

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

FACOLTÀ DI CHIMICA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Chimica Industriale
Classe LM-71 – Scienze e Tecnologie della Chimica Industriale

**CARATTERIZZAZIONE DEL
COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DI
REATTORI AGITATI TRAMITE TECNICHE
DI DIAGNOSTICA OTTICA**

Tesi di laurea sperimentale

Presentata da

**Elena Serafini
Montante**

Relatore

Prof. ssa Giuseppina

Correlatore

Prof. Alessandro Paglianti

II sessione

Anno Accademico 2011/2012

INDICE

INTRODUZIONE	1
1 LA MISCELAZIONE IN REATTORI AGITATI	2
1.1 TIPOLOGIE DI AGITATORI	4
1.1.1 AGITATORI VELOCI	4
1.1.2 AGITATORI LENTI	9
1.2 PARAMETRI CARATTERISTICI DEGLI AGITATORI	11
1.2.1 POTENZA DISSIPATA	12
1.2.2 VELOCITÀ DEL BORDO DELLA GIRANTE	16
1.2.3 CAPACITÀ DI POMPAGGIO	16
1.2.4 TEMPO DI MISCELAZIONE	18
1.3 FLUIDODINAMICA DEI SISTEMI AGITATI	20
1.3.1 CAMPI DI MOTO IN SISTEMI MONOFASICI DI BASSA VISCOSITÀ	21
1.3.2 CAMPI DI MOTO IN SISTEMI MONOFASICI MULTIGIRANTE	25
2 TECNICHE DI MISURA E STRUMENTAZIONE	26
2.1 LA TECNICA PIV IN SISTEMI MONOFASE	26
2.1.1 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DELLA PIV IN SISTEMI MONOFASE	27
2.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO E CLASSIFICAZIONE DEI LASER	29
2.3 LE TELECAMERE	31
2.4 PARTICELLE TRACCIANTI	32
2.5 LA TECNICA PLIF	34
2.5.1 TRACCIANTI FLUORESCENTI	35
2.5.2 TRACCIANTI UTILIZZATI PER MISURE DI CONCENTRAZIONE IN LIQUIDI	36
2.5.3 PROCEDURA DI ACQUISIZIONE	37
2.6 TORSIOMETRO	37
3 CONFIGURAZIONI INDAGATE ED ACQUISIZIONE DEI DATI	39
3.1 REATTORE AGITATO MECCANICAMENTE DI GEOMETRIA STANDARD	39
3.2 REATTORE DI “SCALE DOWN” INDUSTRIALE CON GIRANTI A310	41
3.3 ACQUISIZIONE DEI DATI	43
3.3.1 ACQUISIZIONI CON LA TECNICA PIV	43
3.3.2 ACQUISIZIONI CON LA TECNICA PLIF	47
4 PROCEDURA PER L’ELABORAZIONE DEI DATI	48
4.1 ELABORAZIONI DELLE IMMAGINI PIV	48
4.2 SISTEMA DI RIFERIMENTO ADOTTATO PER IL REATTORE DI GEOMETRIA STANDARD E NON STANDARD	50
4.3 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI PLIF	52
5 RISULTATI SPERIMENTALI	54
5.1 MISURE PRELIMINARI E IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DI MISURA NEL REATTORE DI GEOMETRIA STANDARD	54
5.1.1 TEMPO TRA I PULSI DEL LASER	54
5.1.2 OTTIMIZZAZIONE DEL NUMERO DI IMMAGINI	58

5.2	ANALISI DEL CAMPO DI VELOCITÀ NEL REATTORE DI GEOMETRIA STANDARD	59
5.3	ANALISI DEL CAMPO DI VELOCITÀ DEL REATTORE SENZA SETTI FRANGIVORTICE	61
5.3.1	MISURE SU PIANO ORIZZONTALE – REATTORE SENZA SETTI FRANGIVORTICE	61
5.4	REATTORE DI GEOMETRIA NON STANDARD	63
5.4.1	MISURE DI POTENZA	63
5.4.2	INDAGINI VISIVE	64
5.4.3	MISURE FLUIDODINAMICHE LOCALI	65
5.4.4	MISURE PER LA QUALITÀ DELLA MISCELAZIONE	69
6	CONCLUSIONI	72
7	BIBLIOGRAFIA	73

INTRODUZIONE

La produzione di biogas dalla digestione anaerobica di scarti organici, in particolare di origine agro-alimentare, ha guadagnato recentemente una considerevole attenzione a causa del crescente interesse per le fonti di energia rinnovabili. Una completa comprensione del processo e della 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. L'applicazione industriale e l'economicità complessiva di simili processi può essere migliorata agendo su vari aspetti, tra i quali quelli associati alle caratteristiche fluidodinamiche che dipendono dalla configurazione geometrica e dalle condizioni operative del bioreattore.

Per ottimizzare il progetto dei bioreattori bisogna tenere in considerazione vari fattori mirati a garantire un tasso elevato continuo e sostenibile di carico organico, un breve tempo di ritenzione idraulica e a massimizzare la quantità di metano prodotto minimizzando il consumo energetico del processo.

Nei bioreattori industriali la miscelazione è tipicamente ottenuta tramite agitazione meccanica. Per reattori di volume molto elevato, le caratteristiche fluidodinamiche possono essere tutt'altro che omogenee. La miscelazione, buona in prossimità degli agitatori, può invece essere inadeguata in particolare in prossimità delle pareti fisse del reattore, dove, se si formano zone quasi stagnanti, si ha accumulo di materiale solido che riduce il volume utile del digestore nel tempo aumentando la necessità di manutenzione e i tempi di inattività.⁽¹⁾

La miscelazione non avviene sempre in modo continuo, è spesso intermittente e può essere attiva più volte al giorno o più volte ogni ora, con input energetici che variano da $10-100 \text{ W h m}^{-3}$, a seconda del tipo di reattore, del tipo di agitatore utilizzato, e del valore totale di solidi della materia prima⁽²⁾. La tipologia di bioreattori agitati può variare notevolmente con importanti impatti sul processo di digestione e sui costi fissi ed operativi. Pertanto il progetto del sistema di miscelazione avrà un impatto importante in termini di produttività e costi.

Un certo grado di miscelazione è necessario per mettere a contatto il substrato e i batteri, ma un'eccessiva miscelazione può ridurre la produzione di biogas⁽³⁾. Di conseguenza, per ottimizzare le prestazioni di un processo di produzione di biogas, sono richiesti

appropriati metodi di progettazione che devono essere sviluppati sulla base di una comprensione globale della fluidodinamica del reattore. Lo scopo di questo lavoro di tesi è la caratterizzazione sperimentale di reattori agitati meccanicamente tramite l'impiego di tecniche di diagnostica ottica, che consentono di ottenere informazioni locali sul funzionamento degli apparati.

1 LA MISCELAZIONE IN REATTORI AGITATI

La miscelazione, sinteticamente indicata nella letteratura internazionale con il termine “mixing”, è una delle operazioni unitarie di più ampio impiego nell'industria chimica di processo. L'obiettivo della miscelazione è diminuire il grado di disomogeneità delle grandezze scalari e delle fasi presenti all'interno del sistema preso in esame: tale obiettivo viene spesso raggiunto impiegando l'agitazione meccanica che consente di movimentare il materiale da un punto all'altro del sistema attraverso l'uso di pale rotanti opportunamente sagomate. Oltre ad aumentare l'omogeneità del sistema (sia esso mono-, bi- o tri-fase), tale operazione è utilizzata anche per promuovere il trasporto di materia e lo scambio di calore, specie in sistemi reagenti.^(4,5)

In questo capitolo vengono descritti i componenti principali di un reattore agitato meccanicamente e i parametri caratteristici con i quali viene descritta l'operazione limitandoci a considerare i sistemi di geometria semplice presi come riferimento negli studi sulla miscelazione.

Il tipico sistema in cui viene realizzata l'operazione di miscelazione è costituito da un recipiente cilindrico verticale, spesso con il fondo bombato e provvisto di setti frangivortice, da un dispositivo per l'agitazione, da condotti di uscita ed entrata che permettono l'alimentazione ed il prelievo di materia ed, eventualmente, da apparati che provvedono allo scambio termico. A causa delle numerose tipologie di processo a cui si devono adattare e poiché risultano essere molteplici gli obiettivi che si prefiggono di raggiungere, numerose risultano essere le geometrie sviluppate per lo studio della miscelazione: esse riguardano sia la forma del reattore (generalmente cilindrico ad asse verticale), sia la geometria del sistema di agitazione che provvede al mescolamento, sia il posizionamento del sistema di agitazione all'interno del reattore.

I sistemi di miscelazione devono garantire almeno una delle seguenti caratteristiche fluidodinamiche:

- ✓ La presenza di un moto convettivo che impedisca la formazione di zone stagnanti all'interno del sistema da miscelare.
- ✓ La presenza di zone ad un elevato sforzo di taglio ("shear") in modo da favorire la creazione di forti disomogeneità.

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

Generalmente, nelle applicazioni a viscosità medio-bassa e alle usuali velocità di rotazione dei sistemi di agitazione, il moto è turbolento (condizione di moto irregolare, in cui le varie grandezze sono caratterizzate da variazioni casuali nel tempo e nello spazio). In queste condizioni il momento trasmesso dall'agitatore al liquido è sufficiente affinché esso circoli nel reattore e ritorni all'agitatore stesso. In questa condizione i processi diffusivi turbolenti risultano presenti in tutto il reattore, ma sono massimi nelle vicinanze dell'agitatore. Al contrario, nel regime laminare il moto è regolare, senza la presenza di vortici. Risulta ovvio che i fenomeni di miscelazione in regime turbolento siano molto più consistenti di quelli presenti nel moto laminare e pertanto la caratterizzazione del moto turbolento in un reattore agitato riveste particolare importanza applicativa.

La descrizione del moto turbolento e il calcolo del campo di moto in un sistema agitato risulta complessa. Nel 1922 Richardson^(5,6), 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, cioè che dai vortici più grandi prodotti dall'agitazione si producessero vortici più piccoli con trasferimento di energia cinetica, vortici che a loro volta generavano vortici ancora più piccoli fino al momento in cui le dimensioni non fossero state tali da permettere alle forze viscosive 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 prevalgono gli effetti viscosi (dissipativi e ad azione locale sui singoli vortici) sugli effetti non lineari (responsabili del trasferimento di energia tra i vortici).

Una stima quantitativa si può fare ricorrendo alla teoria dell' "equilibrio universale" di Kolmogorov^(5,6), 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 (effetti inerziali » effetti 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)⁽⁵⁾:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{0,25} \quad u_\eta = (\nu\varepsilon)^{0,25} \quad t_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{0,5} \quad (1.1)$$

dove η = lunghezza caratteristica dei vortici dissipativi di Kolmogorov; u_η = velocità caratteristica; t_η = 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

Una prima classificazione divide i 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 in condizioni normali di impiego. Di seguito vengono descritte le caratteristiche di alcuni degli agitatori maggiormente utilizzati.

1.1.1 Agitatori veloci

Sono caratterizzati da un rapporto 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 sistema, è necessario lavorare a velocità di rotazione relativamente alte.

Usualmente, con questi tipi di agitatori, il reattore viene provvisto di setti frangivortice verticali (“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 dell’altezza del reattore) ancorati direttamente alla parete del recipiente. 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 quindi distinti in:

- ✓ **“Shear-sensitive processes”**: si tratta di processi che coinvolgono due o più fasi (ad esempio, la dispersione di un gas o di un liquido in un altro liquido, lo scambio di materia tra fasi, ecc.), favoriti da elevati gradienti di velocità.
- ✓ **“Flow-sensitive processes”**: si tratta di processi di scambio di calore, operazioni 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 e più particolareggiata 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 tubo di spinta ("draft tube") che impedisce il flusso radiale. Vengono principalmente utilizzati in processi di miscelazione "blending", di sospensione dei solidi e di scambio di calore. In Figura 1.1 vengono riportati degli esempi di agitatori a flusso assiale.

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

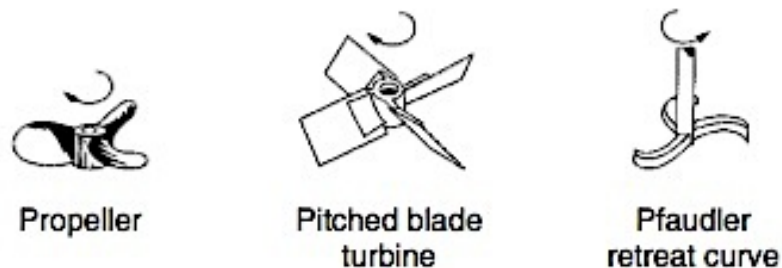


Figura 1.1 Agitatori veloci a flusso assiale (Paul E.L., et al., 2004)

Una turbina a pale inclinate (PBT, acronimo di Pitched-Blade Turbine) è costituita da un mozzo a cui vengono saldate un numero pari di pale che possono avere un'inclinazione compresa tra i 30° e i 60° sull'orizzontale (la configurazione più diffusa è quella con le pale inclinate a 45°). Il flusso prodotto da questo tipo di agitatore non è completamente assiale, ma possiede anche un più modesto contributo radiale: per questo è anche definito come agitatore di tipo misto.

Un agitatore particolare 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 (Figura 1.2), a parte la componente tangenziale, è essenzialmente radiale. Essi vengono utilizzati in tutti quei processi in cui 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; quelli invece provvisti di disco producono un flusso radiale più definito, con maggiore consumo di potenza. Un classico esempio di agitatore con disco è la turbina Rushton che nella versione standard ha 6 pale piatte di lunghezza $D/4$, larghezza $D/5$ e con un diametro del disco di $3/4 D$.

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 offrono una migliore capacità di dispersione del gas, e quindi possono trattare, senza che si instaurino fenomeni di ingolfamento, a maggiore portata di gas rispetto alle normali turbine Rushton. Le pale, viste in sezione, possono essere sia di forma semi-circolare che di forma parabolica, simmetriche o asimmetriche.

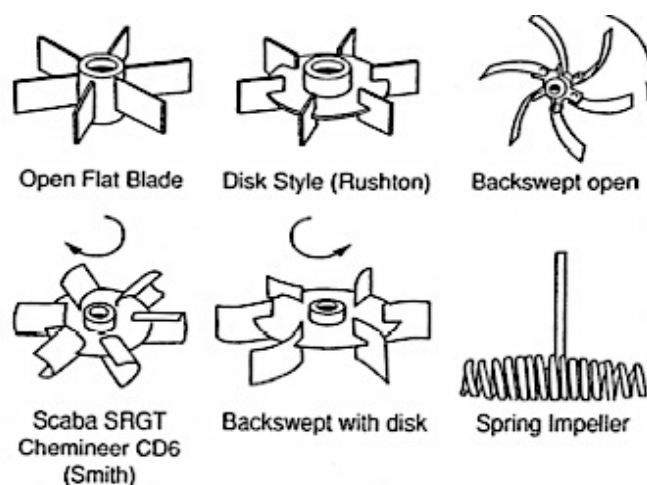


Figura 1.2 Agitatori a flusso radiale, (Paul E.L., et al., 2004)

Gli agitatori a molla o a spirale (di uso raro) sono stati invece sviluppati per quei processi solido-liquido densi: se un agitatore di questo tipo si trova sommerso dal solido, può essere estratto senza di rischio di rotture meccaniche.

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” (Figura 1.3). Sono formati, in generale, da 3 o 4 pale affusolate con un profilo aerodinamico di inclinazione variabile lungo l’asse della pala. 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 superiore rispetto ad una PBT. Agitatori quali Lightnin 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 sono molto efficienti nella sospensione di solidi e nel mescolamento di liquidi.

Lightnin 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 due processi precedenti. L’agitatore bilama INTERPROP è progettato con un alto angolo di attacco della pala, con un’addizionale doppia pala alle due 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.

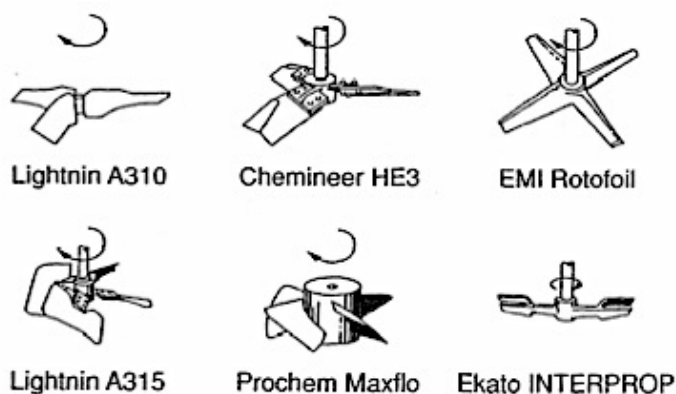


Figura 1.3 Agitatori veloci Hydrofoil, (Paul E.L., et al., 2004)

1.1.1.4 Agitatori ad alto “shear”

Lavorano ad alta velocità di rotazione e sono utilizzati per l’aggiunta di una seconda fase in processi di frantumazione, di dispersione di pigmenti e di creazioni di emulsioni. Questi agitatori (Figura 1.4) hanno una bassa capacità di pompaggio e quindi vengono spesso accoppiati ad agitatori assiali per garantire un alto “shear” ad un buon grado di miscelamento.

Passando dalla turbina a barre a quella a dente di sega, lo “shear” che la turbina riesce a produrre aumenta fino ad avere un’altissima turbolenza nelle vicinanze dell’agitatore.

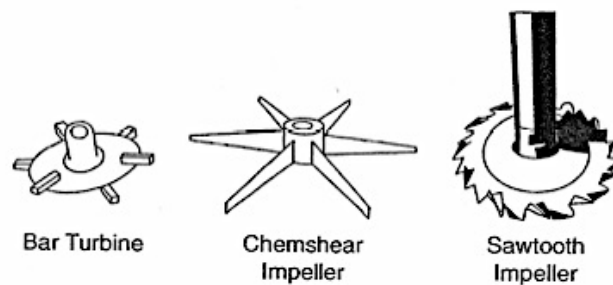


Figura 1.4 Agitatori ad alto "shear", (Paul E.L., et al., 2004)

1.1.2 Agitatori lenti

Sono caratterizzati da un rapporto D/T prossimo all’unità e vengono installati in recipienti 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 secondari. I tipici agitatori di questa categoria sono quelli ad ancora e a gabbia (Figura 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 cala e alla parete l'agitatore "slitta" nel liquido. Quando si deve garantire uno scambio di calore buono alla parete con un buon miscelamento, le pale dell'ancora vengono provviste di un coltello-raschiatore (wiper) che provvede a ripulire la parete.

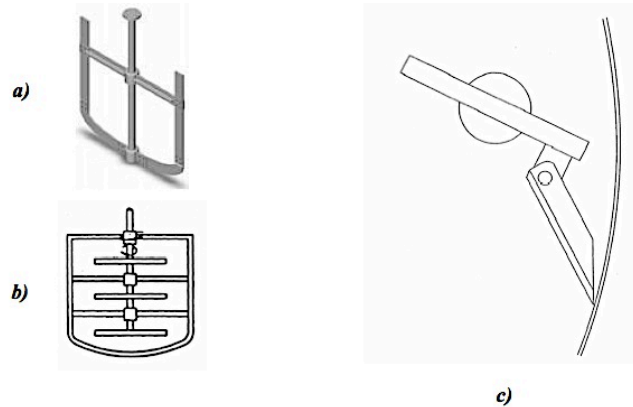


Figura 1.5 Agitatori lenti "tangenziali puri": a) ancora; b) gabbia; c)wiper (Paul E.L., et al., 2004)

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 (Figura 1.6).

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

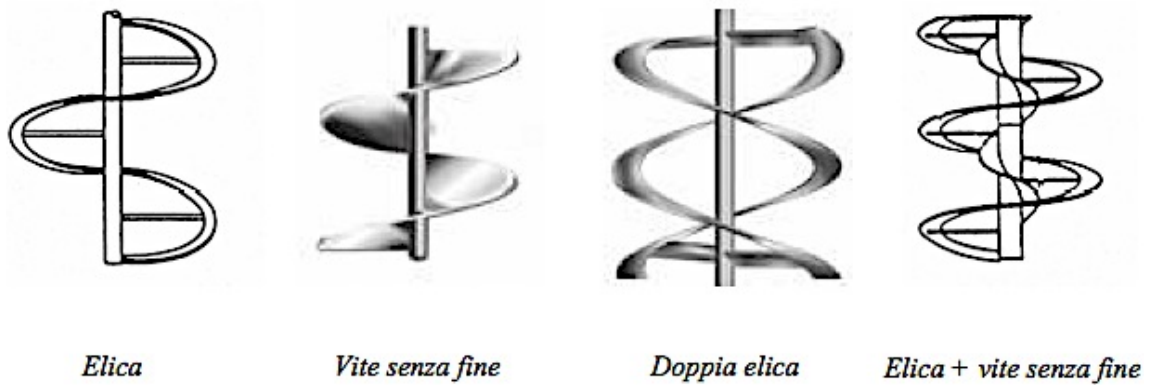


Figura 1.6 Agitatori lenti ad elica, (Paul E.L., et al., 2004)

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

L’equazione fondamentale che rappresenta la conservazione di quantità di moto in un sistema viscoso Newtoniano incomprimibile è l’equazione di Navier-Stokes⁽⁶⁾:

$$\rho \frac{D\underline{v}}{Dt} = -\underline{\nabla}p + \mu \underline{\nabla}^2 \underline{v} + \rho \underline{g} \quad (1.2)$$

dove \underline{v} è il vettore velocità, t è il tempo, p è la pressione, \underline{g} è l’accelerazione di gravità.

