



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Relazione tecnica sulle prove a freddo delle sonde per la misurazione del grado di vuoto e sulla verifica sperimentale della catena di misurazione, costituita da una turbina, un drag disk e della sonda sviluppata

M. De Salve, G. Monni, B. Panella



RELAZIONE TECNICA SULLE PROVE A FREDDO DELLE SONDE PER LA MISURAZIONE DEL GRADO DI VUOTO E SULLA VERIFICA SPERIMENTALE DELLA CATENA DI MISURAZIONE, COSTITUITA DA UNA TURBINA, UN DRAG DISK E DELLA SONDA SVILUPPATA

M. De Salve, G. Monni, B. Panella – CIRTEN POLITO

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Energetica



**Relazione tecnica sulle prove a freddo delle sonde per la misurazione
del grado di vuoto e sulla verifica sperimentale della catena di
misurazione, costituita da una turbina, un drag disk e della sonda
sviluppata
*Parte prima***

***Caratterizzazione di una Sonda capacitiva in deflusso verticale
ascendente aria-acqua***

Autori

M. De Salve

G. Monni

B. Panella

CERSE-POLITO RL 1260-I/2011

TORINO, LUGLIO 2011

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2- A3 dell'AdP ENEA MSE del 02/08/10,

Tema 1.3 – “Nuovo Nucleare da Fissione”

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	3
INDICE DELLE TABELLE.....	3
1 INTRODUZIONE	4
2 SONDA CAPACITIVA.....	5
3 CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE	8
4 SEZIONE DI PROVA VERTICALE	9
5 SISTEMA ACQUISIZIONE DATI	11
6 MATRICE SPERIMENTALE	11
6.1 Prove statiche di livello.....	11
6.2 Prove in deflusso bifase anulare	12
7 RISULTATI SPERIMENTALI	13
7.1 PROVE DI LIVELLO	14
7.2 PROVE IN DEFLUSSO BIFASE ANULARE	20
7.3 ANALISI STANDARD DEVIATIONS DEI SEGNALI ELETTRICI.....	26
8 CONCLUSIONI.....	28
BIBLIOGRAFIA.....	29
ALLEGATO I	30
ALLEGATO II.....	32

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Schema Sonda capacitiva SIET	6
Fig. 2: Sonda SIET. Disegno progettuale (a) e foto (b)	7
Fig. 3: Schema elettrico Sonda capacitiva	7
Fig. 4: Portata di aria fornita dal ventilatore in funzione della caduta di pressione nell'orifizio	9
Fig. 5: Sezione di prova verticale. Schema (a) e foto (b).....	10
Fig. 6: Grado di vuoto volumetrico in funzione delle portate della miscela bifase aria-acqua.....	12
Fig. 7: Segnali elettrici Capacimetro SIET. Prove di livello.....	15
Fig. 8: Permutazioni ij-ji. Prove di livello	18
Fig. 9: Variazione angolare del segnale della sonda tomografica in presenza di aria e acqua. Prove di livello	20
Fig. 10: Variazione angolare del segnale in funzione delle portate bifase della miscela. Prove deflusso anulare.....	24
Fig. 11: Variazione del segnale elettrico in funzione del grado di vuoto volumetrico.....	25
Fig. 12: Variazione del segnale elettrico in funzione del grado di vuoto volumetrico.....	26
Fig. 13: <i>Standard deviation</i> dei segnali elettrici relativi alle varie combinazioni di elettrodi	27

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1: Matrice Sperimentale Prove di livello	12
Tab. 2: Matrice Sperimentale Prove in deflusso bifase anulare.....	13
Tab. 3: Variazione del segnale per le permutazioni ij-ji. Prove deflusso anulare, acqua di rete.....	21
Tab. 4: Variazione del segnale per le permutazioni ij-ji. Prove deflusso anulare, acqua demineralizzata.....	22

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi", con riferimento ai reattori di piccola e media taglia, il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, in collaborazione con la SIET S.p.A., ha svolto una attività di ricerca sperimentale sulla caratterizzazione di una sonda ad impedenza finalizzata alla misura della frazione di vuoto e allo studio dei flow patterns in un deflusso bifase aria-acqua. La sonda fa parte della strumentazione "speciale" necessaria per la caratterizzazione della termoidraulica dei reattori nucleari a fissione, in condizioni stazionarie e o incidentali.

Lo studio è motivato anche dall'osservazione che nello sviluppo di una "spool piece" per la misura della portata in un deflusso bifase è necessaria la presenza di uno o più sensori in grado di fornire delle indicazioni sulla frazione di vuoto e sul flow pattern.

Nell'ambito dell'attività di Ricerca il Politecnico di Torino ha testato la Sonda Capacitiva, progettata e prodotta dalla SIET di Piacenza, al fine di misurare il grado di vuoto nel circuito SPES-3 [1].

L'impianto SPES3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza) è un simulatore integrato di reattori di piccola e media taglia (SMR), capace di verificare la risposta del reattore a fronte di transitori incidentali e fornire dati sperimentali per la validazione di codici di calcolo per le analisi di sicurezza [2, 3].

Il circuito SPES-3, opera a elevate pressioni e temperature, e con elevate velocità dei fluidi. A causa delle condizioni di funzionamento, nella simulazione della rottura di una tubazione, si instaura un deflusso bifase nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Pertanto, i punti di misura dei circuiti idraulici a monte ed a valle della valvola di rottura sono interessati dalla presenza di fluido bifase.

Le misure in presenza di deflusso bifase sono necessarie per ricostruire la distribuzione di massa ed energia tra i diversi componenti.

Un elemento la cui conoscenza è necessaria per definire la portata di un flusso bifase è il grado di vuoto volumetrico che rappresenta la frazione occupata dalla fase aeriforme in un determinato volume di controllo:

$$\alpha = \frac{V_g}{V_g + V_l}$$

Le principali tecniche di misura di questa grandezza prevedono l'utilizzo di: sonde ottiche (basate sulla variazione dell'indice di rifrazione), sonde elettriche (basate sulla variazione della resistenza e/o capacità elettrica), sonde termiche (basate sulle diverse caratteristiche di scambio termico).

I diversi metodi proposti si basano sull'utilizzo di un sensore in grado di rilevare la presenza dell'una o dell'altra fase apprezzando la variazione di una particolare proprietà fisica nell'interazione con la miscela.

Il funzionamento delle sonde a impedenza capacitiva si basa sul principio che applicando una differenza di potenziale a qualsiasi coppia di conduttori (armature o piastre) separati da un isolante (dielettrico), le cariche elettriche si separano e si genera un campo elettrico all'interno di questo.

Dalla misura dell'impedenza elettrica del volume fluido compreso tra gli elettrodi si può ottenere il valore istantaneo volumetrico di frazione di vuoto.

Il più importante requisito per l'utilizzo di una sonda a impedenza elettrica è che le due fasi presentino proprietà elettriche sensibilmente diverse l'una dall'altra; in questo modo a una variazione della distribuzione delle fasi e del grado di vuoto corrisponde una diversa distribuzione di permittività elettrica e di conseguenza una diversa differenza di potenziale tra gli elettrodi.

Questi sensori presentano numerosi vantaggi in quanto sopportano elevate pressioni e temperature, hanno buona stabilità all'aggressione meccanica e chimica e buona precisione se il fluido e la sostanza hanno una composizione costante. Sono adatti per liquidi conduttivi e non.

