica di un bioreattore modello*", tesi di laurea specialistica in Ingegneria Chimica e di processo, A.A. 2010- 2011, Università degli studi di Bologna.
- (9) Arthur W. Etchells, Chris F. Meyer. "*Handbook of Industrial Mixing Science and Practice*". Wiley- Interscience, Wiley Editore , 410-415, (2004).
- (10) Gomez C., Bennington C.P.J., Taghipour F., "*Investigation of the Flow Field in a rectangular Vessel Equipped With a Side- Entering Agitator*", Journal of Fluid Engineering, Vol. 132, 05/2010.