Adimensionalizzando con il diametro della girante D ed il numero di giri N , si ottiene:

$$x^* = \frac{x}{D}; \quad y^* = \frac{y}{D}; \quad z^* = \frac{z}{D}; \quad t^* = tN; \quad \underline{v}^* = \frac{\underline{v}}{ND}; \quad p^* = \frac{(p - p_0)}{\rho N^2 D^2} \quad (1.3)$$

$$\frac{D\underline{v}^*}{Dt^*} = -\underline{\nabla}^* p^* + \left[\frac{\mu}{ND^2 \rho} \right] \underline{\nabla}^{*2} \underline{v}^* + \left[\frac{\underline{g}}{N^2 D} \right] \frac{\underline{g}}{g}$$

Nell’equazione si può notare la presenza di due numeri adimensionali⁽⁵⁾:

- ✓ Numero di Reynolds rotazionale : $Re = \frac{\rho ND}{\mu}$
- ✓ Numero di Froude rotazionale : $Fr = \frac{DN^2}{g}$

Per sistemi geometricamente simili è possibile determinare le distribuzioni di pressione e velocità adimensionali come funzione del numero di Reynolds e del numero di Froude.

$$\begin{aligned} v^*(x^*, y^*, z^*, t^*) &= f(Re, Fr) \\ p^*(x^*, y^*, z^*, t^*) &= f(Re, Fr) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Quando il pelo libero del liquido risulta piatto, la dipendenza da Fr scompare e quindi si ottiene:

$$\begin{aligned} v^*(x^*, y^*, z^*, t^*) &= f(Re) \\ p^*(x^*, y^*, z^*, t^*) &= f(Re) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Si possono definire vari parametri per caratterizzare un sistema agitato e, tali parametri dipendono dai numero adimensionali identificati sopra. Si ottiene così 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 P
- ✓ Velocità del bordo della girante, V_{tip}
- ✓ Capacità di pompaggio della girante, Q
- ✓ Tempo di miscelazione (Mixing time), t_m

Tali parametri definiscono la fluidodinamica “globale” del sistema.

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 del processo. La potenza dissipata è funzione delle proprietà chimico-fisiche del sistema (viscosità μ e densità ρ), delle variabili operative (numero di giri N), dei 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 sistemi geometricamente simili, la relazione funzionale tra le varie grandezze può essere riscritta in termini di numeri adimensionali⁽⁵⁾:

$$N_P = f(Re, Fr) \quad (1.6)$$

dove N_p è il numero di potenza, definito come:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (1.7)$$

La forma più semplice per la relazione 1.6 risulta essere:

$$N_p = a Re^b Fr^c \quad (1.8)$$

in cui i parametri a , 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 nell'eq-ne 1.8 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 frangivortici questa dipendenza può essere trascurata anche per $Re > 300$.

Queste correlazioni vengono spesso fornite in forma grafica, 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.

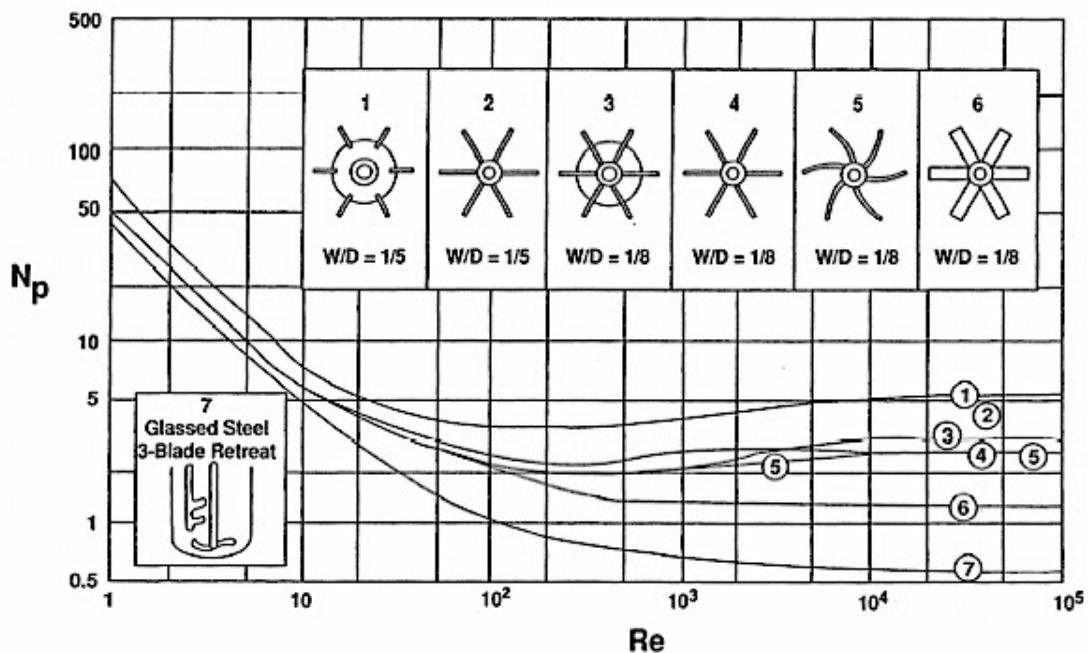


Figura 1.7 Andamento di N_p in funzione di Re , (Paul E.L., et al., 2004)

L'esame delle curve proposte nella Figura 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 quindi proporzionale alla densità e il regime di moto è detto turbolento. La condizione di $Re > 10^4$ è detta di turbolenza completa.
- ✓ La zona in cui $10 < Re < 3000$ è detta di transizione ed in essa il valore di b è variabile. Parametri importanti per il consumo energetico di un agitatore sono anche le caratteristiche geometriche ⁽⁴⁾; tra queste, la presenza di setti frangivortice.

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

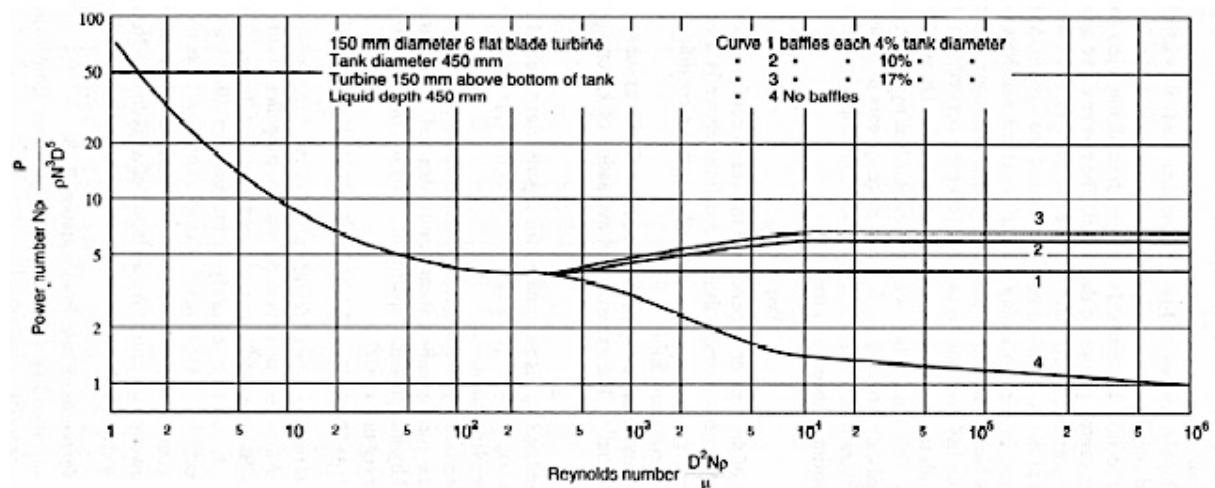


Figura 1.8 Andamento di N_p in funzione del Re al variare della lunghezza dei setti (Paul E.L., et al., 2004)

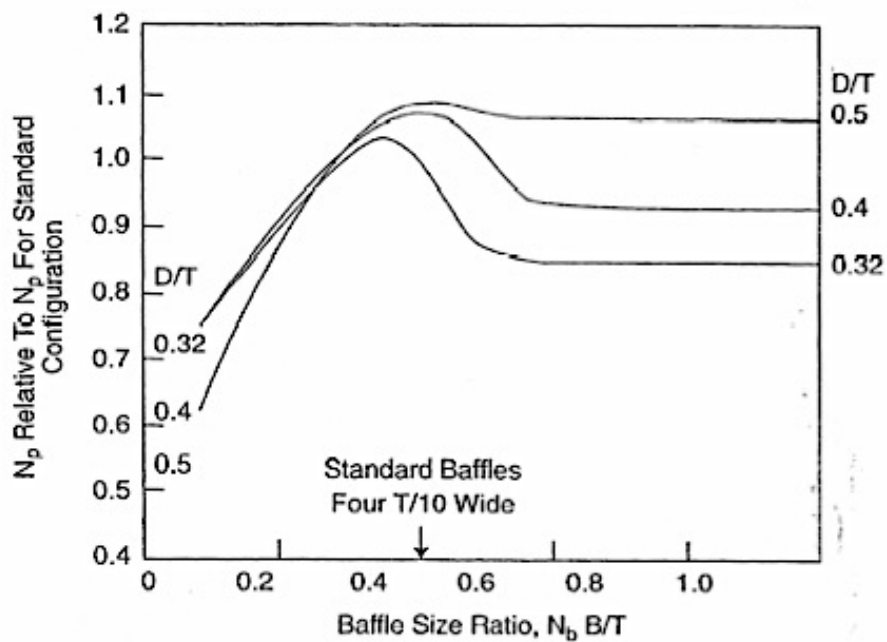


Figura 1.9 Andamento di N_p con il numero di "baffles" N_B e la loro larghezza, (Paul E.L., et al., 2004)

Anche la distanza dell'agitatore dal fondo del reattore ("Clearance", C) influenza il numero di potenza, come mostrato in Tabella 1.1. Si nota come l'andamento non sia simile per giranti diverse. Si osserva che, con turbine radiali, al di sotto di un valore critico C/T si ha un crollo del N_p , corrispondente alla soppressione dell'anello di ricircolo inferiore.

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

Tabella 1.1 Andamento di N_p al variare della "Clearance" dell'agitatore (Paul E.L., et al., 2004)

C	Rushton	PBT-up	PBT-down
T/3	5.18	1.29	1.29
T/4	4.7	1.24	1.35
T/6	4.4	1.81	1.61

Tabella 1.2 N_p di agitatori industriali operanti in regime turbolenti in recipienti di geometria standard (Paul E.L., et al., 2004)

Agitatore	Tipo	D/T	N° pale	N_p
Rushton	Radiale	0.33	6	5.2
Rushton	Radiale	0.5	6	5.0
Rushton	Radiale	0.33	12	7.5
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
A310 (Lightnin)	Assiale	0.4	3	0.3
HE3 (Chemineer)	Assiale	0.33	3	0.3
A315	Assiale	0.4	4	0.8
Maxflo (Prochem)	Radiale	0.4	6	0.82

1.2.2 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 massimi a cui è sottoposto il materiale agitato⁽⁵⁾.

$$V_{tip} = \pi N D \quad (1.9)$$

1.2.3 Capacità di pompaggio

Viene definita come il volume di fluido “pompat” 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), N_Q , la cui espressione è la seguente⁽⁵⁾:

$$N_Q = \frac{Q}{N D^3} \quad (1.10)$$

Anche l'andamento di questo parametro dipende dal valore di Re e Fr con le medesime modalità del numero di potenza; in assenza di vortice superficiale (reattore settato), il numero di pompaggio dipende solo da Re (non da Fr). Inoltre, N_Q risulta essere dipendente dalla geometria dell'agitatore e dal livello del liquido nel reattore.

Come mostrato in Figura 1.10, N_Q cresce con Re fino ad un "plateau"; per $Re > 10^4$, N_Q rimane costante.

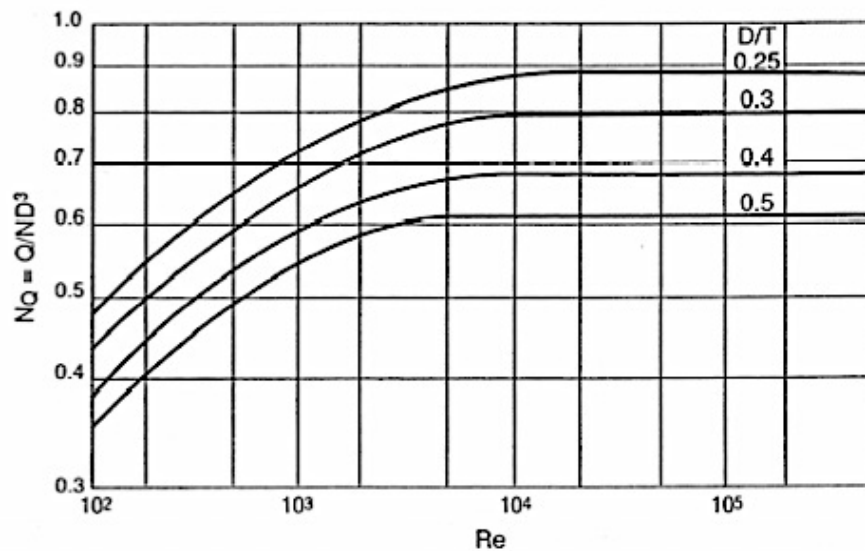


Figura 1.10 Numero di pompaggio in funzione di Re (i valori si riferiscono ad una turbina PBT), (Paul E.L., et al., 2004)

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 di pompaggio

Nella Tabella 1.3 si riportano i valori di N_Q di alcuni agitatori di uso comune. Si nota come questo parametro sia meno variabile rispetto ad N_P : il valore di N_Q oscilla infatti in un intervallo compreso tra 0.4 e 0.8, con la conseguenza che le capacità di pompaggio dei diversi agitatori, a D e N fissati, risultano essere abbastanza simili.

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

Aggitatore	Tipo	D/T	N° pale	N_Q
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 <i>p / D = 1</i>	Assiale	0.33	3	0.45
A310 (Lightnin)	Assiale	0.4	3	0.56
HE3 (Chemineer)	Assiale	0.33	3	0.41
A315	Assiale	0.4	4	0.73
Maxflo (Prochem)	Radiale	0.4	6	0.82

1.2.4 Tempo di miscelazione

Viene definito come tempo necessario perché un tracciante venga adeguatamente disperso all'intero apparato operante in discontinuo⁽⁵⁾. Il suo valore dipende da numerosi fattori:

- ✓ Capacità di pompaggio
- ✓ Criterio di omogeneità assunto (di solito: 90%, 95% o 99% dell'omogeneità completa)
- ✓ Punti scelti per l'addizione 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_m , dipende dalle seguenti variabili operative⁽⁴⁾:

$$t_m = f(\rho, \mu, N, D, g) \quad (1.11)$$

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

$$Nt_m = \theta_m = f(Re, Fr) \quad (1.12)$$

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 Figura 1.11 in cui si nota che, per alti Re , il valore di questo parametro risulta indipendente da Re .

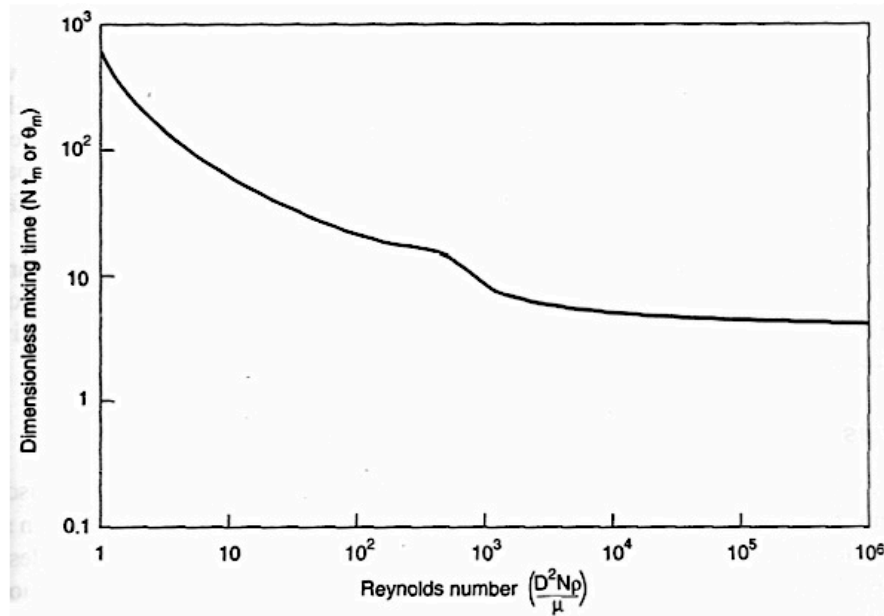


Figura 1.11 Andamento tipico del tempo di miscelazione adimensionale, (Paul E.L., et al., 2004)

Questo tipo di andamento può essere descritto analiticamente nella forma:

$$Nt_m = CRe^a \quad (1.13)$$

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

Tabella 1.4 Parametri dell'eq-ne 1.13 per alcuni agitatori industriali, (Paul E.L., et al., 2004)

Tipo Agitatore	Intervallo Reynolds	C	a
Turbina Rushton	5-1000	17500	-0.75
Turbina Rushton	1000-100000	60	0
Turbina (baffled)	10000-100000	36	0
Helica ribbon	1-10000	430	-0.25

E' stato dimostrato⁽⁵⁾ che nel caso di $H/T = 1$ e di agitatori singoli, si ottiene:

$$Nt_m = AN_p^{-1/3} \left(\frac{D^{-2}}{T} \right) \quad (1.14)$$

Risultati sperimentali mostrano che $A=5.2$ per tutti i tipi di agitatori. La 1.14 può essere semplicemente trasformata in:

$$t_m = 5.9 T^{2/3} \left(\frac{P}{\rho V} \right) \left(\frac{D^{-2}}{T} \right) \quad (1.15)$$

Da tale relazione, si desume 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 della fluidodinamica di dettaglio 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, inoltre, permette di individuare l'eventuale presenza di zone stagnanti che non contribuiscono attivamente alla miscelazione. Tali analisi vengono condotte per via teorica e sperimentale.

I principi fisici alla base della meccanica dei fluidi sono le leggi di conservazione della massa, dell'energia meccanica e della quantità di moto che danno origine alle equazioni di continuità, di Bernoulli e di Navier-Stokes. 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 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 ottenibile tramite tecniche strumentali sviluppate relativamente di recente, con le quali si riescono a determinare le componenti della velocità nell’area sottoposta ad investigazione.

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 sottoporre a verifica i modelli sviluppati per CFD

1.3.1 Campi di moto in sistemi monofasici di bassa viscosità

Il risultato del processo di miscelamento 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 tipi principali di moto che si possono instaurare in un sistema agitato in prossimità della girante: assiale e radiale a seconda della tipologia di agitatore utilizzato. L’andamento qualitativo delle velocità del fluido per diversi agitatori è mostrato in Figura 1.12.

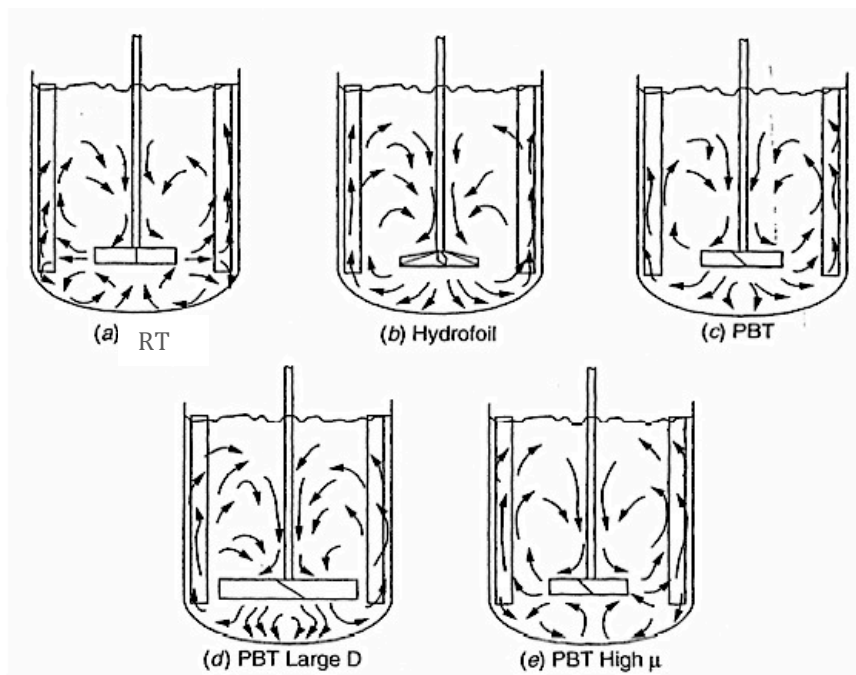


Figura 1.12 Campi di moto di agitatori di diverso tipo, diametro e viscosità variabile, (Paul E.L., et al., 2004)

Mentre gli agitatori radiali indirizzano il fluido verso le pareti del reattore (Figura 1.12a) gli agitatori a flusso assiale (nella cui categoria rientrano eliche marine, PBT e hydrofoils), producono un campo di moto diretto verso il fondo del reattore, come quello mostrato nella Figura 1.12b e c.

La Figura 1.13 mostra schematicamente le linee di flusso per una girante assiale che pompa verso il basso.