Numerose configurazioni geometriche delle sonde sono state studiate da vari autori [4].

2 SONDA CAPACITIVA

La SIET di Piacenza ha sviluppato una sonda capacitiva composta da una serie di elettrodi (9) disposti lungo le generatrici di un tubo cilindrico e da un elettrodo centrale [1].

Numerosi lavori che utilizzano geometrie di sonda simili a quella qui testata, sia numerici che sperimentali, sono stati svolti da vari autori. George et al. [5] ha sviluppato a partire dal 1995 una sonda a impedenza avente la stessa geometria della sonda SIET, ma priva di elettrodo centrale, e ha proposto algoritmi di calcolo per la ricostruzione dei profili del grado di vuoto all'interno di un condotto in plexiglas avente un diametro interno di 20 cm. La maggior parte dei lavori concernenti le sonde tomografiche riguardano lo sviluppo di un'elettronica adeguata e ottimizzata rispetto alla grandezza da misurare e alla geometria della sonda e lo sviluppo di algoritmi per la ricostruzione del grado di vuoto e del flow pattern all'interno del condotto; si citano al riguardo i lavori di Huang et al. [6], di Wu et al. [7] e di Warsito e Fan [8].

Nella sonda sviluppata dalla SIET gli elettrodi attivi sono disposti su metà circonferenza della tubazione; infatti, essendo destinato all'utilizzo su circuiti di taratura, opererà sempre su flussi assiali simmetrici tipici dei condotti verticali o su flussi simmetrici rispetto al piano di mezzeria per tubi inclinati od orizzontali.

La distanza angolare tra gli elettrodi esterni adiacenti è di $22,5^\circ$ (Fig.1) che corrisponde a una corda esterna e interna al condotto rispettivamente di 17.56 mm e 15.6 mm, essendo il diametro interno del condotto pari a 80 mm e il diametro esterno pari a 90 mm.

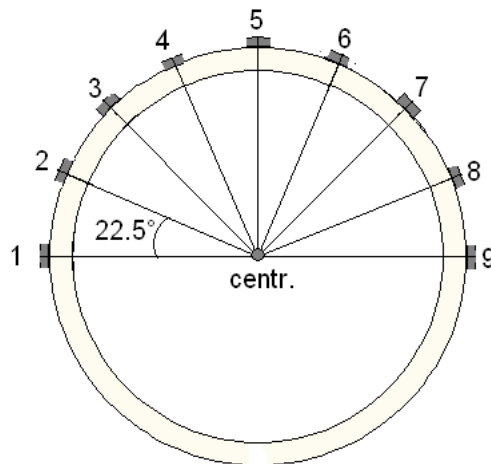


Fig. 1: Schema Sonda capacitiva SIET

Il diametro interno scelto per la cella è 80 mm, poiché la maggior parte delle linee di SPES3 su cui potranno essere installati questi strumenti è compresa tra $2\frac{1}{2}$ e 3 '' con un diametro interno da circa 65 a circa 80 mm.

La lunghezza del tubo in materiale isolante è pari a 60 cm per poter supportare gli elettrodi lunghi 40 cm mantenendo tra le estremità di questi e di tronchetti metallici uno spazio sufficiente per ridurre il transito parassita di correnti nel metallo dei tronchetti di collegamento.

Gli elettrodi periferici, costituiti da strisce di acciaio di 5 mm di larghezza, sono incollati sulla parete esterna e saldati alle estremità con i conduttori che consentono il collegamento con l'elettronica di misura.

Ogni elettrodo esterno è collegato elettricamente a entrambe le estremità, mentre quello centrale è connesso tramite dei supporti e collegato solo a un'estremità. I fili di collegamento sono saldati rispettivamente su due basette lineari dove si trovano i reed relè; 10 sulla basetta che contiene anche il collegamento del centrale e 9 (relativi agli elettrodi esterni) in quella opposta. Per ogni basetta è installato un trasformatore di isolamento in ferrite che, connesso ai reed relè, consente di annullare i disturbi a radio frequenza e di isolare l'elettronica dagli eventuali disturbi di nodo comune (loop di terra).

La sonda è gestita tramite la Scheda NI USB-6259, che invia il segnale di chiusura dei relè (5V in corrente continua) e il segnale di eccitazione agli elettrodi (sinusoide con $f_{ec} = 25\text{kHz}$ e ampiezza $5V_{pp}$) e riceve il segnale in uscita.

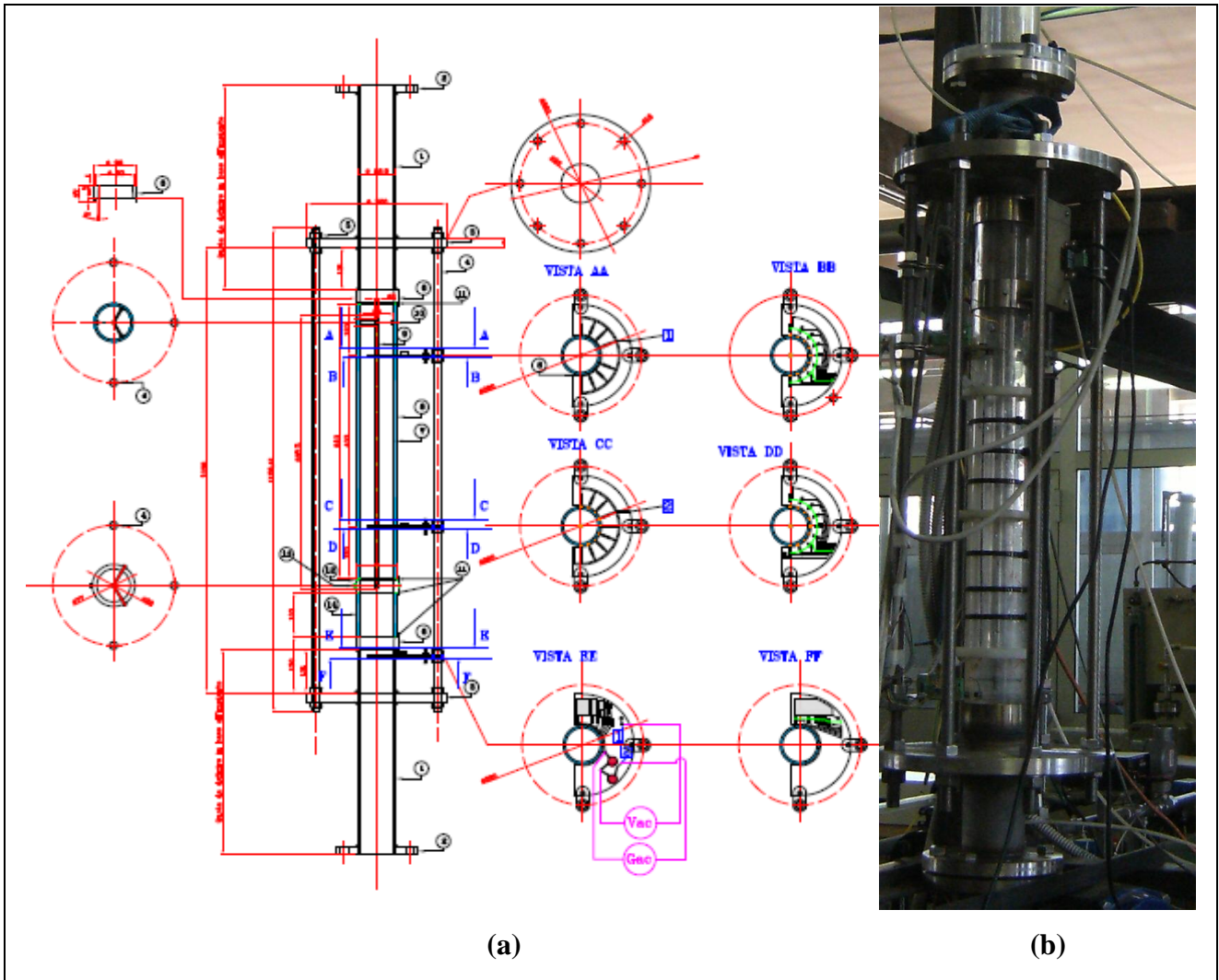


Fig. 2: Sonda SIET. Disegno progettuale (a) e foto (b)