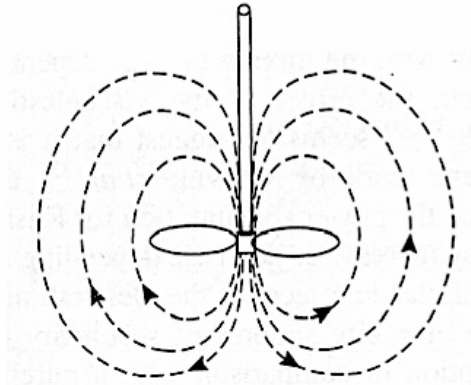


Figura 1.13 Linee di flusso per una girante assiale- “down-pumping”, (Paul E.L., et al., 2004)

La PBT è considerata un agitatore adatto per qualsiasi applicazione, seppur non sempre ottimale, in quanto unisce una buona capacità di pompaggio ad un buon livello di sforzo di taglio indotto. Le Hydrofoils, invece, producono la stessa capacità di pompaggio ma con un minor livello di sforzo di taglio e turbolenza rispetto alle PBT. Inoltre, il flusso uscente dalle Hydrofoils 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 c sono caratterizzate da una spinta del fluido verso il basso; considerazioni analoghe vanno anche per giranti assiali con flusso diretto verso l’alto. Infatti è spesso 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, si deve anche capovolgere 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 il vortice superficiale che riduce notevolmente l’azione di miscelamento della girante a causa della rotazione rigida della massa di flusso indotta.

Le soluzioni da adottare per minimizzare la formazione di tali vortici e migliorare quindi il mescolamento possono essere:

- ✓ Aggiunta di setti frangivortice (“baffles”), con conseguente aumento del consumo di energia
- ✓ Montaggio dell’agitatore in posizione eccentrica e/o non assiale (come mostrato in Figura 1.14). il campo di moto risultante impedisce la formazione del vortice di superficie.

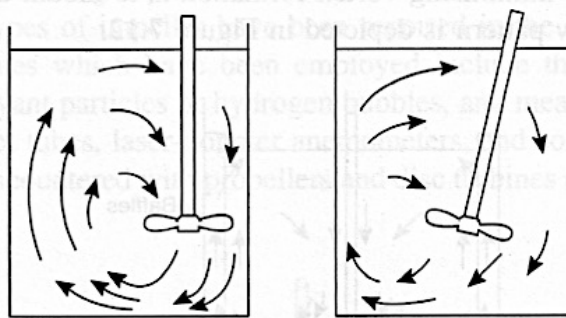


Figura 1.14 Campo di moto di un agitatore assiale montato in posizione decentrata, (Paul E.L., et al., 2004)

Le turbine a pale dritte (FBT, Flat-Blade Turbine), invece, producono un campo di moto radiale come quello mostrato in Figura 1.12a con la presenza di due anelli di circolazione, uno sotto e uno sopra la girante.

Il miscelamento che avviene tra i due anelli di circolazione è decisamente poco rilevante rispetto a quello presente all’interno dell’anello di circolazione stesso. Anche in questo caso l’assenza di frangivortice provoca la rotazione rigida dell’intero sistema, con diminuzione considerevole dell’efficienza di mescolamento.

L’aggiunta di setti frangivortice, previene la formazione del vortice e migliora la capacità di mescolamento (Figura 1.15).

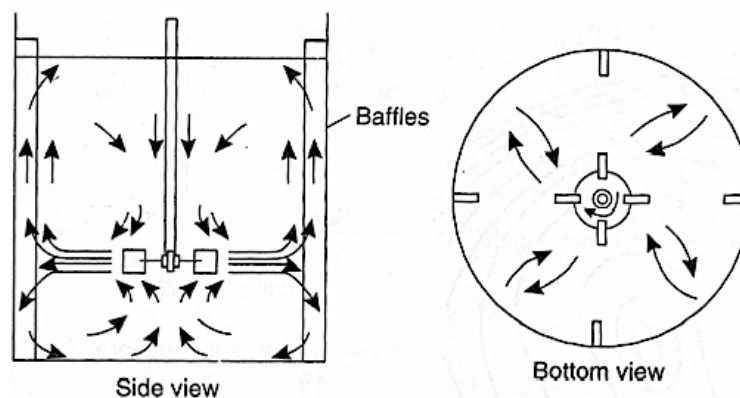


Figura 1.15 Campo di moto di un agitatore radiale con setti frangivortice, (Paul E.L., et al., 2004)

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 sono più adatti per il mescolamento del liquido, quelli radiali trovano maggiore applicazione in sistemi gas-liquido o liquido-liquido in quanto è più alto il livello dello sforzo di taglio ("shear"). Il campo di moto risulta essere influenzato da molti parametri, i più importanti dei quali sono il diametro (D) e la posizione della girante, la viscosità del liquido (μ) e l'eventuale presenza di un secondo agitatore. Si deve osservare che il campo di moto di una PBT si modifica divenendo prevalentemente radiale se si aumenta il diametro dell'agitatore (Figura 1.12d) o se si aumenta la viscosità del sistema sotto agitazione (Figura 1.12e).

Il campo di moto degli agitatori ad alto sforzo di taglio ("high-shear") risulta essere molto simile a quello degli agitatori radiali, ma con minore capacità di pompaggio e, appunto, con un maggior livello di sforzo di taglio. Anche gli agitatori a pale curve e a molla producono un flusso completamente radiale.

Per quanto riguarda invece gli Hydrofoil lenti, si osserva in particolare che gli INTERMIG presentano un campo di moto particolare dovuto al doppio profilo di cui sono provviste le due porzioni delle pale.

In Figura 1.16 si nota come i profili interno-pale diano un flusso opposto ai profili esterno-pala sicché si forma un anello di circolazione allineato e coerente.

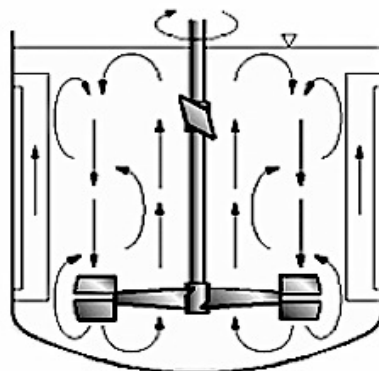


Figura 1.16 Campo di moto di un agitatore Ekato INTERMIG, (Paul E.L., et al., 2004)

1.3.2 Campi di moto in sistemi monofasici multigirante

Quando un singolo agitatore non riesce più a garantire una buona capacità di miscelamento vengono utilizzati più agitatori inseriti sul medesimo albero.

Accoppiando più giranti, anche di natura diversa, si ha la formazione di più anelli di circolazione di diverse caratteristiche come mostrato in Figura 1.17.

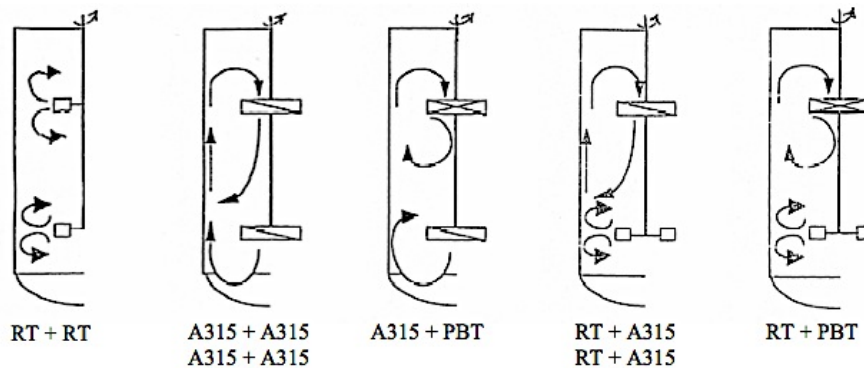


Figura 1.17 Campi di moto di sistemi multigiranti (RT=Rushton)

Le immagini presentate sopra si riferiscono a sistemi in cui ogni girante opera in modo indipendente dall'altra. Infatti ciascuna mantiene il suo flusso caratteristico senza essere influenzata dall'altra girante. Nel caso in cui si riduca la distanza tra le giranti, 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).

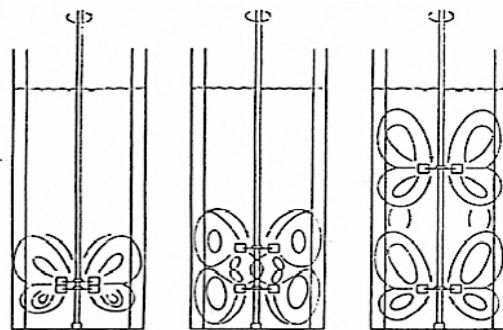


Figura 1.18 Campo di moto di sistemi multigiranti a spaziatura variabile, (Paul E.L., et al., 2004)

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 nel collassare nei due classici anelli di circolazione caratteristici di una singola girante.

2 TECNICHE DI MISURA e STRUMENTAZIONE

In questo capitolo vengono introdotte le tecniche di misura utilizzate nell'ambito del presente lavoro di tesi, al fine di caratterizzare la fluidodinamica del sistema di interesse.

In particolare, sono state utilizzate la tecnica PIV, acronimo di "Particle Image Velocimetry", per l'acquisizione di serie temporali di velocità, la tecnica PLIF, acronimo di "Planar laser induced fluorescence", per determinare l'evoluzione temporale della dispersione di un tracciante e risalire al tempo di miscelazione caratteristico del reattore e un torsionometro per valutare la potenza ceduta al fluido dalla girante.

Queste metodologie forniscono risultati di natura diversa che, se accoppiati, riescono a dare una visione completa e a caratterizzare quantitativamente le variabili fluidodinamiche del reattore oggetto di indagine.

2.1 La Tecnica PIV in sistemi monofase

I progressi fatti negli ultimi 20 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 ed 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).⁽⁷⁾

Al contrario di altre tecniche quali l'anemometria a filo a caldo, che impiegano sonde intrusive, la PIV, essendo basata sui metodi ottici, è una tecnica non invasiva. Inoltre, 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 di telecamere digitali ad alta definizione di ultima generazione e il parallelo sviluppo dei programmi di elaborazione ed analisi delle immagini hanno permesso di compiere un notevole progresso riguardo all'accuratezza dei risultati, grazie soprattutto al miglioramento della qualità delle immagini ottenute. Il posizionamento delle telecamere e la loro messa a fuoco risulta essere abbastanza riproducibile, mentre è critico, per la ripetibilità 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 e ad alta potenza (laser).
- ✓ Un sistema di lenti cilindriche che trasformano il raggio 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 interagendo con il fascio luminoso sia rilevabile con le telecamere digitali. Per tale motivo il tracciante deve avere una densità apparente assai 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 digitali ad alta definizione e ad alta velocità.
- ✓ Un acquirente/elaboratore di immagini che sincronizzi laser e telecamere.
- ✓ Un programma di elaborazioni 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 un sistema di misura: una lamina di luce laser illumina in due istanti successivi, t e t' , posti ad una distanza temporale nota e definita (l'intervallo è breve, dell'ordine dei decimi o centesimi di secondo, e variabile a seconda delle velocità caratteristiche del sistema), le particelle di tracciante presenti nella regione interessata. Sincronizzata con il laser, la telecamera provvede ad acquisire in rapida successione due immagini del sistema caratterizzate dalla riflessione della luce laser incidente da 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 costante.

Lo spostamento subito dalle singole 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-correlazione, 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'acquisizione delle due immagini.

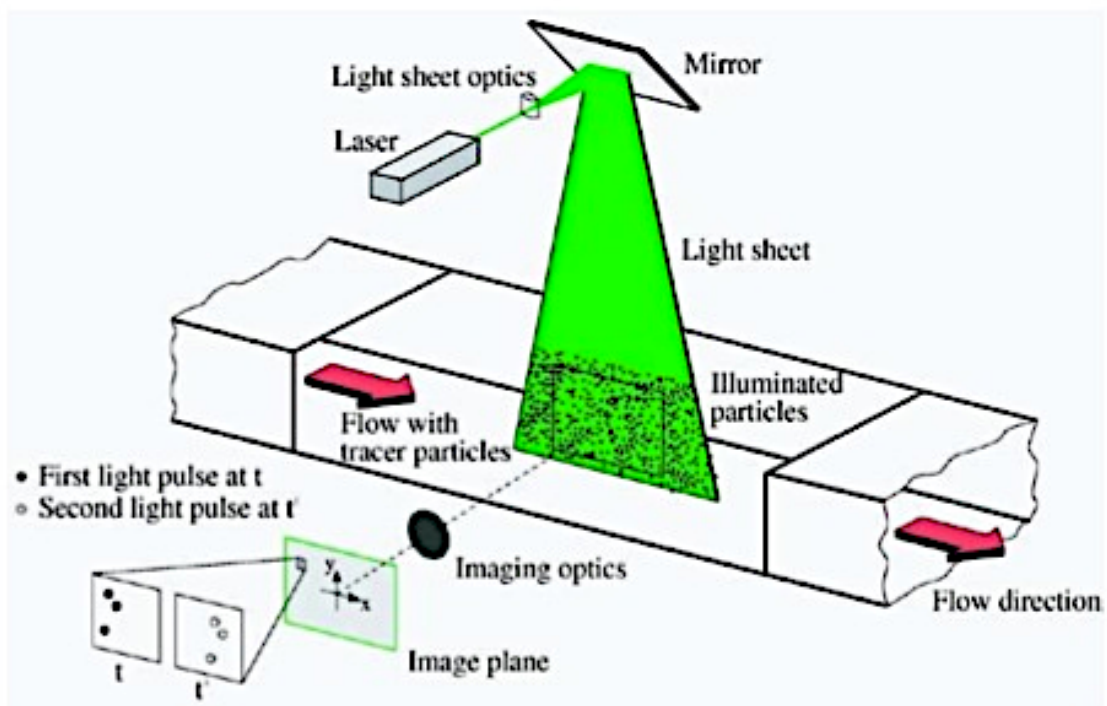


Figura 2.1 Tipico schema di un sistema PIV, (Raffel M. et al. 1998)

La qualità delle misurazioni effettuate risente notevolmente della quantità di tracciante in sospensione nel sistema in quanto ne deve essere presente una quantità ragionevole: né troppo poco in quanto si rischia di registrare immagini con zone esenti da particelle, ma nemmeno eccessivo poiché si rischia di “accecare” la telecamera e di perdere precisione nella misura.

In sintesi la PIV:

- ✓ Consente di ottenere buoni livelli di dettaglio, sia spaziali (dipendenti dalla risoluzione della telecamera), che temporali (dipendenti dalla capacità e velocità di acquisizione delle immagini);
- ✓ 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 quindi 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 ottiche di tipo puntuale, un risparmio notevole di tempo nella caratterizzazione completa di un sistema;
- ✓ Necessita di una sorgente luminosa ad alta potenza.

2.2 Principio di funzionamento e classificazione dei laser

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

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

Un apparato laser è formato da tre componenti principali:

- ✓ Il materiale attivo (gas, semiconduttore o solido)
- ✓ Il sistema di pompaggio (eccita il materiale attivo mediante energia elettromagnetica o chimica)
- ✓ Il 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 frequenza determinata. 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 usata per la stimolazione. L'amplificazione della luce è ottenuta mediante successive riflessioni dei fotoni in una cavità risonante, costituita essenzialmente da due specchi paralleli posti alle estremità dello strumento, di cui uno totalmente e l'altro parzialmente riflettente. Durante il

percorso fra 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 estremamente 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, ad elettroni liberi. Nelle applicazioni PIV si utilizza un laser allo 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 sua particolare conformazione a reticolo.⁽⁷⁾

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 le telecamere acquisiscono le immagini: ciò ha portato all'utilizzo di laser pulsanti che, nella configurazione più utilizzata, risultano essere quelli a doppia cavità.

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 tra gli impulsi, rimanendo costante la quantità di energia emessa per ogni impulso. Lo schema di funzionamento di un comune laser a doppia cavità è mostrato in Figura 2.2.

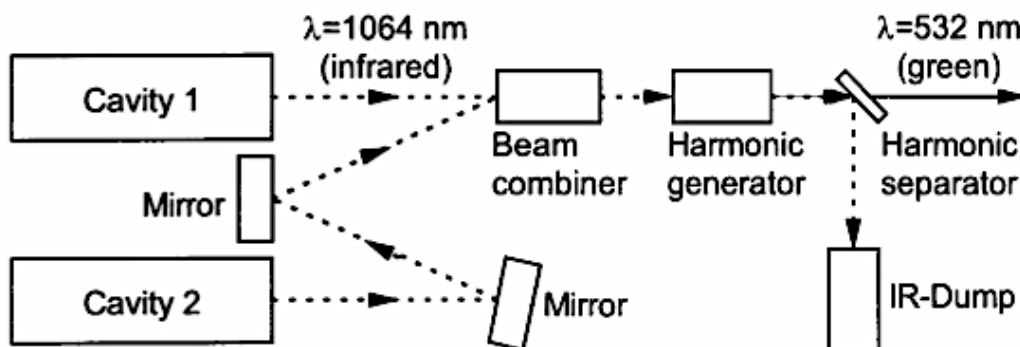


Figura 2.2 Laser a doppia cavità per PIV, (DynamicStudio v3.20 User's Guide, 2011)

I laser YAG emettono una luce di lunghezza d'onda di 1064 nm (IR): tuttavia nelle applicazioni PIV questa lunghezza d'onda non è utilizzabile in quanto le telecamere sono maggiormente sensibili allo spettro blu-verde e risulterebbe quindi difficile allineare un fascio di luce invisibile. Si utilizza quindi un generatore armonico che porta la luce laser nel visibile dimezzando la sua lunghezza d'onda a 532 nm. 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 effettuate utilizzando un laser Nd:YAG LITRON, che emette con frequenza pari a 15 Hz.

2.3 Le telecamere

Uno strumento fondamentale per la misura è la telecamera, il cui scopo 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 loro numero è variabile, a seconda che si effettuino misure 2D o 3D ovvero se si debbono effettuare misure in 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 *stereoPIV* si avvale di due telecamere per misurare anche la terza componente del vettore velocità.

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

La telecamera utilizzata è di tipo digitale con un sensore "Charge Couplet Device" (CCD), ossia "dispositivo a scorrimento di carica"^(7,8).

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 rilevatori del CCD, detti pixel, la cui funzione è simile a quella di un foto-diode: quanto più luminoso è un oggetto, tanti più elettroni si accumulano sui pixel. I fotoni che colpiscono i pixel vengono poi 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, la telecamera deve poter acquisire una coppia di immagini temporalmente spaziate fra di loro che poi verranno trasferite in sequenza al sistema di acquisizione dati.

La telecamera utilizzata nel presente lavoro era in particolare 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.

2.4 Particelle traccianti

Per far sì che la caratterizzazione fluidodinamica sia accurata, è necessario che le particelle traccianti seguano fedelmente il fluido in esame, per questo motivo la scelta delle particelle di tracciante risulta di particolare importanza per ottenere risultati affidabili.

Le due caratteristiche fondamentali per un buon tracciante sono:

- I. La capacità di riflettere la luce
- II. La capacità di seguire il moto del mezzo nel quale sono sospese senza interferire con esso

In generale, il moto delle particelle sospese in un fluido dipende da diversi fattori quali: forma delle particelle, dimensione, densità relativa, concentrazione nel fluido, forze esterne.

La forma della particella influenza il valore del coefficiente di attrito, la dimensione e la densità influenzano la risposta della particella alle variazioni di velocità del fluido che la circonda, la concentrazione determina la probabilità di interazione tra particelle. La concentrazione deve quindi essere tale per cui vi sia una distanza media fra particelle sufficiente per poter trascurare interazioni 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 ha la generazione di un'onda di riflessione ("scattering"). In poche parole è come se la particella divenisse ella 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 :

$$q = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (2.1)$$

dove d_p è il diametro della particella e λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente.⁽⁵⁾

Le particelle aventi dimensioni maggiori generano un'onda di scatter più intensa di quelle piccole, mentre la distribuzione spaziale della luce diffusa dipende dal parametro q prima introdotto.

Per $q > 1$ il rapporto fra luce diffusa dietro e davanti alla particella è dell'ordine di 100 – 1000, mentre per $q < 1$ il rapporto si mantiene intorno all'unità. Nella PIV l'interesse è di avere una buona diffusione ai lati della particella per avere una buona qualità del segnale: per questo motivo vengono utilizzate particelle di diametro compreso tra 0.1 e 50 μm che ben interagiscono con il laser con la luce di lunghezza d'onda $\lambda = 532 \text{ nm}$.

La scelta della tipologia del 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 alle telecamere. La scelta deve convergere verso la dimensione massima possibile la quale 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 uguale all'acqua
- ✓ Sfere di vetro
- ✓ Sfere di vetro cavo rivestite in argento
- ✓ Particelle polimeriche fluorescenti

In questo lavoro, sono state utilizzate sfere a base di polimetilmetacrilato (PMMA) rivestite di uno strato fluorescente a base di Rodamina-B, che si eccita ad una lunghezza d'onda di 560 nm ed emette a 584 nm.

Per quanto riguarda invece la concentrazione delle particelle per area di interrogazione affinché la misurazione sia accurata, non vi sono indicazioni precise ma in linea generale

la quantità ottimale risulta essere pari a circa 5 particelle di tracciante per ogni area di interrogazione.

In pratica, si inseriscono le particelle traccianti poco alla volta e si valutano visivamente attraverso il sistema di elaborazione dati.