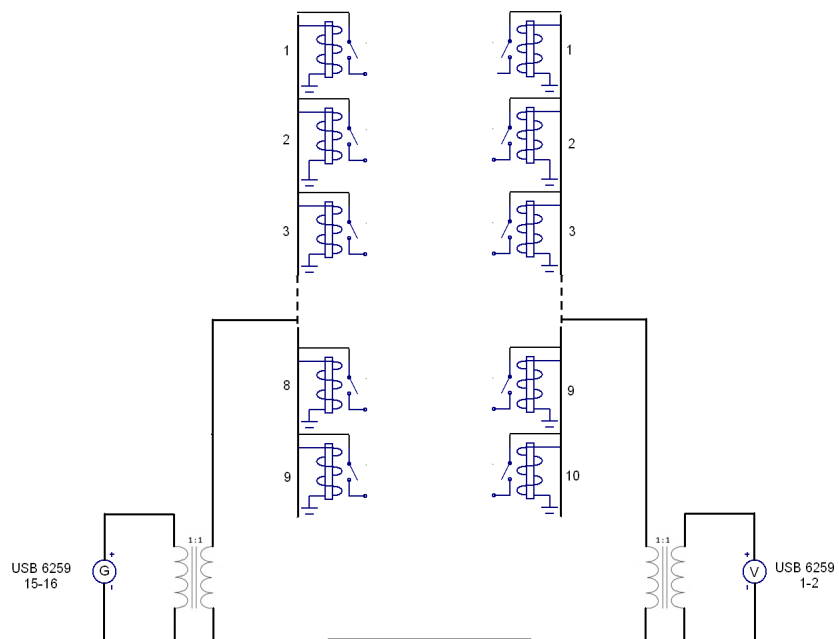


Fig. 3: Schema elettrico Sonda capacitiva

Il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino ha testato la sonda sopra descritta nel laboratorio di Termoidraulica.

3 CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE

L'impianto sperimentale su cui è montata la sezione di prova è composto dal circuito di alimentazione dell'acqua, dal circuito di alimentazione dell'aria, e dalla strumentazione necessaria per le misure di portata dei fluidi monofase, delle pressioni e delle temperature.

L'alimentazione dell'aria è assicurata dalla rete di servizio dell'aria compressa (pressione di circa 6 bar) e da un riduttore di pressione oppure per mezzo di un ventilatore che fornisce alte portate di fluido a bassa pressione, regolato tramite un inverter.

L'alimentazione dell'acqua è assicurata dal circuito costituito da una vasca, da due pompe esercite a numero di giri variabile, grazie all'impiego di un inverter, e da un collettore che distribuisce l'acqua ai circuiti di prova. La portata d'acqua può essere ottenuta sia utilizzando le pompe sia utilizzando il battente costante della vasca.

La portata di liquido viene misurata mediante un misuratore elettromagnetico (ASA AW6 – 2900/1/B/1/AA), la cui scala è compresa tra 0,9 e 36 m³/h, con un'incertezza di $\pm 0,5$ v.l, e da un banco di rotametri aventi i seguenti range di misura:

- 0-100 l/h;
- 100-400 l/h

La portata d'aria è misurata, all'ingresso del circuito di prova, con un banco di rotametri aventi range di funzionamento differenti:

- 50-300 l/h;
- 500-5000 l/h
- con il rotometro (ASA E5 3000) la cui scala, riferita al fluido in condizioni standard ($p = 1.013$ bar e $T = 20^\circ\text{C}$) è compresa tra 6300 e 63000 Nl/h.

Il rotometro è caratterizzato da un'incertezza di misura pari al 2% del valore di fondo scala.

Poiché i rotometri sono eserciti alla pressione p , regolata con un riduttore di pressione, e alla temperatura T , pari alla temperatura ambiente, le portate volumetriche devono essere valutate considerando le effettive condizioni in cui si trova l'aria.

Vengono misurate le condizioni dell'aria all'interno dello strumento: la pressione attraverso un manometro e la temperatura con una termocoppia.

La portata volumetrica letta nel rotometro, viene espressa in Nl/h tenendo conto delle effettive condizioni attraverso la seguente formula:

$$Q(p_0 = 1.013\text{bar}, T_0 = 20^\circ\text{C}) = Q(p, T) \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T}} \cdot \sqrt{\frac{p}{p_0}}$$

La portata massica si ottiene quindi moltiplicando per la densità (calcolata in condizioni normali). Quando si utilizza il ventilatore per ottenere elevate portate di aria, la portata monofase è misurata tramite un orifizio calibrato la cui curva di taratura è riportata in figura:

$$\dot{m} = \epsilon \cdot \alpha \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot \Delta p_d}$$

dove

- ϵ Fattore di comprimibilità dell'aria (con le piccole variazioni di pressione in gioco assume valore pari a 1, viceversa sarebbe minore di 1)
- α Coefficiente che dipende dal rapporto di strozzamento $m=(d/D)^2$ del diaframma pari a 0.74
- d diametro dell'orifizio del diaframma pari a 70 mm
- ρ_1 densità dell'aria in kg/m^3
- Δp_d pressione relativa tra monte e valle del diaframma in Pa

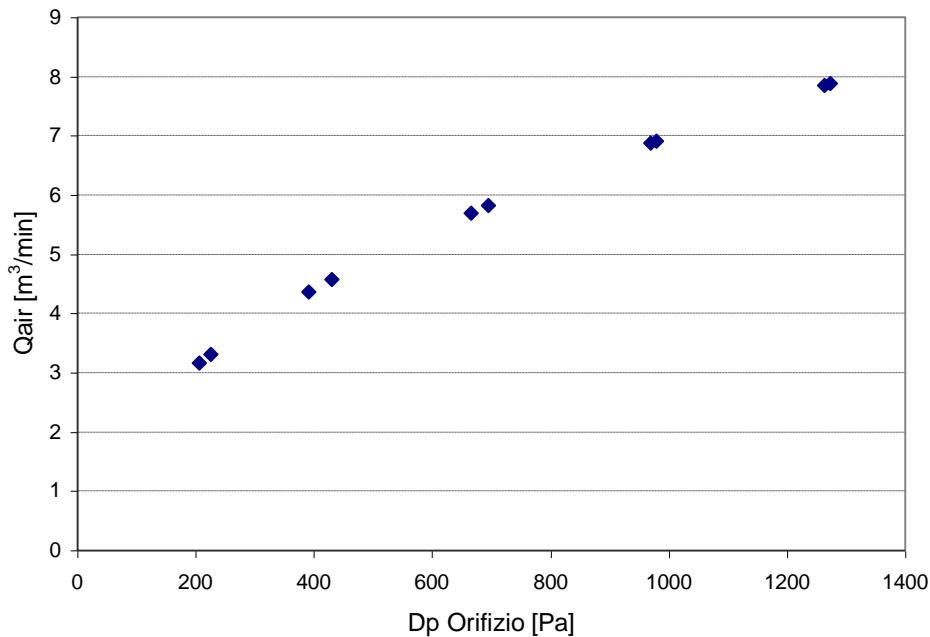


Fig. 4: Portata di aria fornita dal ventilatore in funzione della caduta di pressione nell'orifizio