2.5 La tecnica PLIF

La tecnica 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 un gas, (quali la concentrazione di una specie chimica o la temperatura). E' basata, come suggerisce il nome, sulla determinazione dell'intensità di fluorescenza locale (indotta da un raggio/fascio di luce laser).^(9,10)

La specifica tecnica di misura PLIF utilizzata in questo lavoro di tesi prevede l'impiego sincrono dei seguenti apparati:

- ✓ una sorgente di illuminazione ad alta potenza (laser)
- ✓ un sistema di lenti cilindriche che trasformano il raggio laser in un "fascio" di luce
- ✓ un tracciante fluorescente in soluzione nella fase da caratterizzare
- ✓ una o più telecamere digitali ad alta definizione e ad alta velocità
- ✓ un acquirettore/elaboratore di immagini
- ✓ un programma di elaborazione di immagini adeguato

I principali pregi della tecnica possono essere così riassunti:

- ✓ misurazione non intrusiva: così come per la tecnica PIV, viene utilizzata una telecamera esterna per raccogliere le immagini del sistema da analizzare che, dunque, non viene perturbato
- ✓ misurazione quantitativa, precisa ed accurata
- ✓ in combinazione con misure di velocità (ottenuti, ad esempio, con la PIV) si possono determinare sperimentalmente proprietà di trasporto (come i coefficienti di diffusione turbolenti, ecc.)

L'analisi quantitativa delle immagini ottenute (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).

In Figura 2.3 viene riportato l'andamento qualitativo della curva di calibrazione di concentrazione.

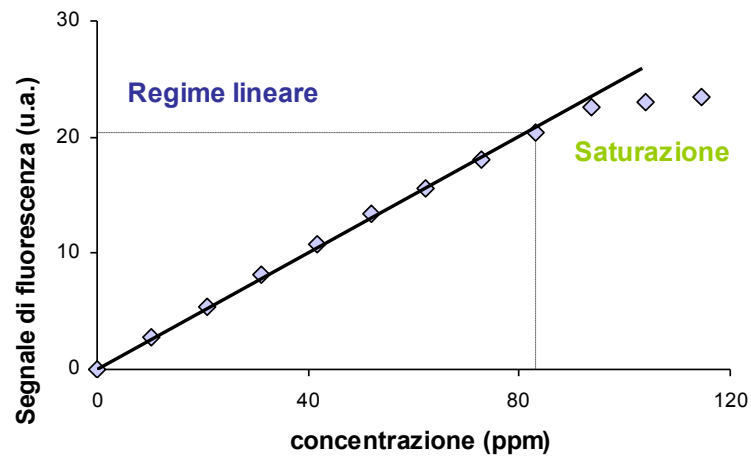


Figura 2.3 Tipica curva di calibrazione della concentrazione (ppm)

Come si può notare, al di sopra di un determinato valore della concentrazione, si arriva a saturazione dell'immagine (la fluorescenza rilevabile non varia più linearmente con la concentrazione ma tende a rimanere costante), per cui le misure sono significative solamente al di sotto di tale valore.

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, ecc.), 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 ed emissione forniscono rispettivamente informazioni sul tipo di sorgente luminosa (generalmente, si utilizzano laser) che può

essere usata per eccitare il colorante e sul tipo di luce riemessa (dunque, sul filtro da utilizzare).

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, rieccita il tracciante stesso (fenomeno definito “selfquenching”). L’efficienza quantica è invece, indice dell’intensità della luce riemessa, ed è quindi collegata alla precisione della misura (tanto maggiore quanto più è elevata l’intensità). Un ulteriore effetto da tenere in considerazione è il cosiddetto “photobleaching”, ovvero la decomposizione chimica del colorante a causa della luce emessa dal laser. Questo effetto può essere provocato da una energia della luce laser troppo elevata e/o da una bassa stabilità fotochimica del tracciante. La valutazione della quantità di tracciante decomposto localmente è sostanzialmente impossibile, per cui i risultati sperimentali non corrispondono alle effettive condizioni del mezzo fluido analizzato.

Di prima importanza risulta, naturalmente, la solubilità del tracciante nel mezzo fluido. Nel caso in cui sia bassa, il colorante deve essere precedentemente miscelato con un solvente che sia anche solubile nel mezzo da analizzare. L’aggiunta di un composto terzo rende tuttavia necessaria una valutazione reologica ed ottica (possibile modificazione degli spettri di assorbimento ed emissione e dell’intensità di fluorescenza) del sistema complessivo.

2.5.2 Traccianti utilizzati per misure di concentrazione in liquidi

Il tracciante più utilizzato per misure PLIF di concentrazione in fase liquida è la Rhodamina-6G, che emette nello spettro giallo/arancione. La Rhodamina-6G è utilizzata per misure di concentrazione con laser Nd:YAG e Argon-ion (verde).

L’efficienza quantica, come per la Rhodamina-B, è molto elevata, mentre non si evidenzia una dipendenza dall’entità di fluorescenza, né dalla temperatura né dal pH. Lo spettro di assorbimento della Rhodamina-6G presenta un limite inferiore a 460nm, con un valore ottimale (picco dello spettro di assorbimento) a 530nm. Lo spettro di emissione è compreso nell’intervallo 540-640nm, con un valore ottimale (picco dello spettro di emissione) di 560nm. Come risulta evidente dai valori riportati, gli spettri hanno una sovrapposizione molto piccola, il che rende la Rhodamina-6G un ottimo tracciante per le misure PLIF.

2.5.3 Procedura di acquisizione

Si utilizza lo stesso laser e la stessa telecamera delle misure PIV, si acquisiscono però una serie di immagini singole e non coppie di immagini come nella tecnica PIV. Sulla telecamera va inoltre montato un filtro che consenta il passaggio della luce fluorescente riflessa ma blocchi la luce riflessa o diffusa del laser. Dopo pochi secondi dall'inizio dell'acquisizione delle immagini, si inietta il tracciante il più celermente possibile e si continua l'acquisizione fino a che non sia avvenuta l'omogeneizzazione del tracciante iniettato all'interno del reattore. Ogni immagine viene analizzata per determinare il grado di omogeneità spaziale attraverso l'analisi del coefficiente di variazione (CoV).⁽⁵⁾

Non esiste una scelta univoca sul momento a partire dal quale calcolare il tempo di miscelazione; la scelta che è stata effettuata è di misurare il tempo di miscelazione a partire dalla prima immagine in cui l'iniezione risulti essere cessata.

2.6 Torsionometro

Al fine di caratterizzare il funzionamento del reattore, è necessario valutare anche la potenza ceduta al fluido dal sistema di agitazione. La misura della potenza di agitazione è determinata in base alla torsione dell'albero, rilevata attraverso un estensimetro.

Un estensimetro è costituito da un collegamento elettrico formato da quattro resistenze, detto ponte di Wheatston. Due poli del ponte sono collegati ad un voltaggio fisso U_E , detto "input voltage" o "energizing voltage" mentre gli altri due poli sono collegati ad un voltmetro che misura il voltaggio U_A , detto "output voltage".

Gli estensimetri si basano sul principio secondo il quale la resistenza elettrica di un metallo varia in accordo alla distorsione imposta in esso.

La rotazione della turbina genera una torsione dell'albero che è proporzionale alla potenza trasferita fluido. Tale torsione viene misurata attraverso la variazione del voltaggio in uscita.

Il ponte elettrico, che è protetto dal contatto con l'acqua grazie ad una guaina che riveste l'albero, è collegato ad un amplificatore il quale amplifica il segnale e lo trasmette ad una scheda di acquisizione dati connessa ad un PC.

Il software utilizzato consente di variare sia la durata che il numero delle acquisizioni. Il torsionometro (a) è stato montato tra il motore elettrico e l'albero del reattore, utilizzando giunti cardanici (b) al fine di smorzare le vibrazioni. (Figura 2.4)

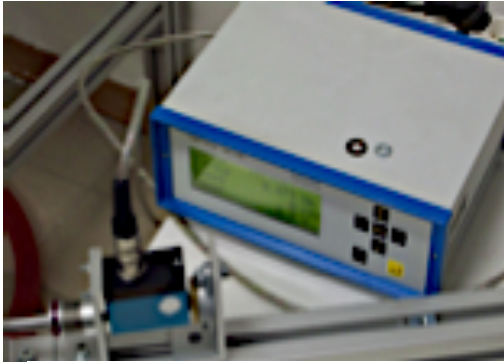


Figura 2.4 (a) torsionometro



(b) giunto cardanico

Il motore elettrico (c) era munito di un inverter (d), che serviva a variare la velocità di rotazione (Figura 2.5)

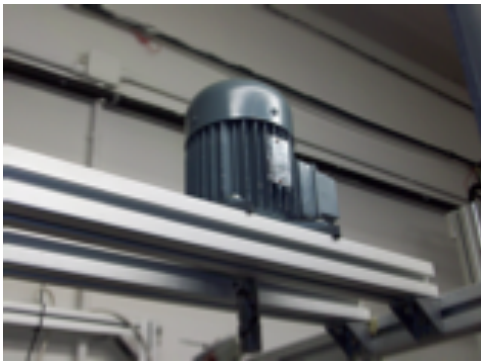


Figura 2.5 (c) motore elettrico



(d) inverter

Il torsionometro, fornisce a video i valori di coppia, numero di giri e potenza.

3 CONFIGURAZIONI INDAGATE ED ACQUISIZIONE DEI DATI

In questo capitolo vengono descritte le configurazioni geometriche dei reattori agitati sottoposte ad analisi e verranno fornite alcune informazioni specifiche sulle misure PIV.

Sono stati caratterizzati due tipi di reattori agitati:

- ✓ Reattore agitato meccanicamente di geometria standard miscelato con una girante a pale inclinate del tipo PBT, a quattro pale inclinate di 45°, operante in modalità “down-pumping”
- ✓ Reattore a scala di laboratorio di geometria scalata rispetto ad un reattore industriale utilizzato per produrre biogas da vinacce, agitato meccanicamente con giranti Lighting A310.

3.1 Reattore agitato meccanicamente di geometria standard

Il reattore utilizzato per effettuare le misurazioni era di geometria cilindrica a fondo piatto, costituito interamente in plexiglass in modo da essere trasparente (requisito fondamentale affinché la lamina laser possa penetrare e la telecamera possa acquisire le immagini); sul coperchio, sempre in plexiglass, erano presenti sia il foro per l'ingresso dell'albero della girante che altri due fori per garantire l'accesso all'interno del reattore.

Nella parete del reattore erano presenti 4 setti frangivortice posti a 90° l'uno dall'altro in una posizione equidistanziata; al fine di minimizzare gli effetti di rifrazione, a cui sarebbe stato soggetto il fascio di luce laser nell'attraversamento dell'interno del reattore, dovuti alla curvatura del serbatoio cilindrico, il reattore era inserito in un altro contenitore a forma di parallelepipedo, molto più grande e anch'esso in plexiglass, riempito con lo stesso fluido del reattore, ossia, acqua demineralizzata. In tal modo, la parte superiore del reattore vicino alla flangia del coperchio risultava essere fuori dal contenitore cubico e, quindi, fuori dal campo di misura.

Il livello di liquido veniva, tuttavia, mantenuto al di sotto di tale livello in modo da consentire la determinazione dell'intero campo di moto.

Nella Figura 3.1 sono riportate le caratteristiche geometriche del reattore.

In Tabella 3.1 vengono riportate le dimensioni caratteristiche del reattore agitato di geometria standard.

Tabella 3.1 Dimensioni caratteristiche del reattore di geometria standard

Dimensioni caratteristiche	
T	232mm
H	230mm
D	94mm
D_{ALBERO}	18mm
C	T/3

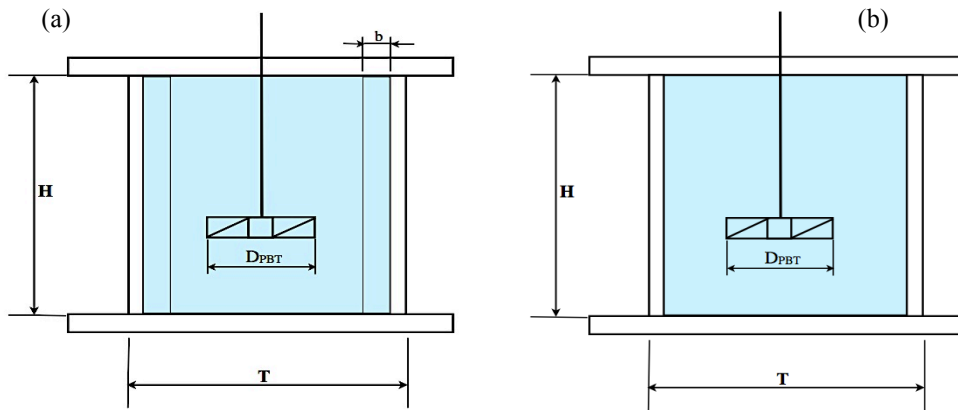


Figura 3.1 Configurazione geometrica del reattore standard con setti frangivortice (a) e senza setti frangivortice (b)

Con le configurazioni mostrate in Figura 3.1 è stato caratterizzato il campo di moto prodotto dalla girante PBT, in condizioni monofase, con altezza del liquido $H_L=T$, utilizzando come liquido acqua demineralizzata.

In Figura 3.2 è mostrata la posizione relativa di reattore e recipiente esterno.

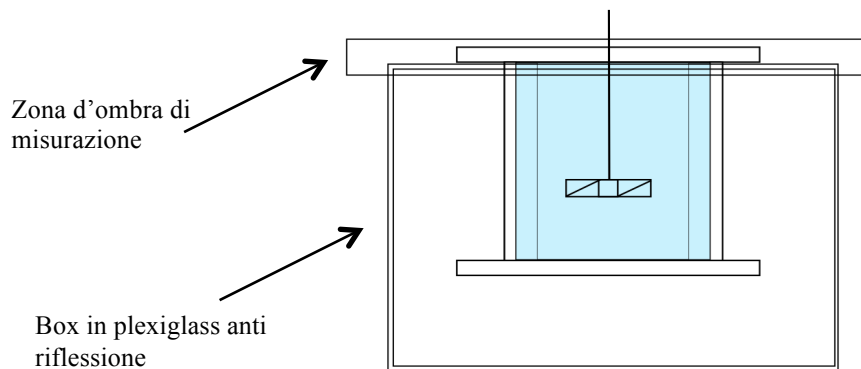


Figura 3.2 Dimensioni e posizionamento del reattore utilizzato

L'agitatore impiegato per la caratterizzazione del reattore agitato era una PBT a 4 pale inclinate a 45° che operava in modalità “down-pumping”.

Le caratteristiche geometriche dell'agitatore utilizzato sono riportate in Figura 3.3.

Come è possibile osservare, si tratta di una turbina formata da 4 pale piatte inclinate di 45° rispetto all'orizzontale, saldate direttamente al mozzo che, come detto in precedenza, producono un flusso di tipo misto diretto verso il basso.

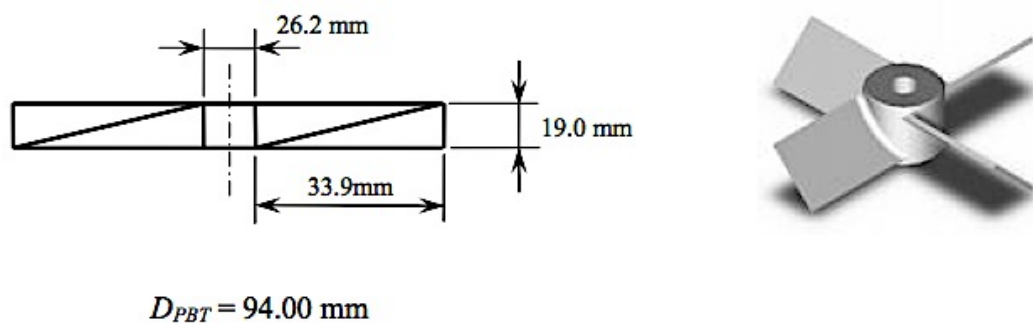


Figura 3.3 Schema della PBT-Down 45°

3.2 Reattore di “scale down” industriale con giranti A310

Il reattore a scala di laboratorio è stato realizzato a partire dalle caratteristiche geometriche e dalle condizioni operative di un reattore industriale. Per il passaggio di scala, sono stati considerati in via preliminare diversi criteri. Fissato il diametro del reattore di laboratorio, T , le dimensioni geometriche sono state ottenute con il criterio della similitudine geometrica sulla base dei rapporti tra le dimensioni del reattore industriale. Si è inoltre scelto di realizzare il reattore di altezza H superiore al valore scalato, per avere la possibilità di studiare l'effetto di diverse altezze di liquido sul comportamento fluidodinamico.

Il reattore è costituito interamente in plexiglass, privo di setti frangivortice, equipaggiato con due giranti di tipo Lightnin A310, simili per tipologia a quelle utilizzate nel reattore industriale.

L'albero del motore attraversa tutto il reattore fino ad un supporto tronco conico che si trova sul fondo del reattore.

In Figura 3.4 sono riportate le caratteristiche geometriche del reattore e in Tabella 3.2 le principali dimensioni.

Tabella 3.2 Dimensioni del reattore non "standard"

Dimensioni caratteristiche	
T	490mm
H	250mm
D	97mm
D_{ALBERO}	12mm
C	T/3

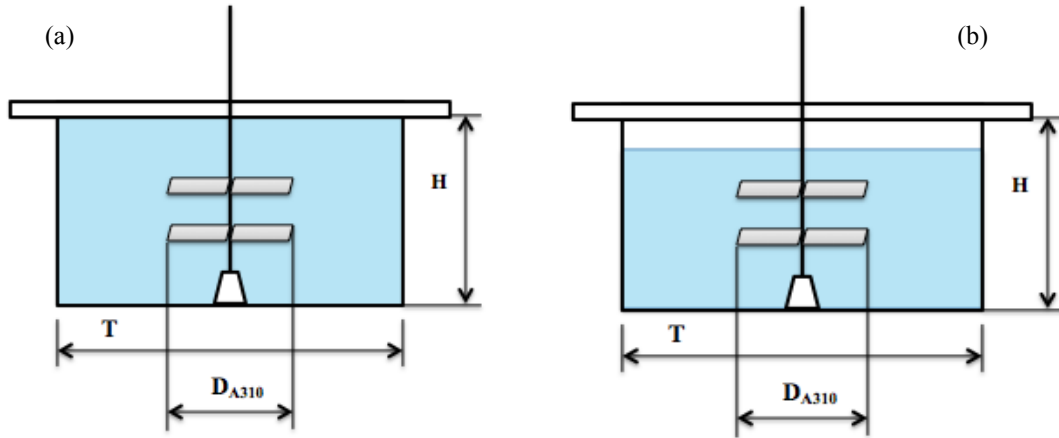


Figura 3.4 Configurazione geometrica (a) $H_L=H$; (b) $H_L < H$

Con queste configurazioni è stato caratterizzato il campo di moto delle due giranti Lighting A310, in condizioni di monofase.

Le misure sono state ripetute al variare della velocità di agitazione, N , per due diverse altezze di liquido, la prima corrispondente al reattore pieno (Figura 3.4a) e la seconda corrispondente al livello di liquido scalato rispetto al caso industriale (Figura 3.4b).

Gli agitatori impiegati per la caratterizzazione del reattore agitato a scala di laboratorio sono chiamati A 310, fanno parte della classe di agitatori veloci Hydrofoil (paragrafo 1.1.1.3).

Questo tipo di agitatore è una turbina formata da 3 pale profilate, saldate direttamente al mozzo, che producono un flusso prevalentemente assiale.

In Figura 3.5 viene riportato uno schema della A310.

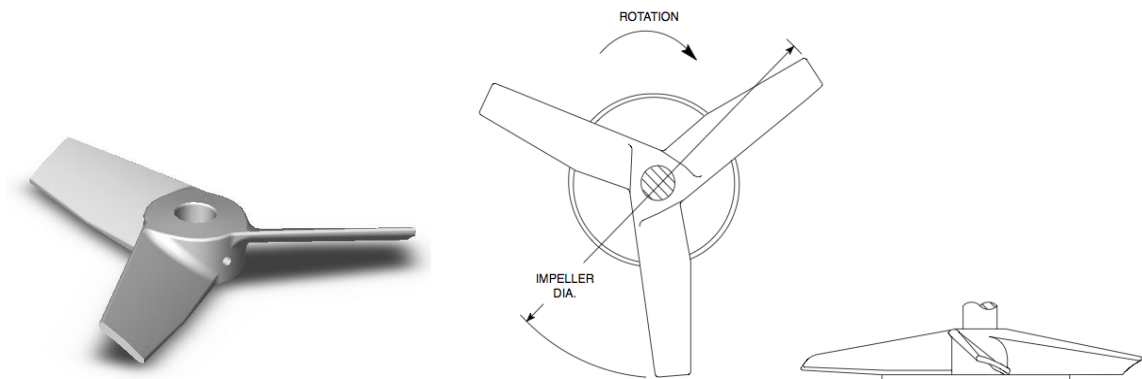


Figura 3.5 Schema di una A 310, $D_{A310}=97\text{mm}$

3.3 Acquisizione dei dati

Di seguito verranno indicate le procedure utilizzate nelle diverse prove sperimentali basate sulle tecniche già descritte.

3.3.1 Acquisizioni con la tecnica PIV

Le misure con la tecnica PIV, debbono essere eseguite considerando che:

- ✓ E' opportuno eseguire le misure in un luogo oscurato, in modo da minimizzare il disturbo dovuto alla luce dell'ambiente e di massimizzare il rapporto segnale/rumore. Tale condizione è stata realizzata operando in una stanza completamente buia e schermato il reattore con un telo nero .
- ✓ E' necessario effettuare preliminarmente la determinazione del fattore di scala, vale a dire il rapporto fra le dimensioni reali dell'oggetto e le dimensioni in pixel dell'immagine impressa nel CCD della telecamera. Tale determinazione viene effettuata, prima di ogni misurazione, mediante il software commerciale "Dynamic Studio" (Dantec Dynamics) che permette, mediante dei puntatori, di definire nell'immagine acquisita sul PC gli estremi di un oggetto di riferimento all'interno del reattore: assegnando all'immagine del riferimento le dimensioni reali, in tal modo si risale al fattore di scala.⁽¹¹⁾

3.3.1.1 Acquisizione sui piani verticali

Lo scopo di questo tipo di prove era quello di misurare le componenti radiali e assiali della velocità all'interno del reattore (che era posizionato su di una struttura di supporto rigida rialzata da terra). Il laser era l'unico componente mobile di tutto l'apparato di

misura. Esso era fissato su di una slitta, ancorata ad un piano di appoggio posizionato di fronte al reattore, che permetteva movimenti orizzontali e verticali del laser stesso.

La telecamera era posta su di un piedistallo davanti al reattore perpendicolarmente al fascio laser che seziona verticalmente il reattore.

Per tutte le configurazioni indagate nel caso del reattore agitato di geometria standard, il piano verticale indagato è stato quello passante per l'albero, a 45° tra due setti successivi; per le configurazioni indagate nel caso del reattore di geometria non standard il piano verticale indagato è semplicemente quello passante per l'albero. L'individuazione del piano di misura, risulta dal posizionamento della lama di luce laser prodotta su un piano verticale passante per l'asse dell'albero, deve essere effettuata con molta precisione.

Di fondamentale importanza è la messa a fuoco della telecamera, che deve essere effettivamente focalizzata sul piano di misura scelto al fine di ottenere una misurazione affidabile.

3.3.1.2 Acquisizioni su piani orizzontali

In queste misurazioni si volevano determinare le componenti radiali e tangenziali del campo di velocità all'interno del reattore agitato: il fascio di luce laser doveva quindi essere orizzontale. La disposizione delle apparecchiature era la stessa di quella utilizzata per le misurazioni su piani verticali, in quanto c'era non c'era la possibilità di posizionare verticalmente la telecamera sotto il reattore, in modo ortogonale rispetto al piano di luce laser che seziona il reattore orizzontalmente.

Il problema è stato risolto mediante l'utilizzo di uno specchio inclinato di 45° , posizionato sotto il reattore: sfruttando la riflessione della luce, secondo la legge di Snellius-Cartesio, l'immagine del fondo del reattore veniva riflessa dallo specchio in direzione della telecamera la quale, al fine di una buona misurazione, doveva essere opportunamente orientata in modo da ricevere la luce perpendicolarmente e senza distorsioni.⁽¹²⁾

Per quanto riguarda i piani orizzontali indagati, sono state scelte diverse posizioni a fissata distanza dal fondo a seconda della configurazione. Il settaggio, l'apertura dell'obiettivo e la messa a fuoco della telecamera era identico a quello utilizzato per le acquisizioni su piani verticali.

3.3.1.3 Concentrazione ottimale di particelle traccianti

Prima di effettuare le misure vere e proprie, è necessario determinare la giusta 'dose' di particelle traccianti (*seeding*) da immettere nel sistema. La procedura empirica messa a punto in questo lavoro consente di determinare rapidamente la concentrazione ottimale anche se risulta comunque fondamentale l'esperienza dell'operatore nel valutare la bontà dell'inseminazione.

In sintesi, la procedura è la seguente:

- I. Si riempie il reattore del volume di liquido assegnato per la prova
- II. Si preleva dal fondo del contenitore il tracciante con una spatola, in modo da avere la maggior quantità possibile di particelle in sospensione, una piccola quantità di particelle che vengono trasferite nel reattore e qui miscelate con il liquido grazie all'azione della girante
- III. Si indirizza il fascio laser sul piano prescelto e si procede all'acquisizione di una singola immagine
- IV. Con l'ausilio del software ed agendo sulla scala dei colori dell'immagine si evidenziano le particelle all'interno del reattore : utilizzando lo zoom e una griglia con maglie di dimensioni pari all'area di interrogazione si procede alla conta del numero di particelle per maglia
- V. Si procede ad un'aggiunta di particelle ed alla loro conta finché il loro numero per maglia arrivi circa a 5.

L'operazione deve essere ripetuta ogni qualvolta si svuota il reattore o si varia il volume di liquido.

3.3.1.4 Numero di immagini acquisite

Il numero delle immagini da acquisire per eseguire misure accurate della componente media e fluttuante del vettore velocità in un campo di moto turbolento deve essere abbastanza elevato da garantire l'indipendenza statistica delle misure.

In regime turbolento, utilizzando la decomposizione di Reynolds, la velocità istantanea in un punto può essere considerata come somma di due componenti: una componente media \bar{v} e una componente fluttuante v' .⁽⁶⁾

$$v(t) = \bar{v} + v' \quad (3.1)$$

Tali componenti vengono determinate, rispettivamente, come media e deviazione standard di una campione di vettori velocità in un punto.

$$\bar{v} = \frac{\sum_{j=1}^N v_j}{N} \quad v' = \frac{\sum_{j=1}^N \sqrt{(v_j - \bar{v})^2}}{N} \quad (3.2)$$

con N numero di immagini acquisite.

La coppia di immagini acquisite viene suddivisa in un certo numero di piccole porzioni (“areole di interrogazione”) che divengono l'elemento unitario base per il calcolo.

Ogni areola della prima immagine si correla alla corrispondente areola della seconda, in modo da stimare un vettore medio di spostamento delle particelle.

In questo lavoro l'elaborazione delle immagini è stata eseguita adottando il software DynamicStudio e operando una sovrapposizione del 50%, una grandezza dell'area di interrogazione pari a 32x32 pixel.⁽¹³⁾

Per quanto riguarda il liquido, tipicamente nel caso di misure in regime turbolento e condizioni monofasiche, bastano 300 immagini per avere una velocità media affidabile mentre il numero di coppie di immagini è di solito molto più elevato per ottenere un'indipendenza statistica delle fluttuazioni turbolente.

Nel presente lavoro il numero minimo di coppie di immagini oltre il quale il campo di moto risulta indipendente dal numero di immagini acquisite, dipendeva dalla specifica configurazione. Nella maggior parte dei casi sono state necessarie 1000 immagini.^(14,15)

3.3.1.5 Intervallo fra due fotogrammi

L'intervallo temporale tra due fotogrammi serve per calcolare la velocità istantanea.

Un modo affidabile per catturare il numero massimo di coppie di particelle, è definire lo spostamento della particella come $\frac{1}{4}$ dell'area di interrogazione (L_{IA}).⁽¹⁴⁾

L'intervallo Δt è quindi determinato come funzione del fattore di scala dell'oggetto (S), dell' L_{IA} e la velocità massima all'interno del sistema (V_{tip}) come segue:

$$\Delta t = \frac{0,25 L_{IA} S}{V_{tip}} \quad (3.3)$$

Tuttavia essendo il campo di velocità nel reattore fortemente tridimensionale, il movimento delle particelle attraverso il piano influisce sulla precisione della misurazione, così, Δt e lo spessore del fascio laser (Z_l), devono essere scelti in relazione alla velocità perpendicolare al piano di misura (U_z), in modo che anche la seguente relazione venga rispettata:

$$\frac{U_z \Delta t}{Z_l} \leq 0,25 \quad (3.4)$$

In questo lavoro di tesi, verranno utilizzati questi criteri per la stima del Δt da utilizzare nelle misure.⁽¹²⁾

3.3.2 Acquisizioni con la tecnica PLIF

Analogamente alla tecnica PIV, le prove PLIF devono essere eseguite in un luogo oscurato, in modo da minimizzare il disturbo dovuto alla luce dell'ambiente e da massimizzare il rapporto segnale/rumore. La disposizione delle apparecchiature è identica a quella descritta per le prove PIV-2D. La differenza sostanziale rispetto alle misure PIV, in termini di componenti del sistema, è l'inserimento nel reattore di un sistema di iniezione del tracciante fluorescente (Rhodamina-6G). Dopo aver riempito il reattore con il fluido prescelto, le prime operazioni da effettuare sono (come nella tecnica PIV), la messa a fuoco e la determinazione dell'obiettivo della telecamera. L'utilizzo della Rhodamina-6G, che emette nello spettro giallo/arancione, rende necessaria l'applicazione di un filtro arancione alla telecamera. Si carica la siringa da collegare al tubicino con 10ml di soluzione 204mg/L di Rhodamina-6G e si porta la girante alla velocità di agitazione voluta. A questo punto si fissa il numero di immagini e si fa partire l'acquisizione.

4 PROCEDURA PER L'ELABORAZIONE DEI DATI

In seguito verranno illustrate le procedure adottate per l'elaborazione dei dati grezzi al fine di ottenere i risultati.

4.1 Elaborazioni delle immagini PIV

Di seguito viene riportata la procedura seguita per l'elaborazione delle immagini acquisite con la tecnica PIV su piani orizzontali e verticali, al fine di ottenere il campo di moto medio del fluido sottoposto ad agitazione.

La procedura^(7,8), da applicare singolarmente ad ogni serie di coppie di immagini relative ad una determinata fase, è la seguente:

- ✓ **Image mean**: è un metodo numerico che calcola l'intensità media di tutti i pixel che compongono l'immagine;
- ✓ **Image Arithmetic**: l'immagine media viene sottratta da tutte le immagini in modo da attenuare il rumore associato al segnale;
- ✓ **Cross-Correlation**: genera un vettore velocità medio, dato dal picco principale della funzione cross-correlazione, che fornisce il vettore spostamento medio per ogni area di interrogazione (IA); diviso per il tempo tra le immagini fornisce il vettore velocità. La dimensione delle IA adoperata è pari a 32×32 px.
- ✓ **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 valore pre-impostato, allora la correlazione è di tipo casuale: quindi, il vettore verrà scartato. In caso contrario, esiste correlazione ed il vettore viene accettato. Nel presente lavoro, si è adottato un rapporto tra i picchi pari a 1.2.
- ✓ **Range Validation**: utile ad eliminare i vettori che non rispettano i requisiti del modulo della grandezza misurata. Occorre precisare che la massima velocità del fluido nel reattore è pari alla velocità periferica della girante. Quindi, per ogni velocità di agitazione considerata, vengono eliminati tutti vettori con modulo maggiore o uguale a V_{tip} .
- ✓ **Vector Statistics**: restituisce la mappa vettoriale risultante dalla media delle mappe istantanee scaturite dalla "Range Validation".

I risultati di questa serie di operazioni sono:

- ✓ Un foglio di calcolo riassuntivo dove per ogni vettore presente nella mappa sono riportati: posizione (in pixel e mm) rispetto all'origine del sistema di riferimento, componenti della velocità media, deviazione standard, varianza, coefficiente di correlazione, status del vettore (0 = vettore valido; 1 = vettore rigettato, generato da disturbi) e il numero N di vettori validi su cui viene fatta la media in una determinata posizione. Si è operato un cambiamento di coordinate rispetto a quelle utilizzate dal programma di elaborazione delle immagini a supporto della PIV. In particolare mentre il programma usa un sistema di riferimento cartesiano piano, centrato sul vertice in basso a sinistra dell'immagine acquisita, i risultati sono trasformati in un sistema di coordinate cilindriche r , θ , z centrato nel centro del fondo del reattore, con r quale coordinata radiale, θ circonferenziale e z assiale. Per quanto riguarda i piani orizzontali, le convenzioni adottate circa il verso delle coordinate sono: $\theta > 0$ se antiorario e $r > 0$ se uscente dalla girante. Per i piani verticali invece: $z > 0$ verso l'alto e $r < 0$.

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;
- V, U e W risultano positivi quando concordi con il loro asse di riferimento.

Per ottenere una mappa vettoriale “pulita”, sono stati ulteriormente rielaborati i dati, facendo attenzione alle coordinate per i piani orizzontali e verticali, poi sono stati eliminati i vettori con bassa validazione ($N < \frac{1}{4}$ immagini totali) e attraverso il programma Tecplot360 è stata ricostruita la mappa vettoriale.

Un esempio dei dati ottenuti viene riportato in forma grafica in Figura 4.1, dove è rappresentata la mappa del modulo del vettore velocità sul piano di misura assiale al diagramma vettoriale corrispondente.

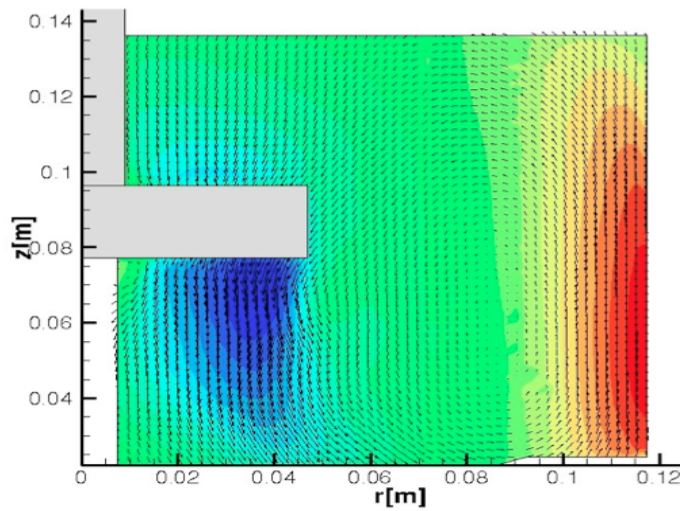


Figura 4.1 Campo di moto dopo elaborazione con Tecplot360

4.2 Sistema di riferimento adottato per il reattore di geometria standard e non standard

L'identificazione del sistema di riferimento è necessario per poter interpretare i risultati ottenuti:

a) Reattore di geometria standard

Le porzioni del reattore standard oggetto delle misure, vengono mostrate in figura 4.2 per le misure su piano verticale (a) e misure su piano orizzontale (b).

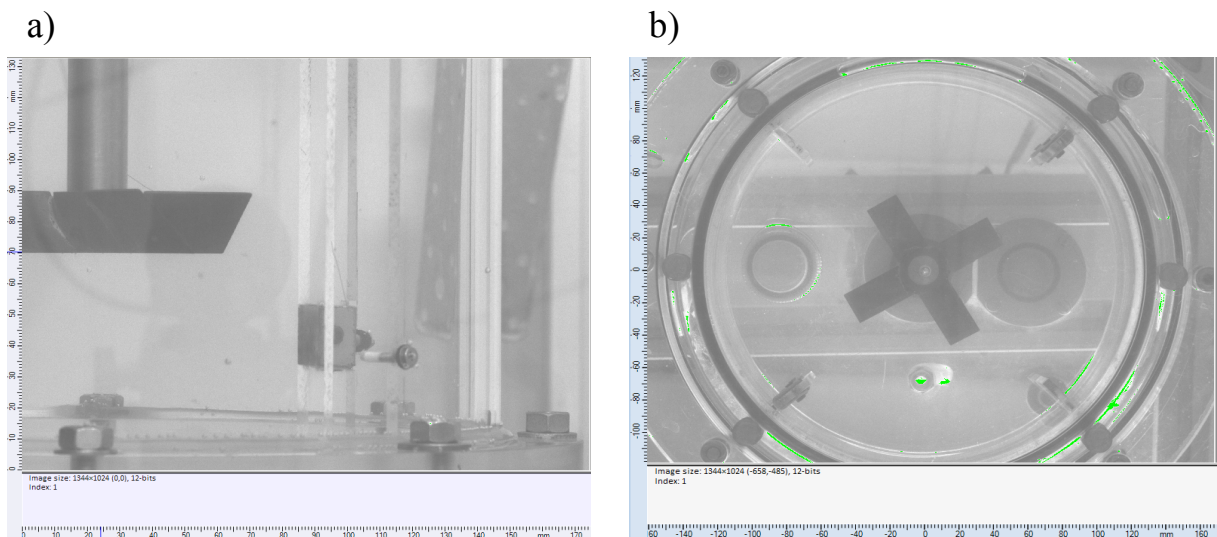


Figura 4.2 Porzione di reattore standard selezionata per le misure (immagine di calibrazione), su piano verticale (a) e piano orizzontale (b)

In tabella 4.1. vengono riportati i risultati della calibrazione.

Tabella 4.1 Dimensioni in px e mm dell'area misurata e dell'IA

Piano verticale (a) $X_0 = 23 \text{ mm}$ $Y_0 = 70 \text{ mm}$	Area di misura	1344x1024 pixel
		174x133 mm
	Area di interrogazione	32 x 32 pixel
		4.19 x 4.19 mm
Piano orizzontale (b) $X_0 = 164 \text{ mm}$ $Y_0 = 115 \text{ mm}$	Area di misura	1344x1024 pixel
		164 x 115 mm
	Area di interrogazione	32 x 32 pixel
		3,75 x 3,75 mm

b) Reattore di geometria non standard

La porzione del reattore non standard, oggetto delle misure viene mostrata in Figura 4.3.

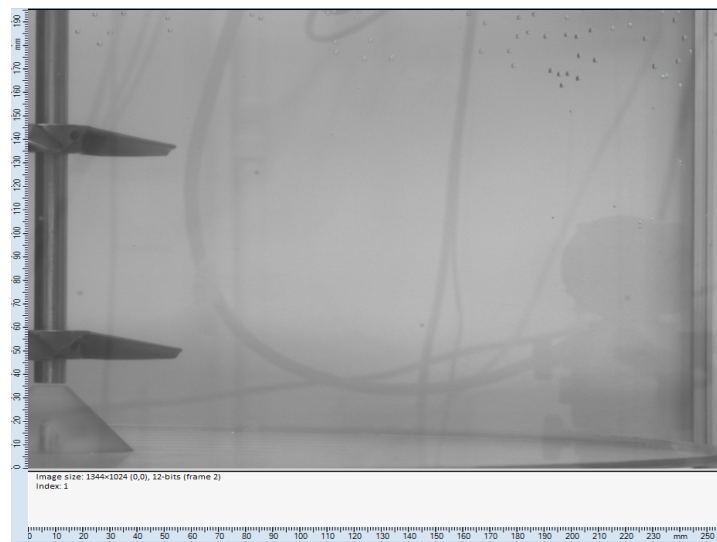


Figura 4.3 Porzione del reattore selezionata per le misure (immagine di calibrazione).

In tabella 4.2 vengono riportati i valori di px tradotti in mm risultanti dalla calibrazione.

Tabella 4.2 Dimensioni in px e mm dell'area misurata e dell'IA

Piano verticale (a) $X_0 = 8 \text{ mm}$ $Y_0 = 47 \text{ mm}$	Area di misura	1344x1024 pixel
		225x195 mm
	Area di interrogazione	32 x 32 pixel
		5,27x5,25 mm

4.3 Elaborazione delle immagini PLIF

La procedura da applicare 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**”. Con questo metodo si oscurano tutte le zone dell’immagine non interessate dal moto del fluido (ad esempio albero e giranti). Una precisa realizzazione di questa procedura è di fondamentale importanza affinché il calcolo del tempo di miscelazione non sia falsato dall’analisi di zone in cui non vi è moto del fluido.
- ✓ Si genera l’immagine media dei fotogrammi “iniziali” (precedenti all’iniezione del tracciante), utilizzando la funzione “**Mean Image**”.
- ✓ Si sottrae l’immagine media “iniziale” da tutte le immagini acquisite “mascherate” tramite la funzione “**Substract Image**”. In tal modo si ottengono nuove immagini prive del “rumore di fondo” contenuto nell’immagine media iniziale.
- ✓ Si sottrae l’immagine media “iniziale” dall’immagine media “finale” per mezzo della funzione “**Substract Image**”, per l’eliminazione del “rumore di fondo”.
- ✓ Si dividono le immagini mascherate depurate dal rumore di fondo per l’immagine media finale, depurata anch’essa dal rumore di fondo tramite la funzione “**Divide by image**”. In questo modo si opera una “normalizzazione” delle immagini, che vengono divise per l’intensità media dell’immagine a completa miscelazione.
- ✓ Si moltiplicano aritmeticamente le immagini ottenute al punto precedente per un valore compreso tra 500 e 2000 attraverso la funzione “**Multiply by**”. 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 di tracciante iniettato: l’intervallo indicato (500-2000) è quello ottimale per l’utilizzo di Rhodamina-6G, con concentrazione massima all’interno del sistema di 90 ppm (10 ml di soluzione 204 mg/L in un reattore da 10000 L).⁽¹²⁾

A questo punto si è in grado di determinare il tempo di miscelazione del sistema, ovvero il tempo necessario per ottenere un prefissato grado di omogeneizzazione nel sistema a seguito dell'addizione, il più possibile istantanea di un tracciante.

Tale valutazione viene effettuata tramite l'analisi del coefficiente di variazione (CoV) delle immagini modificate dalla procedura appena descritta.

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

$$CoV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i}{\bar{c}}\right)^2}{N-1}} \quad (4.1)$$

dove:

- ✓ c_i è la concentrazione nel singolo pixel i-esimo dell'immagine
- ✓ \bar{c} è la concentrazione media di tutta l'immagine
- ✓ N è il numero totale di pixel costituenti l'immagine

Dal valore di CoV si ricava il CoV dimensionale (CoV_{adim}), definito come:

$$CoV_{adim} = \frac{CoV_i - C\bar{O}V_{fin}}{CoV_{iniz} - C\bar{O}V_{fin}} \quad (4.2)$$

dove:

- ✓ CoV è il CoV dell'immagine i-esima
- ✓ $C\bar{O}V_{fin}$ è il CoV medio finale (calcolato sulle ultime 30 immagini)
- ✓ $C\bar{O}V_{iniz}$ è il CoV dell'immagine in cui si ha l'iniezione del tracciante

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

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

5 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati sperimentali che vengono presentati in questo capitolo sono suddivisi in base alle due tipologie di reattori studiati.