4 SEZIONE DI PROVA VERTICALE

La sezione di prova verticale, avente lunghezza totale di circa 4000 mm, è composta da un tratto in plexiglass ($L = 400$ mm e $D_i = 80$ mm), in cui viene preparata la miscela bifase, in cui l'aria entra assialmente nel condotto, mentre l'acqua è iniettata in direzione radiale mediante un condotto di 6 mm di diametro e una retina installata all'interno del condotto principale. A valle del miscelatore è

installata la test section che contiene la sonda ($L = 1210 \text{ mm}$ e $D_i = 80 \text{ mm}$), e un ulteriore tratto di lunghezza pari a 1290 mm che consente di visualizzare il deflusso.

La test section ha una lunghezza totale di 2500 mm ed è compresa tra due valvole di intercettazione, a chiusura rapida, che consentono la misura del grado di vuoto volumetrico.

A valle della valvola superiore, è installato un ulteriore tratto di 400 mm e una vasca che consente di separare le due fasi.

Il circuito è dotato di prese di pressione che consentono di misurare la pressione assoluta e la pressione differenziale tra le due valvole di intercettazione.

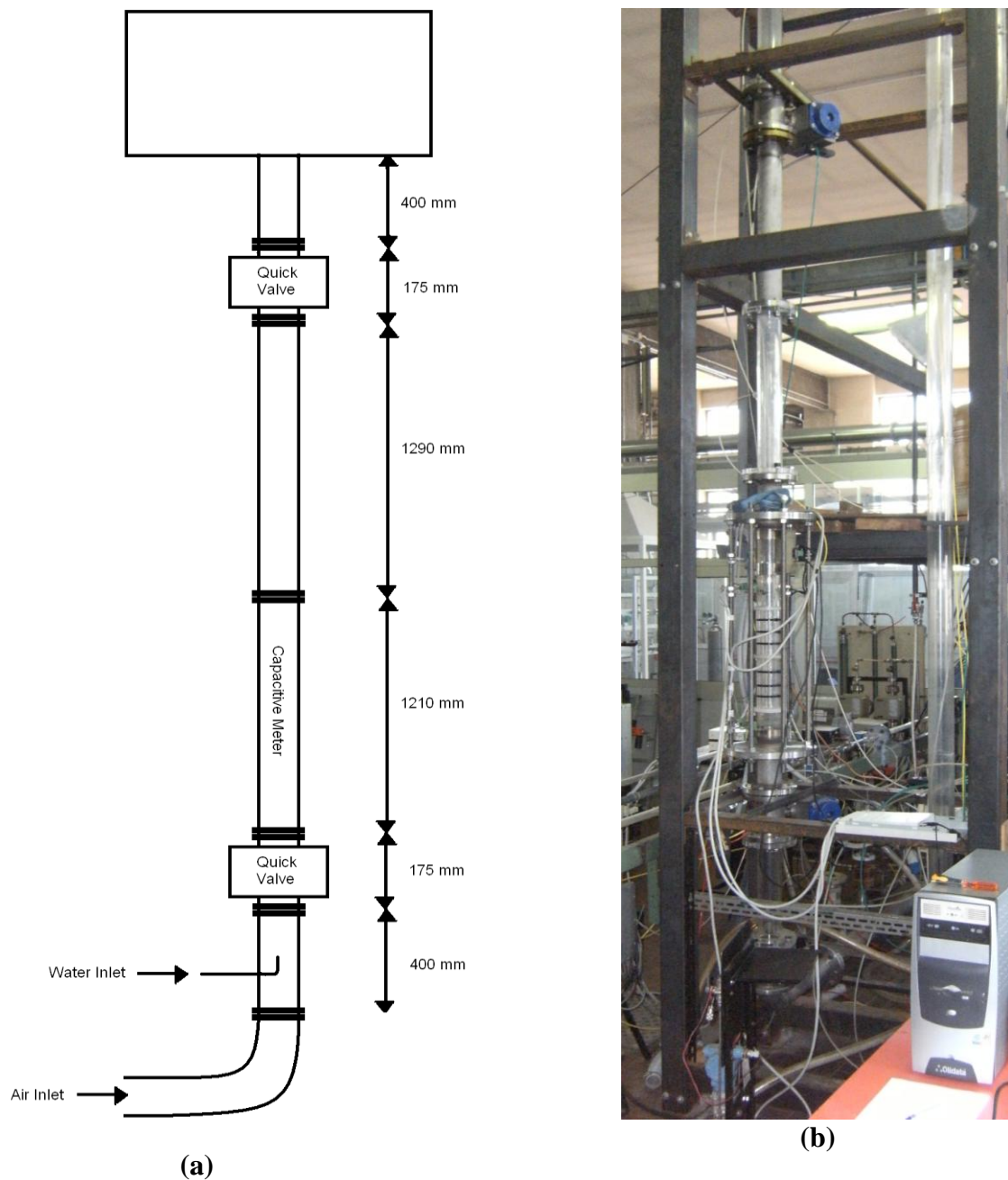


Fig. 5: Sezione di prova verticale. Schema (a) e foto (b)

5 SISTEMA ACQUISIZIONE DATI

I segnali inviati e ricevuti dalla scheda di acquisizione sono gestiti in ambiente LabView®.

Tramite il programma viene definita la sequenza delle varie combinazioni di elettrodi (81), il numero di campioni di lettura per ogni coppia di elettrodi (8000) e la frequenza di campionamento (250 kHz).

Viene registrato in uscita il valore medio relativo agli 8000 samples letti per ogni combinazione.

La sequenza delle combinazioni utilizzata è riportata in *ALLEGATO I*.

Vengono eccitati in sequenza gli elettrodi 1-9 (esterni) e per ogni elettrodo eccitato vengono letti gli output degli elettrodi riceventi esterni. Finita la scansione di lettura dei 9 elettrodi, si passa nuovamente ad eccitare l'elettrodo 1, e quindi l'elettrodo centrale al quale corrispondono 9 valori relativi alle letture degli elettrodi esterni.

In tutto si hanno quindi 89 misure per ogni ciclo, che si riducono a 81 perché la prima scansione del ciclo relativa all'elettrodo 1 deve essere scartata perché influenzata dalle misure precedenti relative all'elettrodo centrale (caratterizzate da valori di output più elevati).

Per ogni prova sono stati effettuati 36 cicli di misura in modo da valutare l'andamento medio del segnale delle varie combinazioni e la relativa variazione standard.

6 MATRICE SPERIMENTALE

Sono state effettuate prove preliminari per analizzare la fattibilità dell'impiego della sonda per la misura del grado di vuoto in una miscela bifase in regime anulare.

La prima parte della campagna prevede una serie di test in condizioni statiche (velocità del deflusso nulla), in cui viene variato il livello di acqua nella sezione di prova; sono stati effettuate prove sia utilizzando acqua di rete, sia utilizzando acqua demineralizzata.