5.1 **Misure preliminari e identificazione dei parametri di misura nel reattore di geometria standard**

Prima di effettuare la caratterizzazione fluidodinamica del reattore di geometria standard provvisto e non provvisto di setti frangivortice, sono state eseguite delle prove preliminari per poter quantificare con accuratezza gli errori associati alla misura e per determinare i parametri che consentono di minimizzarli.

E' stato preso come riferimento il reattore settato ed il piano di misura verticale a 45° tra due setti successivi.

5.1.1 **Tempo tra i pulsii del laser**

Per identificare l'effetto del tempo che intercorre tra la coppia di pulsii di luce laser, Δt , sulla qualità delle misure di velocità, le acquisizioni sono state ripetute nelle medesime condizioni utilizzando i seguenti valori di Δt : 150, 300, 450 μs ; per ogni prova, sono state acquisite 1000 coppie di immagini ad una velocità di rotazione dell'albero costante pari a 450 rpm.

In Figura 5.1 è riportato un esempio di diagramma vettoriale del campo di moto sovrapposto alla mappa della componente assiale della velocità media impiegando un Δt pari a 300 μs .

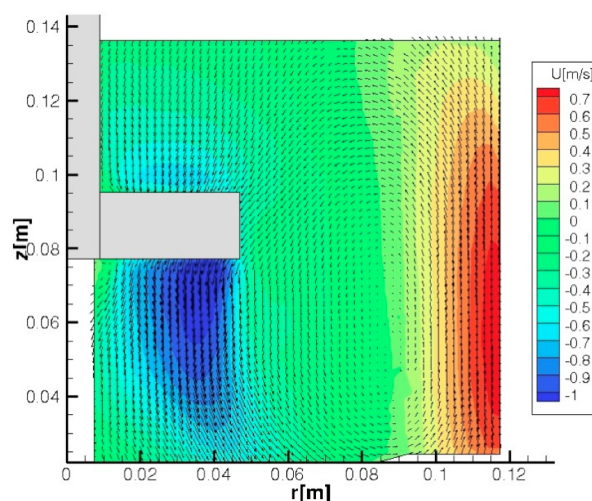


Figura 5.1 Vettori di velocità sovrapposti alla mappa del modulo della componente U

Nelle mappe ottenute con la procedura descritta al capitolo precedente è possibile osservare un flusso assiale deciso sotto la pala della girante fino al fondo del reattore che poi diminuisce fino ad annullarsi; complessivamente si forma un unico anello di circolazione del fluido dovuto all'interazione tra il getto di scarica della girante, il fondo del reattore e la parete dei setti frangivortice.

In Figura 5.2 vengono riportati profili di velocità delle componenti assiali e radiali ad una quota $Z/T = 1/5$ (zona del getto), ottenuti al variare del Δt .

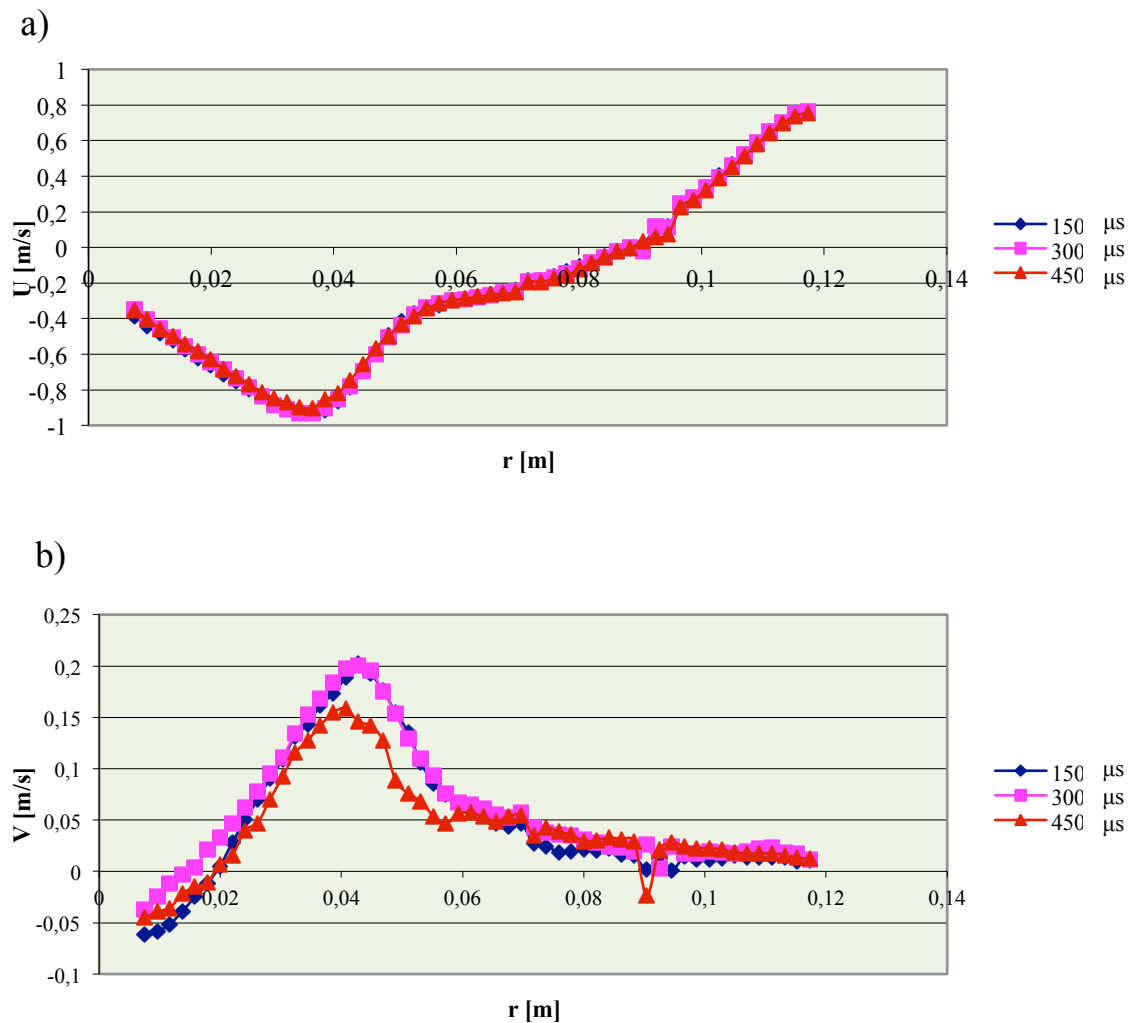


Figura 5.2 Confronto di profili di velocità ottenuti al valore di Δt lungo il raggio e $Z/T=1/5$;
(a) componente assiale, (b) componente radiale

Da questi profili si conferma l'alta componente assiale che caratterizza il moto del fluido, alti valori iniziali (negativi perché i vettori vanno verso il basso) che via via diminuiscono avvicinandosi verso la parete del reattore.

La componente radiale ha un modulo meno elevato. Mentre per la componente assiale, variando il Δt non si nota un effetto molto modesto, per la componente radiale si notano variazioni più significative lungo il raggio selezionato.

Poiché si è osservata una dipendenza dei risultati ottenuti dal Δt , in particolare per la componente radiale, per raffinare l'analisi le prove sono state ripetute variando in maniera sistematica il tempo tra i pulsii da $50 \mu s$ a $450 \mu s$ con un passo di $50 \mu s$, mantenendo tutti i gli altri parametri costanti ($N=450rpm$ e acquisendo 1000 immagini).

In Figura 5.3 vengono riportati i vettori e la mappa della componente assiale ottenuti in corrispondenza di quattro Δt selezionati.

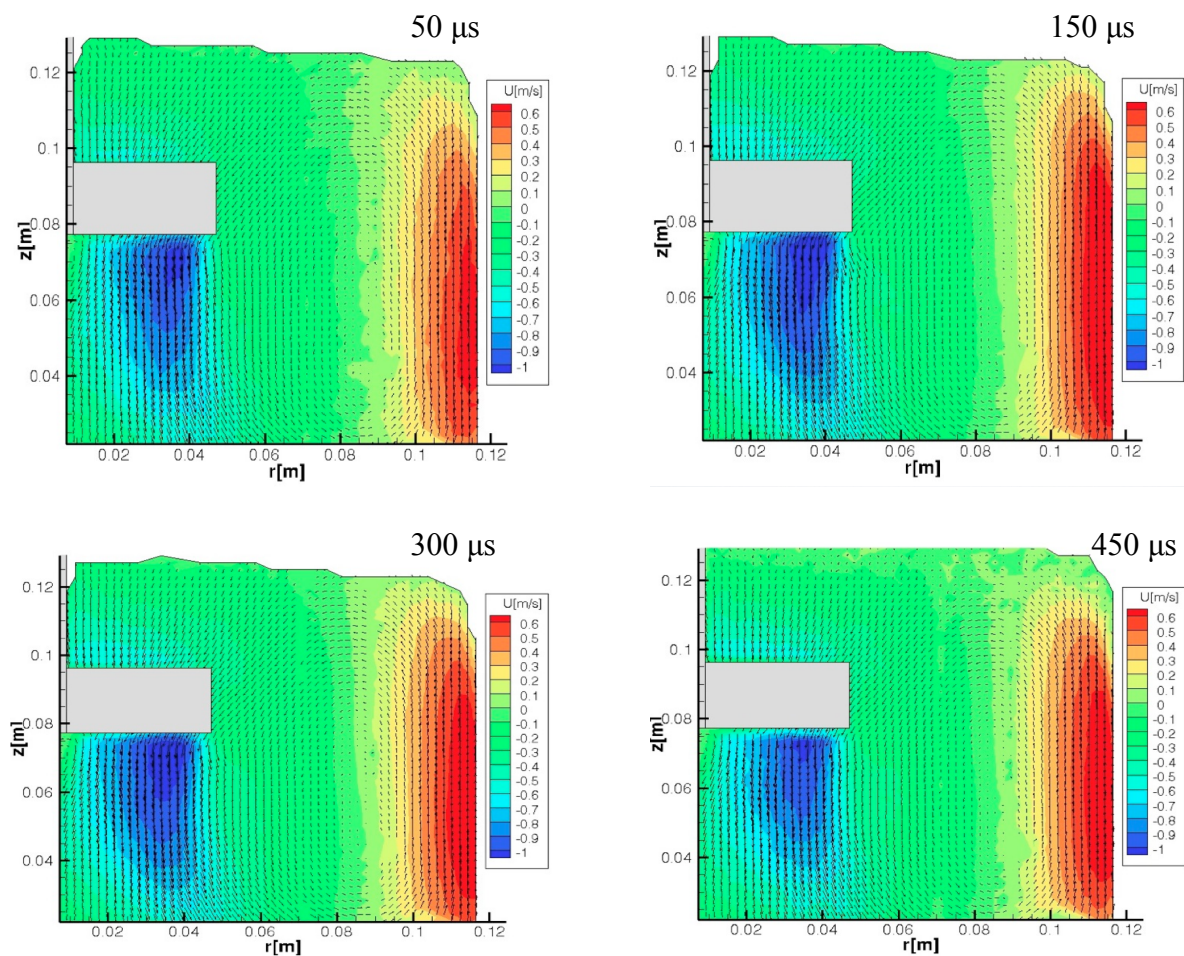


Figura 5.3 Vettori di velocità sovrapposti alle mappe del modulo della componente assiale variando Δt

Come è possibile osservare dai risultati mostrati in Figura 5.3 l'effetto del Δt è tutt'altro che modesto. Infatti, variando il Δt varia complessivamente anche la componente assiale del vettore velocità, come è evidente in articolare nella zona del getto sotto la girante. Seppure in linea di principio non è possibile identificare un valore di Δt che ottimizzi l'accuratezza della misura in tutto il volume del reattore, essendo le variazioni spaziali del campo di velocità molto significative, è tuttavia possibile provare a stimare la variazione ottenuta al variare del parametro investigato. Con riferimento ai profili di velocità riportati in Figura 5.4 che mostrano il medesimo andamento ma degli scostamenti del valore assoluto visibili se pure modesti.

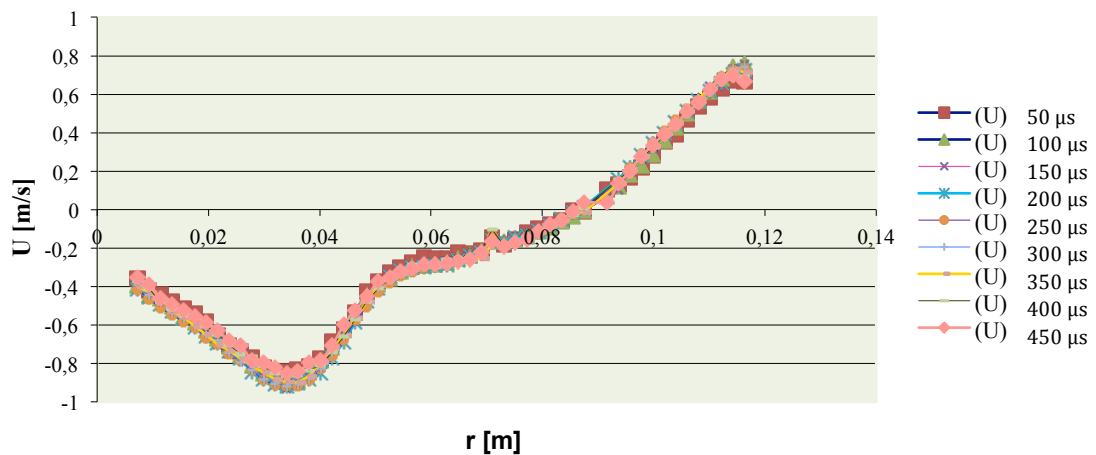


Figura 5.4 Profili di velocità assiale ottenuti da 50 a 450 μs , $Z/T=1/5$

La deviazione quadratica media delle velocità assiali medie (“root-mean-square”, rms)⁽¹⁴⁾, che permette di quantificare la variazione tra le misurazioni, è stata valutata applicando la definizione che segue:

$$rms = \frac{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [(u_{\Delta t1}] - u_{\Delta t2}] \right]^{1/2}}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (u_{\Delta t2})^2 \right]^{1/2}} \quad (5.1)$$

I valori della deviazione quadratica media così ottenuti tra le coppie di Δt sono riportate in Figura 5.5.

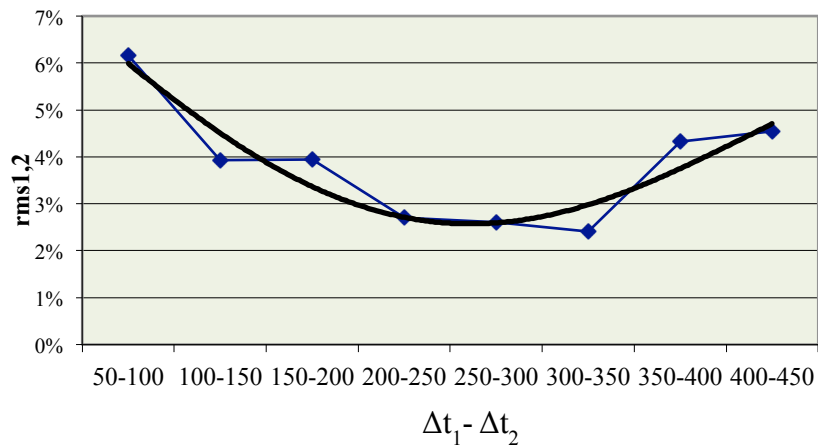


Figura 5.5 Gradico RMS

Come è possibile osservare, la curva che interpola i dati sperimentali presenta un minimo in corrispondenza di un intervallo di tempo di 300 μ s.

5.1.2 Ottimizzazione del numero di immagini

Dopo aver identificato il valore di Δt ottimale, abbiamo avvicinato la telecamera al reattore, e successivamente ottimizzato il numero di immagini per l'acquisizione.

Con l'avvicinamento della telecamera è possibile aumentare la risoluzione del campo di moto che caratterizza il fluido all'interno del reattore. L'identificazione di un numero maggiore di vettori istantanei consente di catturare eventuali peculiarità del moto del fluido che con una griglia di vettori meno fitta potrebbero non essere identificate. Nel caso in esame però avvicinando la telecamera al reattore sono stati ottenuti dei profili di velocità praticamente sovrapponibili e pertanto non si è rilevata alcuna criticità almeno nell'ambito delle risoluzioni adottate in questo lavoro.

Per identificare il numero di immagini che garantisce di ottenere l'indipendenza statistica del campo di moto medio, le acquisizioni sono state eseguite a $\Delta t=300 \mu$ s, $N=450$ rpm variando il numero di coppie di immagini da 500, 1000 fino a 2000. I vettori di velocità sovrapposti alle mappe del modulo della componente assiale ottenuti sono riportati in Figura 5.6.

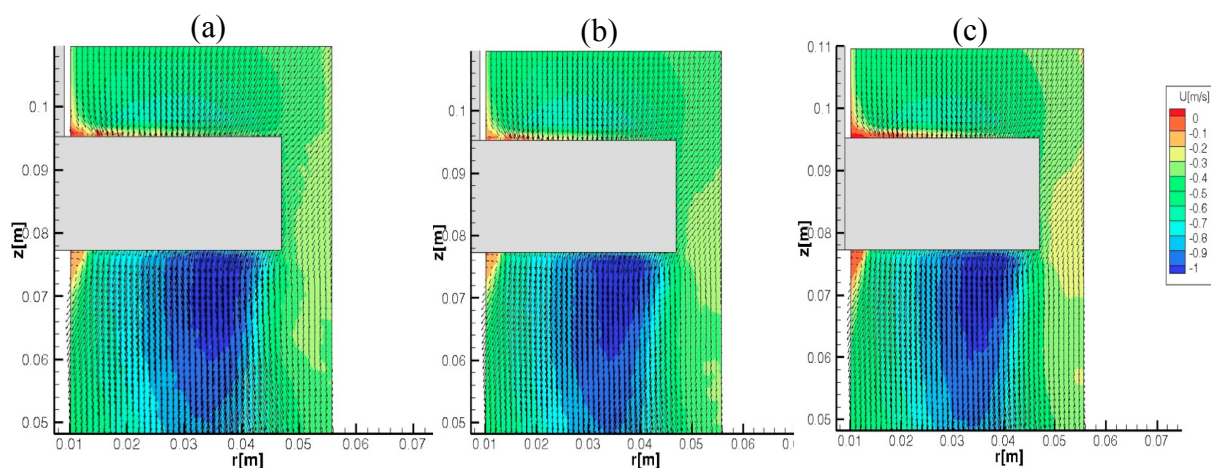


Figura 5.6 Vettori di velocità sovrapposti alle mappe del modulo della componente assiale variando il numero di coppie di immagini: (a) 500 (b) 1000 (c)2000

Dagli studi sui reattori agitati meccanicamente, il numero di coppie di immagini da acquisire risulta essere pari a 1000 per ottenere una misura media accurata.⁽¹⁴⁾

Si conferma che dall'analisi dei campi di moto è stato possibile valutare il numero di vettori che contribuiscono alla media; l'acquisizione di 500 immagini non dà un'indipendenza statistica, mentre questa si raggiunge con campi di moto ottenuti a 1000 e 2000 immagini.

5.2 Analisi del campo di velocità nel reattore di geometria standard

Le misure per l'analisi del campo di velocità del liquido sono state effettuate sia sul piano verticale sin qui considerato sia su alcuni piani orizzontali.

Il piano verticale è stato caratterizzato più volte, variando i parametri descritti in precedenza.

Per la caratterizzazione dei piani orizzontali sono state misurate le componenti della velocità tangenziale e radiale a quote selezionate.

I piani di misura sono stati tre: il primo, posto a $Z/T=1/5$ posizionato sotto la girante, il secondo, a $Z/T=1/3$ coincidente con il piano della girante ed il terzo, posto a $Z/T=1/2$ quindi sopra la girante. Le acquisizioni sono state effettuate alle seguenti velocità dell'albero $N= 100, 250, 450$ rpm.

Per ogni prova, sono state acquisite 1000 coppie di immagini con un intervallo Δt calcolato in funzione della V_{tip} ⁽¹⁴⁾. I valori adottati sono riportati in Tabella 5.1.

Tabella 5.1 Valori di Δt (μs) ottenuti attraverso il criterio della V_{tip}

N (rpm)	V_{tip} (m/s)	Δt (μs)
100	0,49	1349
250	1,23	540
450	2,21	300

In Figura 5.7 vengono confrontati i campi di moto ottenuti a $Z/T= 1/3$, N 100, 250 e 450 rpm.

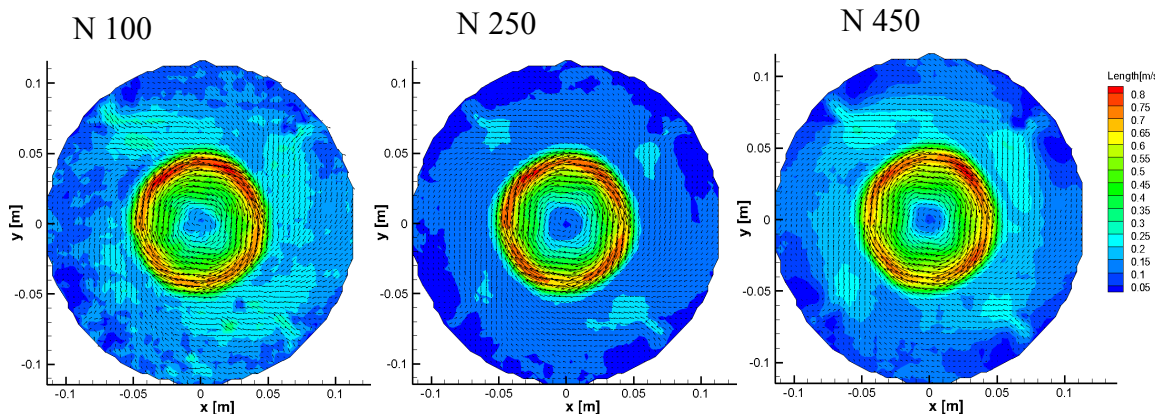


Figura 5.7 Confronto dei vettori di velocità sovrapposti alle mappe del modulo delle velocità a N 100, 250, 450 rpm a Δt calcolati con il criterio della V_{tip}

Il modulo delle velocità rimane sempre alto vicino alla girante, e diminuisce andando verso le pareti; con i setti frangivortice si nota la formazione dell'anello di ricircolo vicino ad ogni setto. Se da un lato la presenza dei setti permette una migliore miscelazione all'interno del reattore, si nota che le velocità a causa del ricircolo risultano essere basse proprio vicino ai setti.

5.3 Analisi del campo di velocità del reattore senza setti frangivortice

Le misure su piano verticale per il reattore con configurazione standard senza setti frangivortice non hanno riportato dati facilmente riproducibili, per la difficoltà nel caratterizzare il moto instabile che si stabilisce sotto la girante. Per questo motivo si è deciso di mostrare i risultati ottenuti per il reattore senza setti frangivortice, solamente su piano orizzontale.

5.3.1 Misure su piano orizzontale – reattore senza setti frangivortice

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti misurando le componenti della velocità tangenziale e radiale su piani orizzontali posti a quote selezionate.

Come nel caso del recipiente settato, anche nel recipiente sprovvisto di setti i piani di misura sono stati tre: il primo, posto a $Z/T=1/5$ per descrivere il comportamento sotto la girante, il secondo, a $Z/T=1/3$ coincidente con il piano della girante ed il terzo, posto a $Z/T=1/2$ per individuare il moto sopra la girante.

Le acquisizioni sono state effettuate alle seguenti velocità dell'albero $N=100, 250, 350$ e 450 rpm. Per ogni prova, sono state acquisite 1000 coppie di immagini con un intervallo temporale tra i pulsii laser calcolato con il criterio della $V_{tip}^{(14)}$: i valori vengono riportati in Tabella 5.2.

Tabella 5.2 Valori di Δt (μs) ottenuti attraverso il criterio della V_{tip}

N (rpm)	V_{tip} (m/s)	Δt (μs)
100	0,49	1349
250	1,23	540
350	1,72	386
450	2,21	300

In Figura 5.8 vengono confrontati i campi di moto ottenuti a $Z/T=1/3$ a $N 100, 250, 350, 450$ rpm.

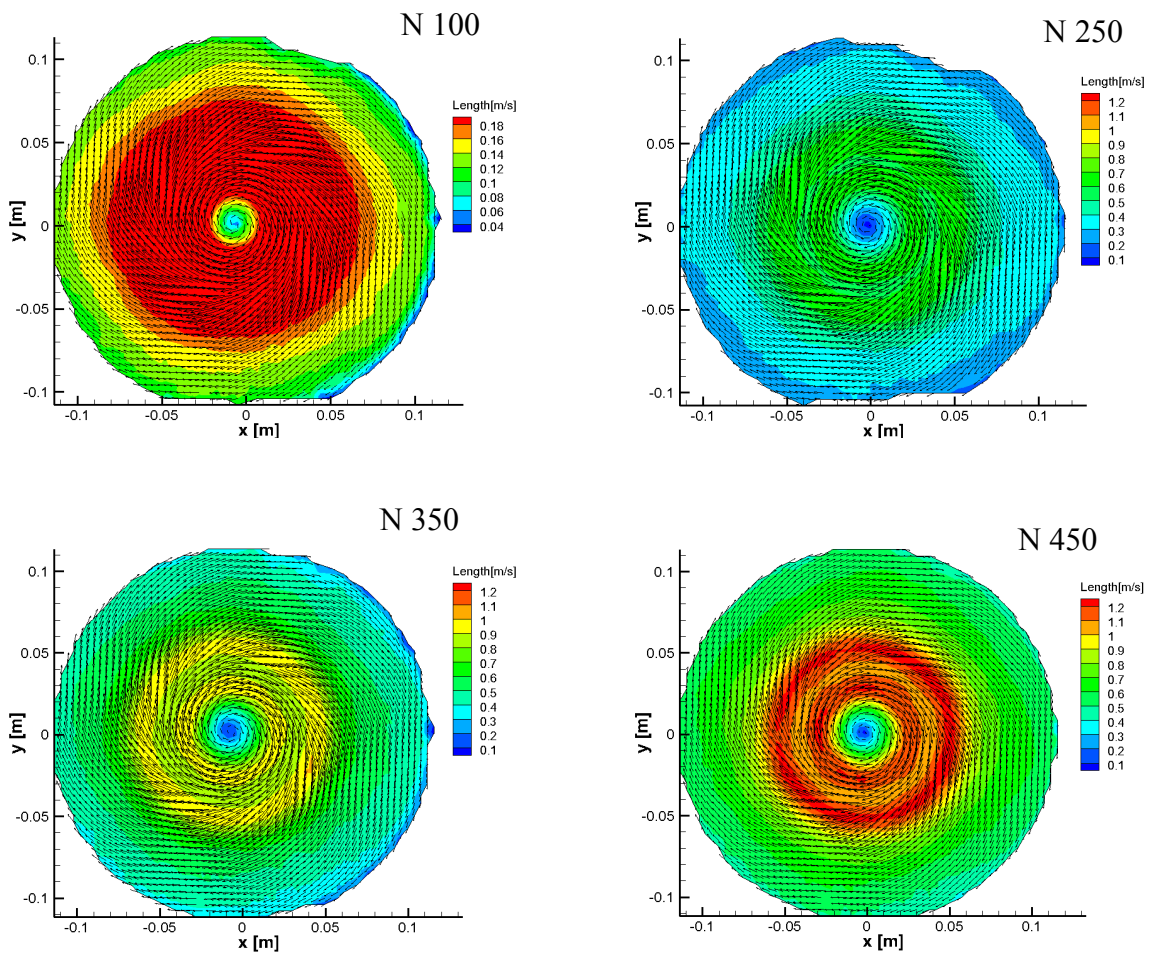


Figura 5.8 Confronto dei vettori di velocità sovrapposti alle mappe del modulo delle velocità a differenti N e Δt

Indipendentemente dal valore di velocità di agitazione per tutti i piani presi in esame i campo di velocità sui piani orizzontali hanno confermato una prevalente componente tangenziale del moto, come era da attendersi a causa dell'assenza dei setti.

5.4 Reattore di geometria non standard

Per la caratterizzazione del reattore di geometria “non standard”, sono state eseguite:

- ✓ Misure di potenza trasferita al fluido
- ✓ Indagini visive
- ✓ Misure fluidodinamiche locali
- ✓ Misure di qualità della miscelazione

Tutte le misure sono state eseguite durante la fase pseudo-stazionaria.

5.4.1 Misure di potenza

Le misure della potenza trasferita al fluido sono state effettuate attraverso un torsionometro montato sull'albero del reattore. Le misure sono state ripetute al variare della velocità di agitazione, N , per due diverse altezze di liquido, la prima corrispondente al reattore pieno e la seconda corrispondente al livello di liquido pari a $H_{liq}=1/2 H$. Le curve del numero di potenza, N_p , in funzione del numero di Reynolds rotazionale sono riportate in Figura 5.9.

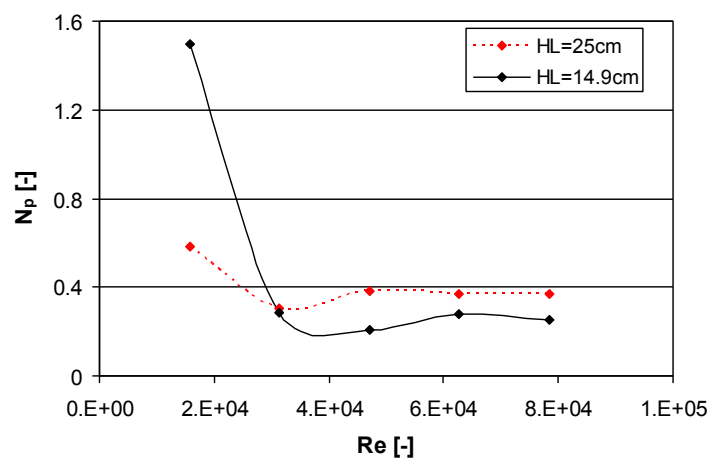


Figura 5.9 Numero di potenza misurato a due diverse altezze di liquido in funzione del numero di Reynolds

Come è possibile osservare, il regime di transizione si esaurisce attorno a $Re=5 \times 10^4$. Il numero di potenza riferito alla singola girante A310 è pari a circa 0.25 nel caso di reattore parzialmente riempito ed è più elevato nel caso di reattore pieno, come era ragionevole attendersi. In ogni caso i valori ottenuti sono del tutto congruenti con il valore fornito dal costruttore pari a 0.33 per reattori agitati settati di configurazione standard in regime turbolento.

5.4.2 Indagini visive

Successivamente sono state effettuate una serie di indagini basate sull'osservazione visiva del reattore, in quanto durante le misure di potenza si è osservato che, a causa della formazione del vortice centrale, la fluidodinamica nel reattore è caratterizzata da un moto fortemente instabile, con frequenze caratteristiche molto inferiori rispetto alla frequenza associata al moto della girante. Inoltre, si è osservato che la durata del transitorio necessario per raggiungere condizioni di moto pseudo-stazionario a partire da fluido fermo può essere di oltre due ordini di grandezza più elevata rispetto ai tempi caratteristici dei reattori agitati convenzionali, che risultano tipicamente pari ad alcune decine di secondi. In particolare, nel caso in esame la durata del transitorio varia da alcuni minuti ad oltre 40 minuti, a seconda della velocità di agitazione e del livello di liquido. La formazione del vortice centrale e l'instabilità del moto testimoniata dalla forte variazione della posizione dell'interfaccia acqua-aria è mostrata in Figura 5.10, dove sono riportate due immagini istantanee. Tali informazioni qualitative preliminari sono state utilizzate per identificare la modalità delle misure locali di velocità

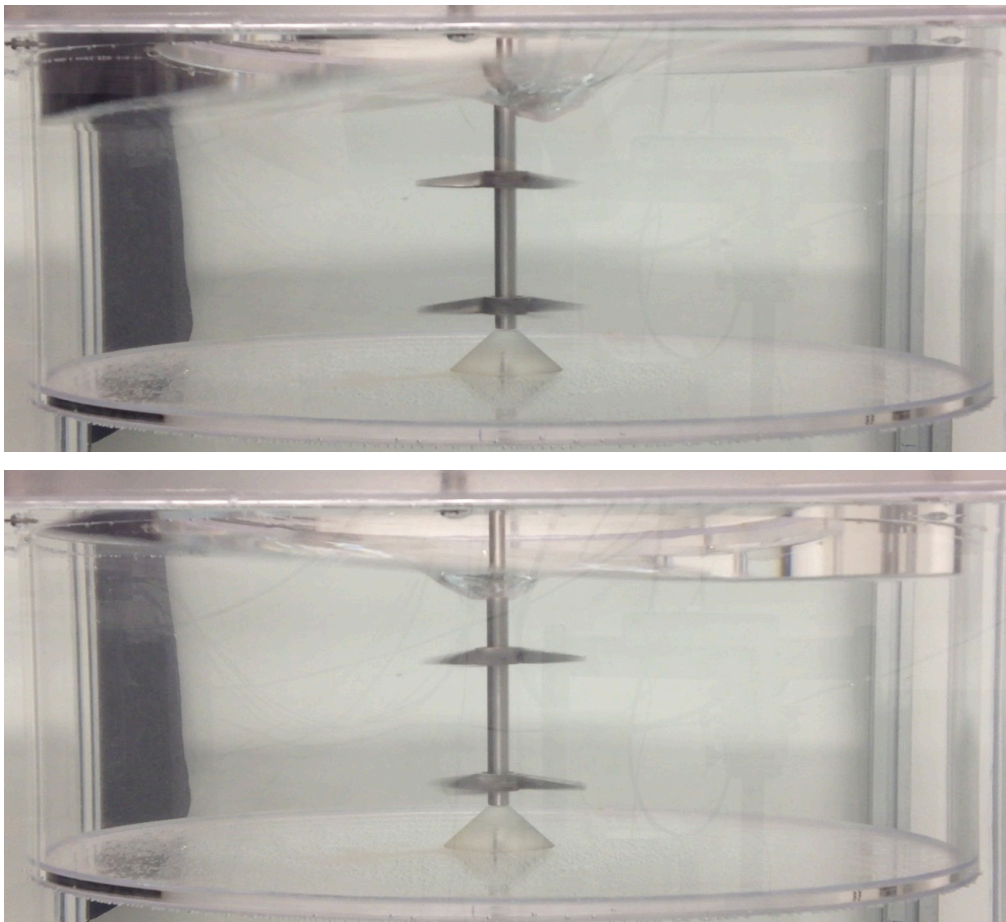


Figura 5.10 Formazione del vortice centrale e instabilità del moto

5.4.3 Misure fluidodinamiche locali

Successivamente sono state eseguite misure locali della velocità del fluido, in condizioni monofase.

I campi di velocità del liquido nel piano verticale diametrale illuminato dalla lama di luce laser sono stati ottenuti in numerose condizioni al variare della velocità di agitazione e dell'altezza di liquido.

5.4.3.1 Il campo di velocità a $H_{LIQUIDO} = 23,5\text{cm}$

Per la prima caratterizzazione del reattore, le acquisizioni sono state eseguite alle seguenti velocità di rotazione dell'albero $N=422, 300, 200$ rpm.

La velocità $N = 422$ rpm corrisponde alla velocità massima prima dell'ingolfamento della girante superiore causato dal vortice centrale, ad un'altezza di liquido = 23,5cm.

Per ogni prova sono state acquisite 1000 coppie di immagini utilizzando il tempo tra i puls laser calcolato per ogni V_{tip} , riportati in tabella 5.3.

Tabella 5.3 Valori di Δt (μs) ottenuti attraverso il criterio della V_{tip}

N (rpm)	100	150	200	250	300	350	400	422
V_{tip} (m/s)	0,51	0,76	1,02	1,27	1,52	1,78	2,03	2,14
Δt (μs)	2988	1922	1494	1195	996	853	747	708

Nelle Figure 5.11,12,13,14 vengono riportati alcuni campi di moto a differenti velocità di rotazione.

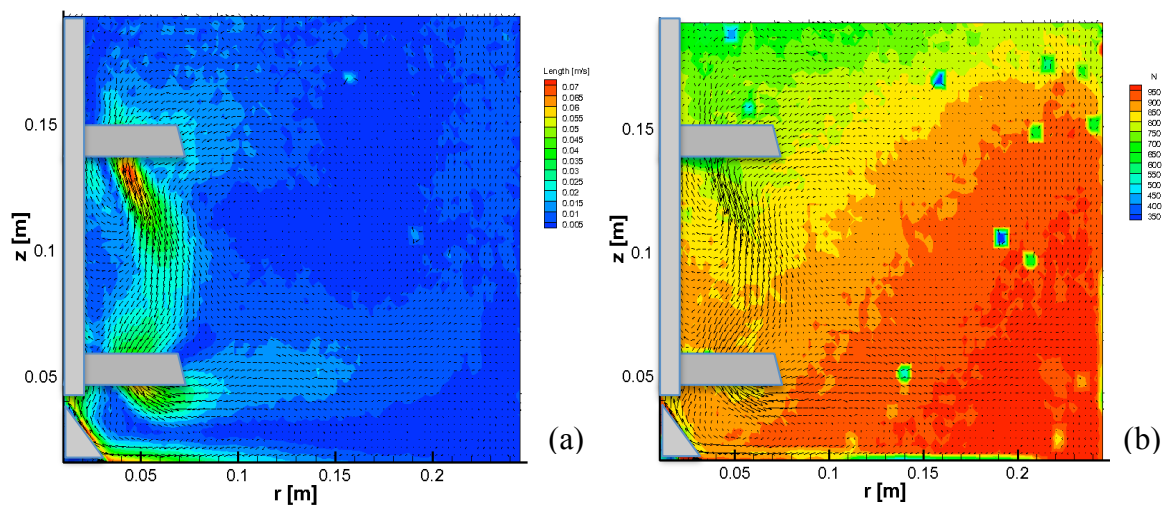


Figura 5.11 Campo vettoriale di velocità sovrapposto al modulo del vettore velocità (a) e numero di vettori che hanno contribuito al calcolo del valore medio (b) a $N 100$ rpm e $\Delta t 2988 \mu\text{s}$

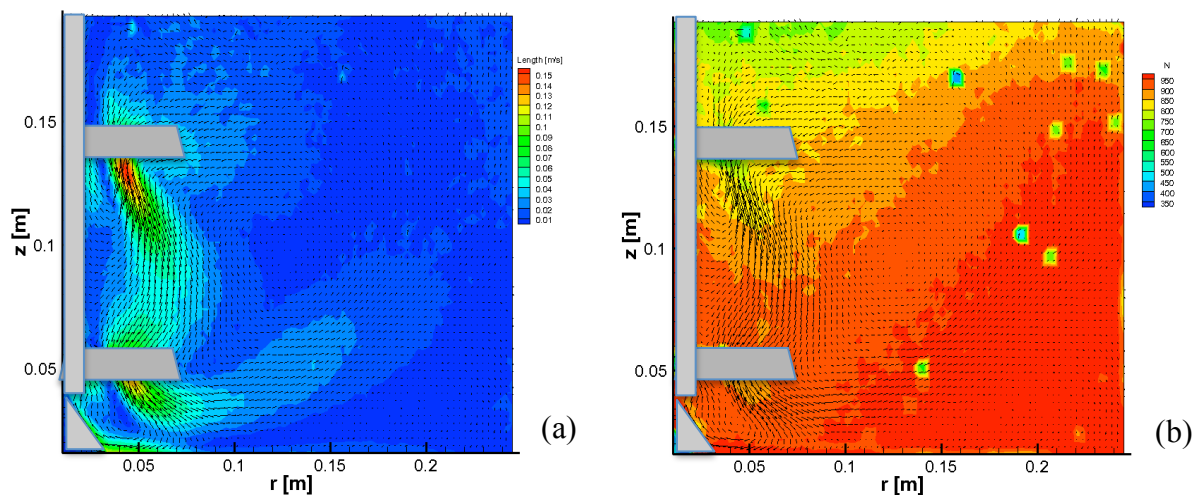


Figura 5.12 Campo vettoriale di velocità sovrapposto al modulo del vettore velocità (a) e numero di vettori che hanno contribuito al calcolo del valore medio (b) a N 200 rpm e Δt 1494 μs

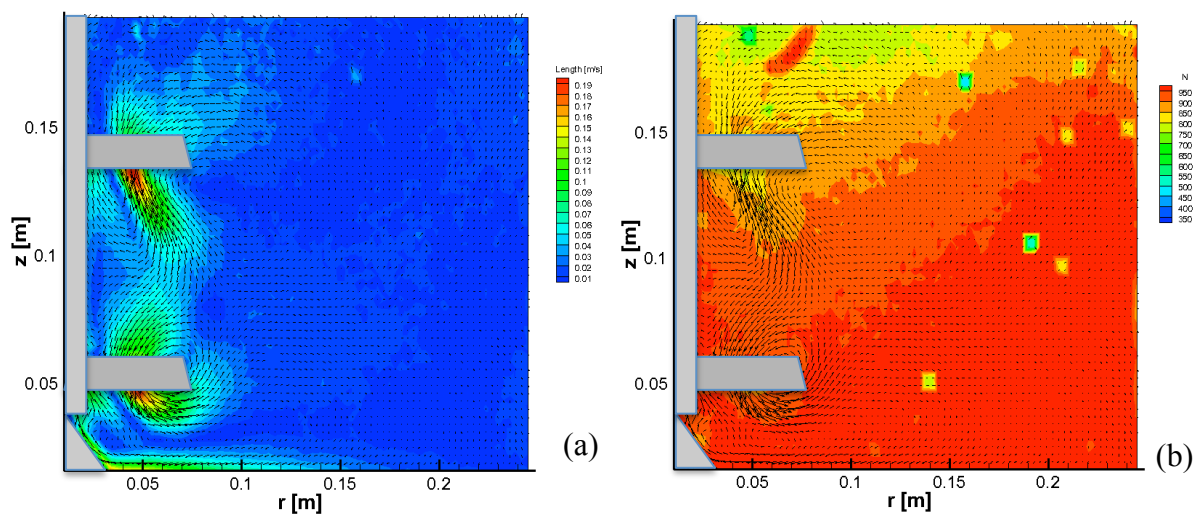


Figura 5.13 Campo vettoriale di velocità sovrapposto al modulo del vettore velocità (a) e numero di vettori che hanno contribuito al calcolo del valore medio (b) a N 300 rpm e Δt 996 μs

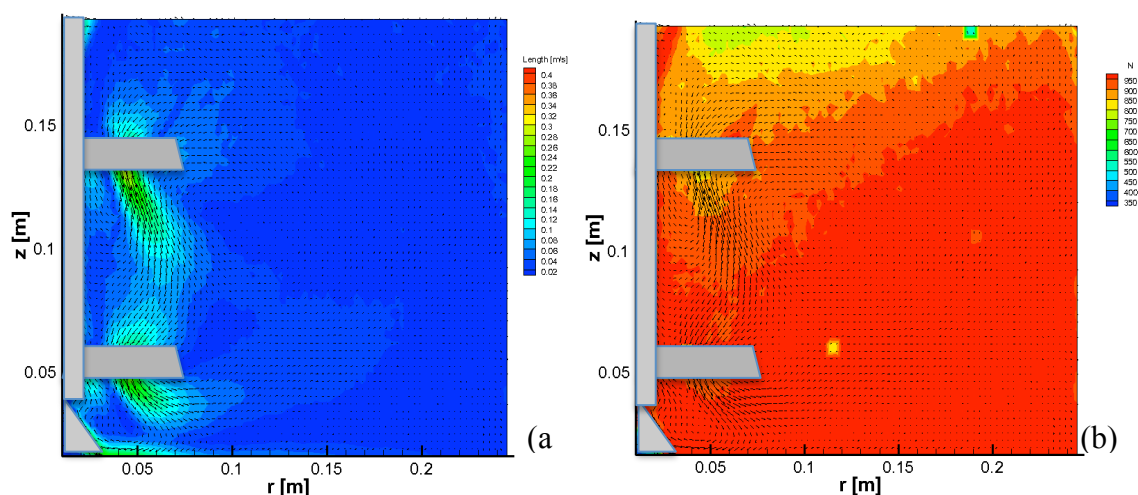


Figura 5.14 Campo vettoriale di velocità sovrapposto al modulo del vettore velocità (a) e numero di vettori che hanno contribuito al calcolo del valore medio (b) a N 422 rpm e Δt 708 μs

Dai campi di moto ottenuti, si nota che le giranti imprimono al fluido una forte componente assiale, che va via via diminuendo avvicinandosi alle pareti del reattore; alla velocità di rotazione pari a 422 rpm, si nota la formazione di vortici attorno alle giranti, questo permette una buona miscelazione ma solamente nella zona centrale del reattore a differenza della zona esterna vicino alla parete, dove è presente una zona completamente stagnante. Diminuendo la velocità, il moto cambia vicino alle giranti, si ha un moto assiale senza formazione di anelli di ricircolo. Come è possibile osservare dalle mappe dei valori di vettori istantanei, che danno luogo al campo di moto medio, nella zona stagnante, il fluido non riesce ad avere un buon mescolamento, questo porta a non determinare in modo accurato lo spostamento delle particelle traccianti.