6.1 Prove statiche di livello

Nelle prove statiche il livello di liquido è misurato a partire dall'altezza degli elettrodi. Le prove relative all'acqua di rete si riferiscono a un fluido caratterizzato da una conducibilità pari a 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$; poiché l'impianto SPES3 lavorerà con acqua a bassissima conducibilità, queste prove verranno utilizzate per effettuare un confronto rispetto alle prove con acqua demineralizzata, più rilevanti ai fini della futura applicazione della sonda nell'impianto.

PROVE DI LIVELLO ACQUA DI RETE		
RUN	Livello [cm]	NOTE
1	0	aria
2	0	aria
3	0	elettrodo centrale bagnato
4	10	prova in salita
5	20	prova in salita
6	30	prova in salita
7	40	prova in salita
8	50	prova in salita
9	60	prova in salita
10	150	prova in salita
11	219	prova in salita
12	60	prova in discesa
13	50	prova in discesa
14	20	prova in discesa
15	0	prova in discesa
16	0	misura dopo 1h

PROVE DI LIVELLO ACQUA DEMINERALIZZATA		
RUN	Livello [cm]	NOTE
1	0	aria
2	0	aria
3	0	elettrodo centrale bagnato
4	10	prova in salita
5	20	prova in salita
6	30	prova in salita
7	40	prova in salita
8	50	prova in salita
9	60	prova in salita
10	150	prova in salita
11	60	prova in discesa
12	50	prova in discesa
13	20	prova in discesa
14	0	prova in discesa
15	0	misura dopo 1h

Tab. 1: Matrice Sperimentale Prove di livello

6.2 Prove in deflusso bifase anulare

Una prima serie di prove in deflusso anulare, con acqua di rete e acqua demineralizzata, è stata effettuata al fine di studiare la stabilità e la riproducibilità dei segnali e valutare la risposta dello strumento a piccole variazioni del grado di vuoto. Sono imposte le portate in massa dell'aria e dell'acqua con pressione del circuito pari alla pressione atmosferica. Il grado di vuoto della miscela è misurato pesando la massa di acqua intercettata tra le valvole a chiusura rapida, noto il volume di controllo. Nel range di prove sperimentato la variazione del grado di vuoto in funzione delle portate della miscela è riportato in Fig.6.

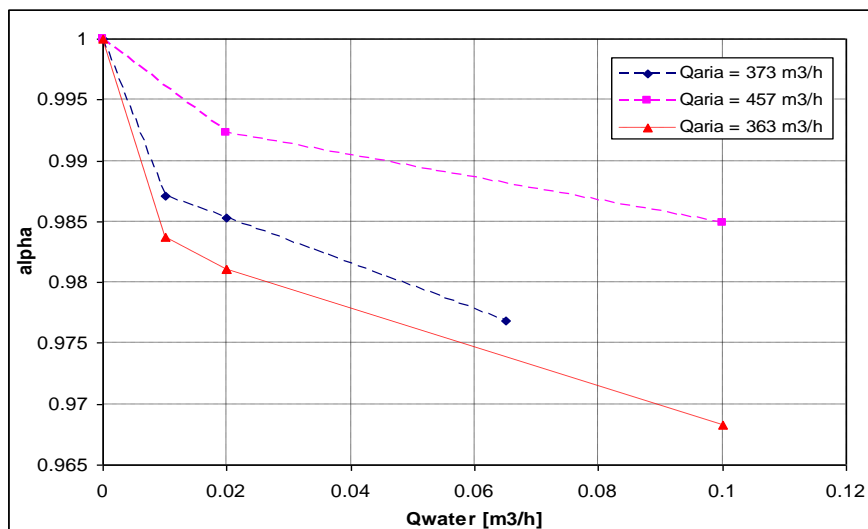


Fig. 6: Grado di vuoto volumetrico in funzione delle portate della miscela bifase aria-acqua

Le prove effettuate sono riportate in Tab.2.

PROVE DEFLUSSO BIFASE ACQUA DI RETE			
RUN	Q _{aria} [m ³ /h]	Q _{acqua} [m ³ /h]	alpha
1	363	0	1
2	363	0.01	0.9838
3	363	0.01	0.9838
4	363	0.02	0.9811
5	363	0.02	0.9811
6	363	0.02	0.9811
7	363	0.02	0.9811
8	363	0.02	0.9811
9	363	0.1	0.9683
10	363	0.1	0.9683

(a)

PROVE DEFLUSSO BIFASE ACQUA DEMINERALIZZATA			
RUN	Q _{aria} [m ³ /h]	Q _{acqua} [m ³ /h]	alpha
1	373	0	1
2	373	0.01	0.9870
3	373	0.02	0.9853
4	373	0.065	0.9768
5	457	0.02	0.9923

(b)

Tab. 2: Matrice Sperimentale Prove in deflusso bifase anulare

7 RISULTATI SPERIMENTALI

Vengono analizzati separatamente i risultati relativi alle prove statiche (variazioni di livello) e alle prove in cui la miscela bifase è caratterizzata da un deflusso anulare.

Lo scopo delle prove di livello è quello di valutare la ripetibilità dei segnali elettrici e la sensibilità della sonda alle variazioni della capacità all'interno del volume di controllo.

Ciò consentirà di evidenziare le caratteristiche dello strumento (sonda e elettronica di controllo) e le eventuali variazioni necessarie per utilizzare la sonda per la misura del grado di vuoto di una miscela bifase.

Le prove effettuate con acqua demineralizzata e con acqua di rete, consentono di evidenziare la variazione della risposta della sonda al variare delle proprietà elettriche a parità di livello (prove statiche) e a parità di grado di vuoto (prove in deflusso anulare).

L'acqua minerale, prelevata dalla rete del Politecnico di Torino, analizzata presso la SIET di Piacenza, ha una conducibilità elettrica pari a 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