5.4.3.2 Il campo di velocità ad $H_L = 19,5\text{cm}$

Le acquisizioni sono state eseguite a differenti velocità di rotazione. A questa altezza di liquido, 311rpm risulta essere la velocità di rotazione massima prima che la girante superiore si ingolfi.

Sono stati valutati i campi di moto, utilizzando il tempo tra i pulsii laser calcolato per ogni $V_{tip}^{(14)}$, riportati in Tabella 5.4.

Tabella 5.4 Valori di Δt (μs) ottenuti attraverso il criterio della V_{tip}

N (rpm)	150	230	311
V_{tip} (m/s)	0,76	1,17	1,58
Δt (μs)	1992	1299	960

I campi di moto ottenuti ad ogni velocità di rotazione vengono riportati nelle figure 5,15-16-17.

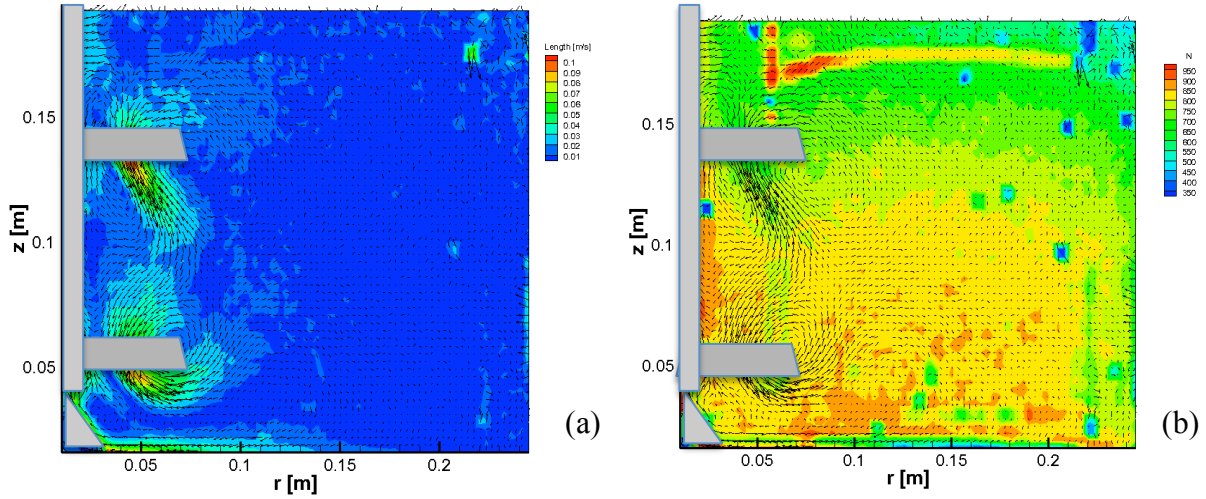


Figura 5.15 Campo vettoriale di velocità sovrapposto al modulo del vettore velocità (a) e numero di vettori che hanno contribuito al calcolo del valore medio (b) a N 150 rpm e Δt 1992 μ s

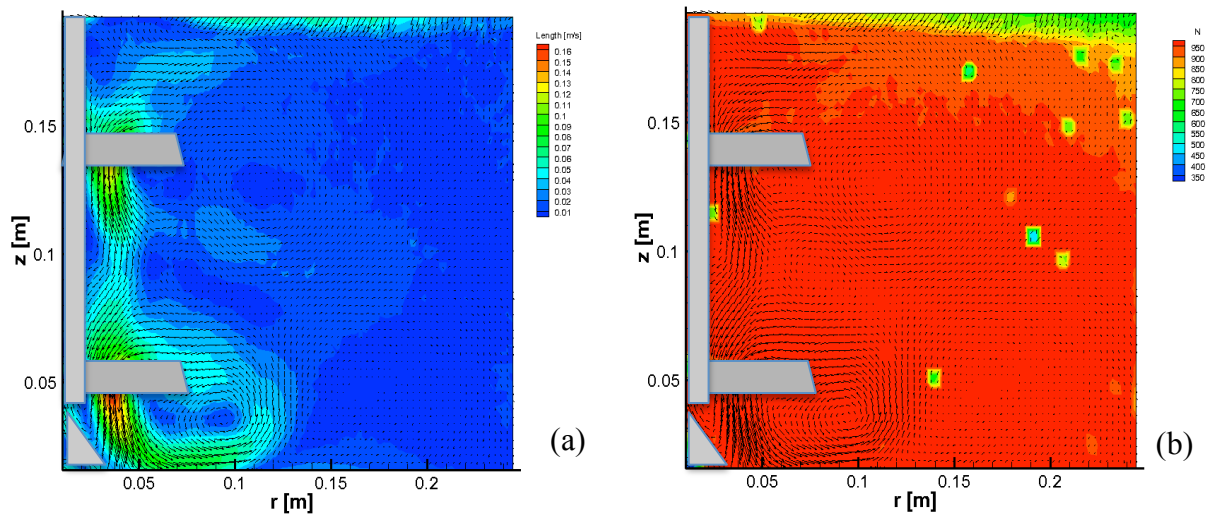


Figura 5.16 Campo vettoriale di velocità sovrapposto al modulo del vettore velocità (a) e numero di vettori che hanno contribuito al calcolo del valore medio (b) a N 230 rpm e Δt 1992 μ s

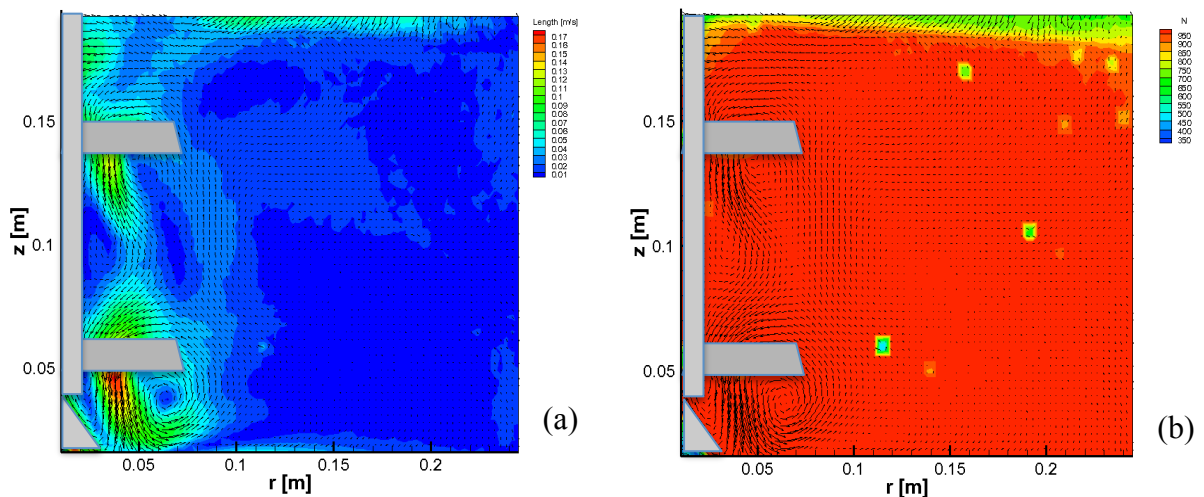


Figura 5.17 Campo vettoriale di velocità sovrapposto al modulo del vettore velocità (a) e numero di vettori che hanno contribuito al calcolo del valore medio (b) a N 311 rpm e Δt 960 μ s

Con un $H_L=19,5$ cm si nota un cambiamento del moto del fluido attorno alle giranti; a velocità basse, gli agitatori non sono in grado di trasferire al fluido una potenza tale da riuscire ad avere un buon mescolamento, il numero di vettori istantanei che contribuisce a determinare i vettori di velocità medi è modesto. A numero di giri ($N=230$ rpm) si nota la formazione di due anelli di ricircolazione vicino all'agitatore inferiore. Come è possibile osservare, il reattore risulta agitato in maniera fortemente disomogenea. Al diminuire della velocità di agitazione, vi sono considerevoli differenze della forma degli anelli di ricircolazione prodotti dalle giranti: più aumenta la dimensione degli anelli più la miscelazione si concentra attorno alle due giranti e diminuisce verso le pareti del reattore fino ad annullarsi. In questo caso dunque non è affatto applicabile la condizione di scalabilità del campo di moto medio con V_{tip} tipicamente identificata per i reattori agitati operanti in regime turbolento.

5.4.4 Misure per la qualità della miscelazione

Per caratterizzare la qualità della miscelazione, sono state effettuate misure PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). Le acquisizioni sono state effettuate ad un altezza di liquido pari a 23,5cm; si è proceduto alle seguenti velocità di agitazione:

- ✓ 100 rpm
- ✓ 200 rpm
- ✓ 300 rpm
- ✓ 400 rpm

Per la prova a 100rpm sono state acquisite 1000 immagini, mentre per le restanti, 500 immagini alla frequenza di campionamento di 10Hz; l'iniezione del tracciante fluorescente è avvenuta dopo alcuni secondi l'inizio dell'acquisizione per avere a disposizione almeno di 10 immagini con cui ottenere il "fondo" medio iniziale.

Come tempo rispetto al quale adimensionalizzare tutti i valori di CoV ottenuti, è stato scelto quello riferito all'immagine immediatamente successiva al termine dell'iniezione di tracciante. A causa della durata considerevole del transitorio iniziale, le misure PLIF sono state ripetute per selezionate condizioni operative per caratterizzare sia la fase transitoria che quella pseudo-stazionaria.

Le immagini riportate in Figura 5.18 mostrano l'evoluzione temporale della dispersione del tracciante fluorescente utilizzato in selezionati istanti di tempo, a partire dall'iniezione e fino alla completa omogeneizzazione del tracciante.

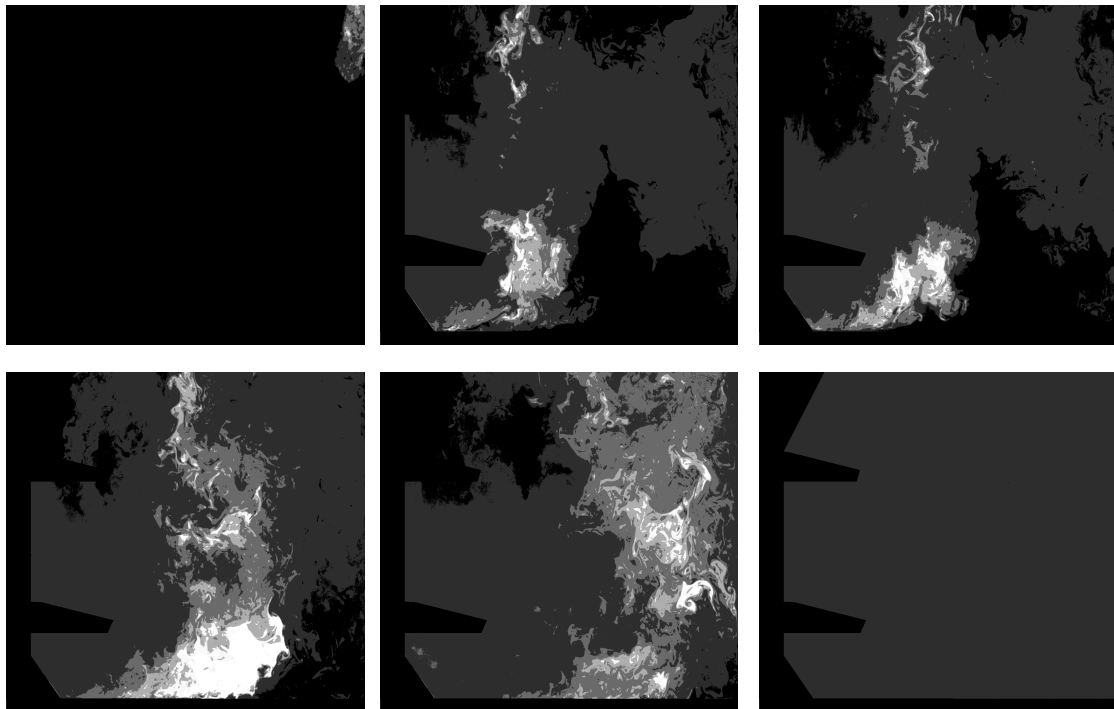


Figura 5.18 Evoluzione temporale della dispersione di una soluzione acquosa di Rodamina 6G, ad istanti di tempo selezionati dall'iniezione fino alla completa omogeneizzazione

Le rappresentazioni dell'andamento del CoV_{adim} è definito come in funzione del tempo per lo stato pseudo-stazionario vengono mostrate in Figura 5.19.

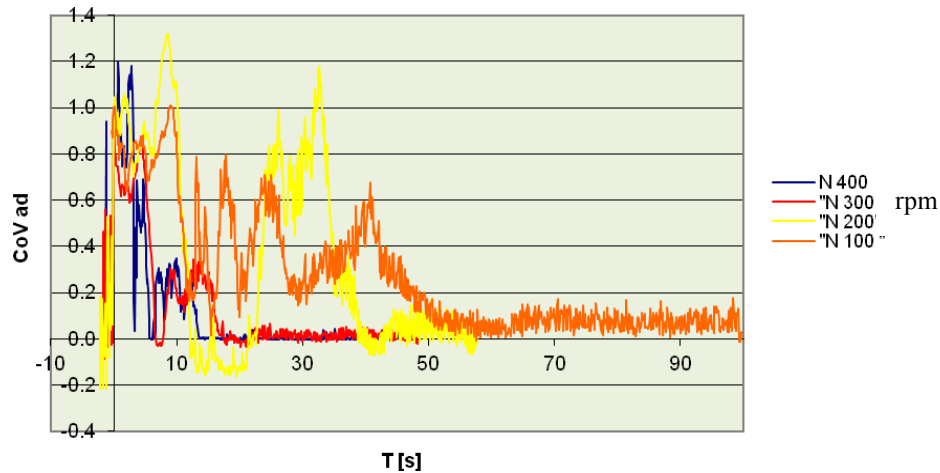


Figura 5.19 CoV_{adim} in funzione del tempo alle diverse velocità di agitazione

Si può notare qualitativamente la diminuzione del tempo di miscelazione all'aumentare della velocità di agitazione; inoltre, per tutte le velocità analizzate, dopo una rapida discesa del CoV_{adim} è presente un picco dei valori seguito da un'ulteriore rapida discesa verso i valori finali. L'aumento del CoV_{adim} è prevalente a velocità di agitazione basse, e poco accentuato a velocità elevate; questo può essere spiegato dal fatto che dopo l'iniezione il tracciante tende a concentrarsi nella zona degli agitatori, dove c'è una buona miscelazione, poi la "nuvola" tende a scomparire e riapparire nella zona esterna verso le pareti del reattore, per poi disperdersi fino a completa miscelazione.

I tempi ottenuti in funzione del numero di giri vengono riportati in Tabella 5.5.

Tabella 5.5 Tempi di miscelazione ottenuti per numero di giri

N (rpms)	T _{mix} (s)
100	50
200	40
300	20
400	15

6 CONCLUSIONI

Lo sviluppo delle tecniche PIV e PLIF ha fornito uno strumento 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 tali tecniche sono state utilizzate per caratterizzare due configurazioni di reattore: uno di geometria standard, con e senza frangivortice, e uno di geometria non standard, ottenuto dallo "scale down" di un bioreattore industriale.

Il campo di moto medio del fluido è stato misurato in piani selezionati all'interno del volume del reattore al variare della velocità di agitazione. I risultati sperimentali hanno consentito sia di identificare l'effetto di alcuni parametri di misura sull'accuratezza dei risultati sia di identificare le caratteristiche del moto in tutte le configurazioni indagate. E' stata infine determinata la dinamica di omogeneizzazione nel reattore di geometria non standard, determinando l'evoluzione della 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 dei reattori agitati meccanicamente oggetto di studio.

Il reattore di geometria standard agitato con una girante a pale inclinate (4b-45° PBT "down-pumping") dà luogo ad un campo di moto significativamente differente in presenza e in assenza di setti frangivortice.

Il reattore di geometria non standard agitato con due giranti "Lighting A310" presenta considerevoli instabilità di moto: le caratteristiche di pompaggio esercitate dalle giranti sul fluido variano al variare della velocità di agitazione e il fluido viene miscelato in modo fortemente disomogeneo, essendo presenti lontano dalle giranti zone di ristagno.

7 BIBLIOGRAFIA

- (1) Ward A.J. , Hobbs P.J. , Holliman P.J. , Jones D.L. , “*Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*”, *Bioresource Technology*, **99**, 7928-7940, (2008).
- (2) Burton C.H., Turner, C., “*Manure Management Treatment Strategies for Sustainable Agriculture*”, second ed. Silsoe Research Institute (2003).
- (3) Gomez, X., Cuetos, M.J., Cara, J., Moran A., Garcia A.I., “*Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes – condition of mixing and evaluation of the organic loading rate*” *Renewable Energy* **31**, 2017-2024.
- (4) Doran P.M., “*Bioprocess Engineering Principles*”, Elsevier Science, Academic Press (1995).
- (5) Paul E.L., Atiemo-Oberg V.A., Kresta S.M., “*Handbook of industrial mixing. Science and practice*”. Wiley-Interscience, Wiley editore (2004).
- (6) Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., “*Fenomeni di trasporto*”, Casa Editrice Ambrosiana – Milano (1979).
- (7) Raffel M., Willer C.E., Kompenhans J. “*Particle image velocimetry – A practical guide*”, Spinger editore (1998).
- (8) Grant. I., “*Particle Image Velocimetry- a review*”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, , **211**, **1**, 55 (1997).
- (9) Hu Y., Liu Z., Yang J., Jin Y., Cheng Y., “*Study on the reactive mixing processes in an unbaffled stirred tank using planar laser-induced fluorescence (PLIF) technique*”, *Chemical Engineering Science*, **65** 4511–4518, (2010).
- (10) Fall, A., Lecoq, O., David, R., “*Characterization of mixing in a stirred tank by planar laser induced fluorescence (P.L.I.F.).*” *Chemical Engineering Research and Design* **79**, 876–882, (2001).
- (11) Dantec Dynamics, *DynamicStudio v3.20 User’s Guide*, 2011.
- (12) Ugolini G., “*Caratterizzazione fluidodinamica di un bioreattore modello*”, tesi di laurea specialistica in Ingegneria chimica e di processo, 2010-2011, Università degli studi di Bologna.

- (13) Montante G., Bakker A., Paglianti A., Magelli F., “*Effect of the shaft eccentricity on the hydrodynamics of unbaffled stirred tanks*”, Chemical Engineering Science, **61**, 2807-2814, 2006.
- (14) I. Grant, “*Investigation of the Flow Field in a Rectangular Vessel Equipped With a Side-Entering Agitator*”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, **211, 1**, pg.55 (1997).
- (15) Bugay S., Escudié R., Liné A., “*Experimental Analysis of Hydrodynamics in Axially Agitated Tank*”, AIChE J. **48** (3), 463-475, (2002).