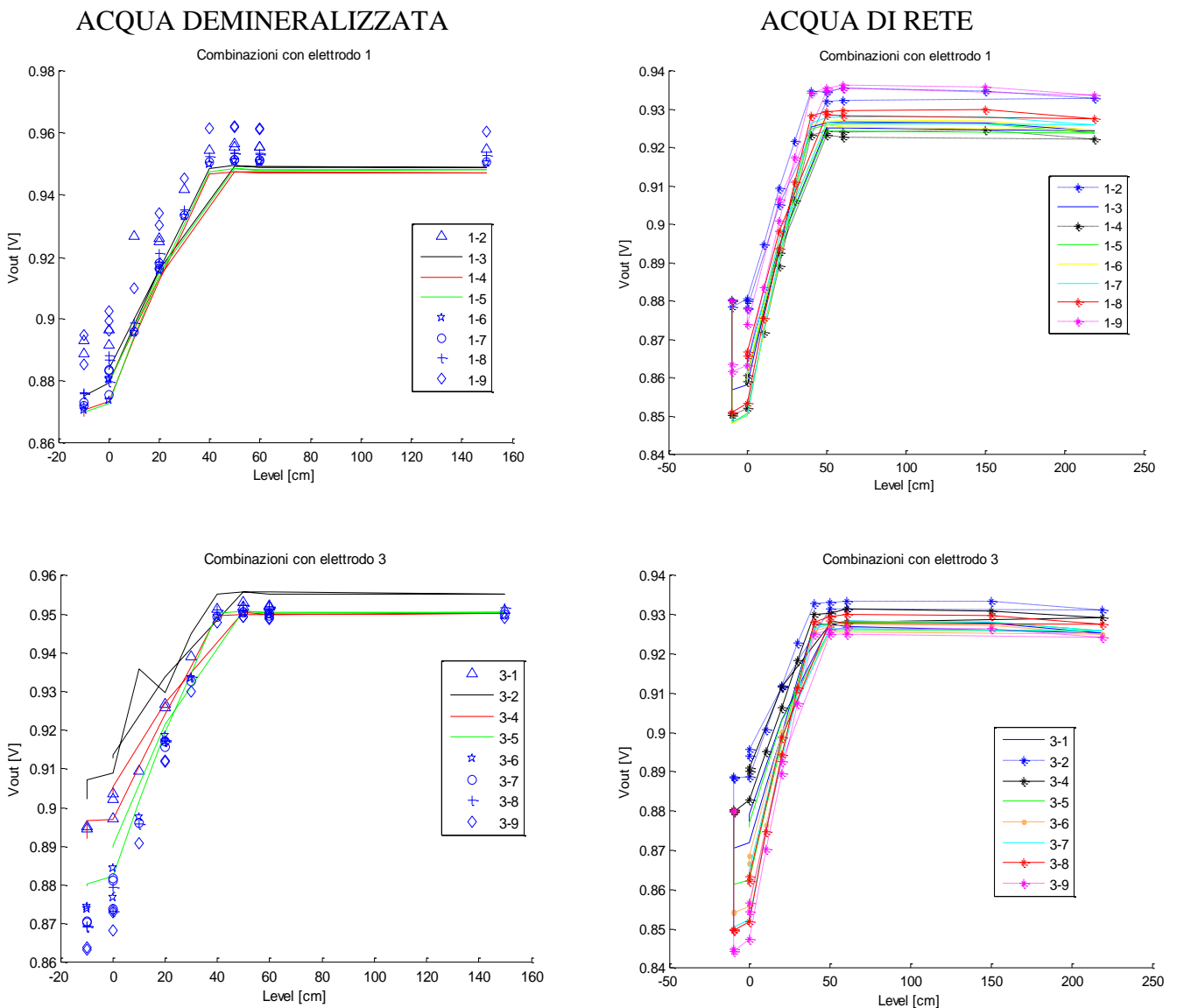
7.1 PROVE DI LIVELLO

- **Sensibilità dello strumento alla variazione di livello**

La variazione del segnale in funzione del livello è riportata nei grafici di Fig.7. Il segnale è descritto in funzione della variazione del livello del liquido all'interno del volume di controllo.

Il livello pari a zero identifica il punto di inizio inferiore degli elettrodi, un livello maggiore di quaranta centimetri indica che tutta l'altezza degli elettrodi è interessata dalla presenza di liquido; un livello minore di zero indica assenza di liquido (misure con aria).

I grafici di Fig.7 riportano le combinazioni relative all'eccitazione dell'elettrodo 1, 3, 5 e dell'elettrodo centrale per la sequenza di acquisizione utilizzata, sia con acqua demineralizzata che con acqua di rete.



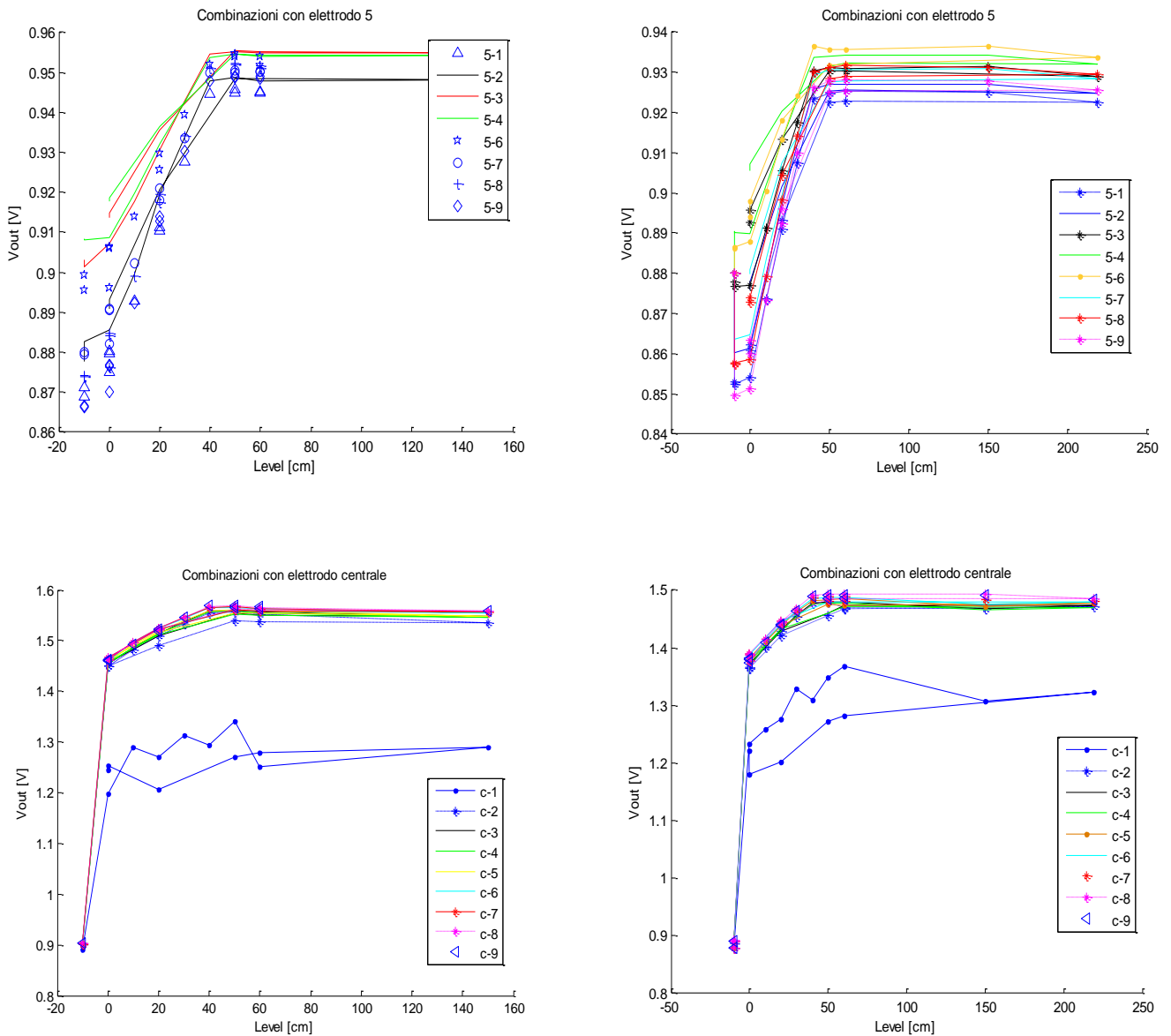


Fig. 7: Segnali elettrici Capacimetro SIET. Prove di livello

Le prove effettuate con acqua demineralizzata hanno evidenziato una variazione del segnale al variare del livello in un intervallo tra 0.86 e 0.96 V per le combinazioni afferenti gli elettrodi periferici (con una sensibilità pari a 0.002 V/cm), e tra 0.88 e 1.6 V per le combinazioni dell'elettrodo centrale.

Il segnale dell'elettrodo centrale, nelle combinazioni con gli elettrodi 2-9, passa da un valore di 0.9 in presenza di tutto aria, a un valore di circa 1.46 quando il liquido si trova al livello zero, in questo caso la sensibilità è quindi pari a 0.027 V/cm.

È evidente un fenomeno di isteresi che si verifica nelle misure effettuate riducendo il livello di liquido rispetto a quelle effettuate aumentandolo; ciò è dovuto alla tensione superficiale dell'acqua che continuando a bagnare le pareti e l'elettrodo centrale per un certo periodo ne altera il segnale di

output. Quando la sonda è interessata da tutto acqua il segnale mantiene un valore costante al variare del livello ($L > 40$ cm), indicando una buona stabilità e un'insensibilità alle variazioni di capacità esterne al volume di controllo della sonda ($H = 40$ cm).

Le variazioni tra i segnali forniti nelle varie combinazioni degli elettrodi periferici, a parità di livello, sono di circa 0.03 V, pari a circa il 3% del valore massimo di output.

La combinazione centrale-1 fornisce in output valori sensibilmente inferiori a quelli delle altre combinazioni che si hanno eccitando l'elettrodo interno; ciò è causato dalla influenza della precedente misura, concernente le combinazioni con eccitazione dell'elettrodo 1 nella sequenza di scansione utilizzata, come descritto in seguito.

Per le prove effettuate con acqua di rete valgono le stesse conclusioni, salvo che in questo caso, i valori del segnale sono leggermente inferiori rispetto alle prove con acqua demineralizzata; ciò è causato dalla conducibilità dell'acqua che crea connessioni a terra e quindi un'attenuazione dell'ampiezza del segnale.

• **Analisi della ripetibilità dei segnali**

Al fine di valutare la *bontà* dei segnali elettrici misurati nelle varie combinazioni, è stata analizzata la variazione del segnale per le permutazioni $i-j$ e $j-i$:

$$\Delta_{ij-ji} = (V_{ij} - V_{ji}) \cdot 100$$

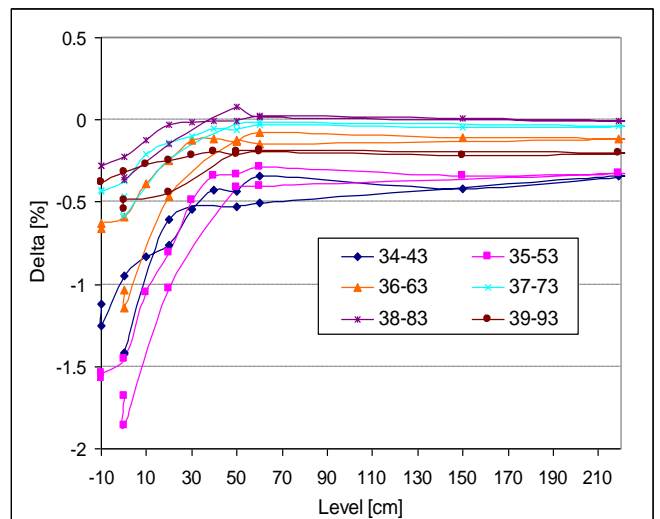
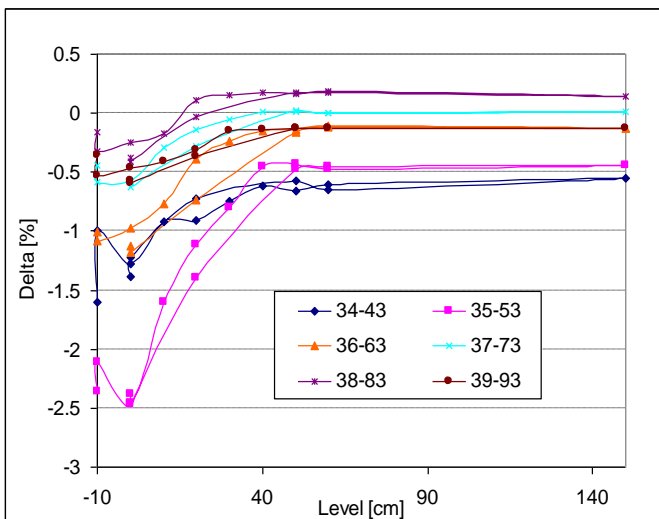
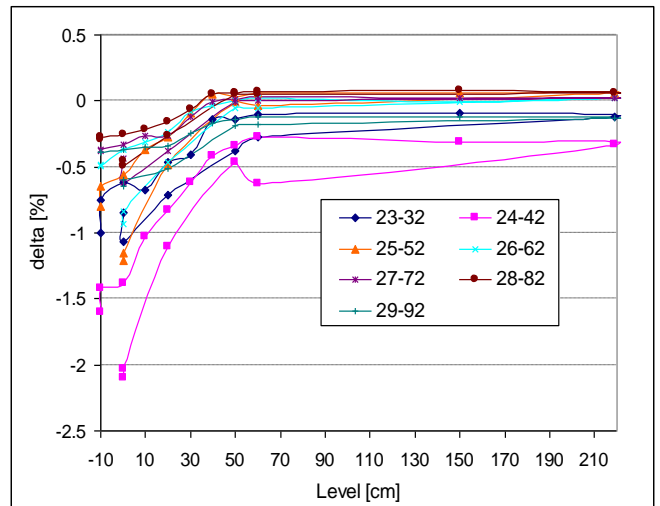
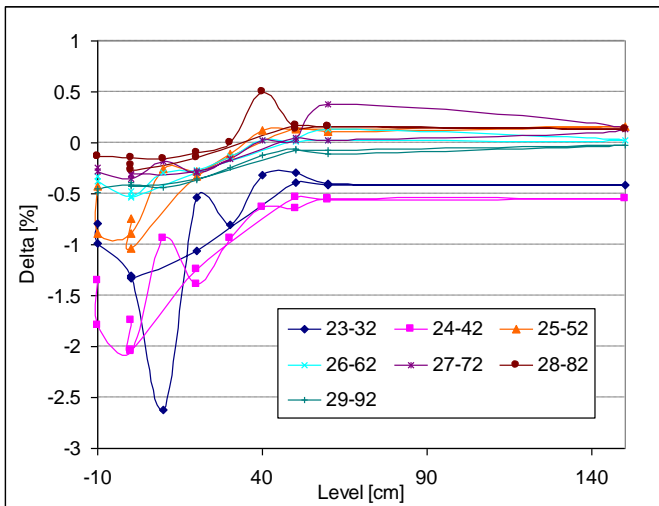
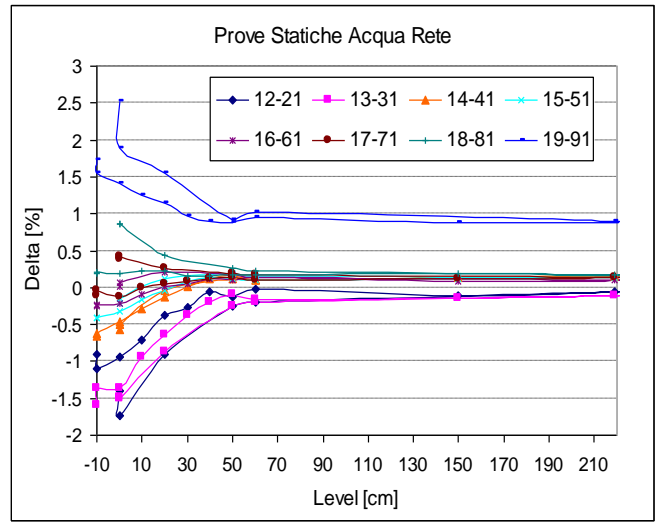
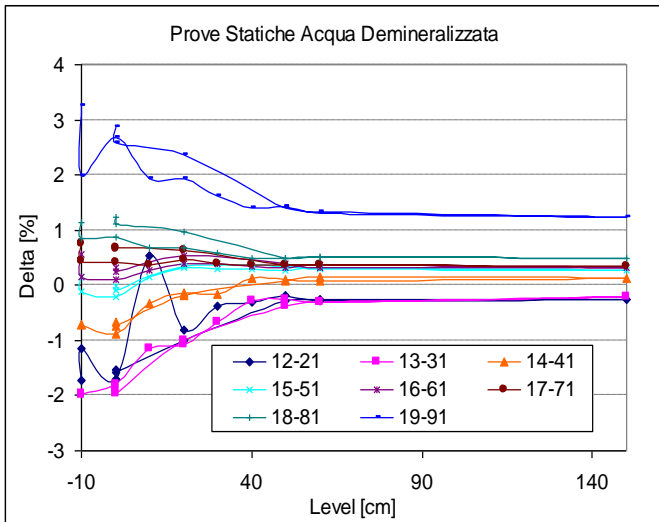
I valori in uscita dovrebbero essere, teoricamente uguali; ma in pratica differiscono tra loro perché le resistenze del circuito di eccitazione e le resistenze del circuito di acquisizione sono diverse tra loro e influenzano quindi i valori di input e output.

Come riportato nei grafici di Fig.8, le permutazioni $ij-ji$ forniscono valori che si discostano tra loro massimo del 2% in presenza di sola aria, e si riducono notevolmente ($<0.5\%$) all'aumentare del livello di liquido.

Gli scarti maggiori si evidenziano per la combinazione 19-91 e per alcune delle combinazioni caratterizzate da un angolo di 45° : 13-31, 24-42, 35-53, 46-64, 57-75.

Ulteriori analisi sono necessarie per definire la causa del fenomeno.

Il fenomeno dell'isteresi è ben evidenziato in questa analisi; nelle prove in cui il livello di liquido è ridotto gli scarti percentuali delle permutazioni sono maggiori, ciò potrebbe essere dovuto all'influenza del sottile film liquido che si sta asciugando (condizioni non stazionarie), oltre che alle differenze nell'elettronica sopra descritte.



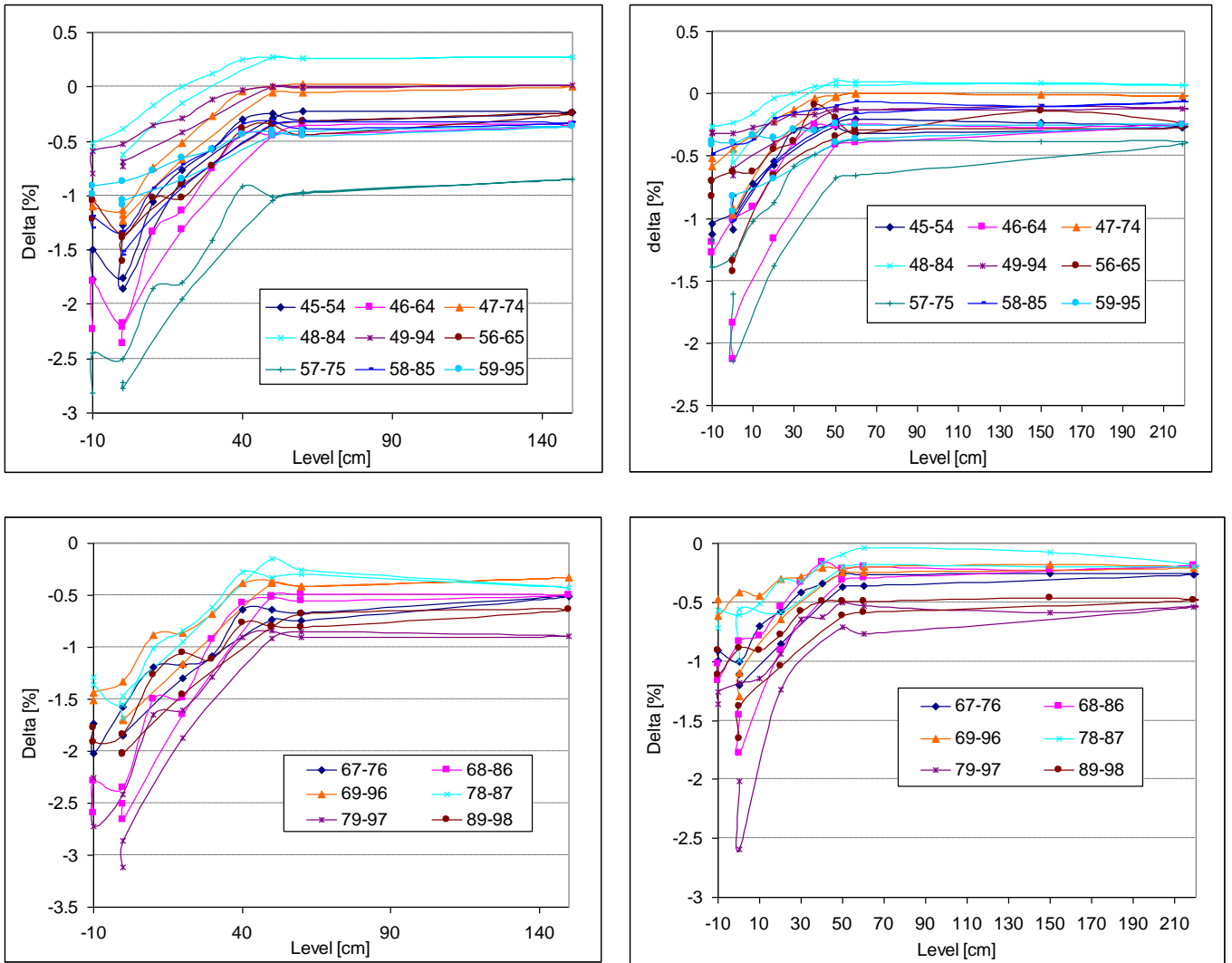


Fig. 8: Permutazioni ij-ji. Prove di livello

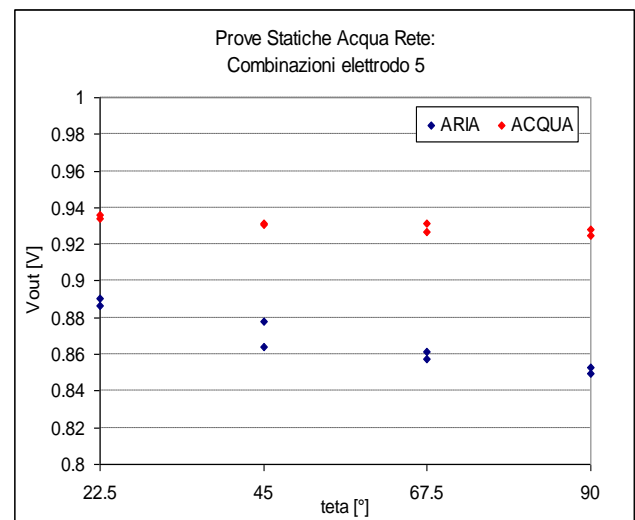
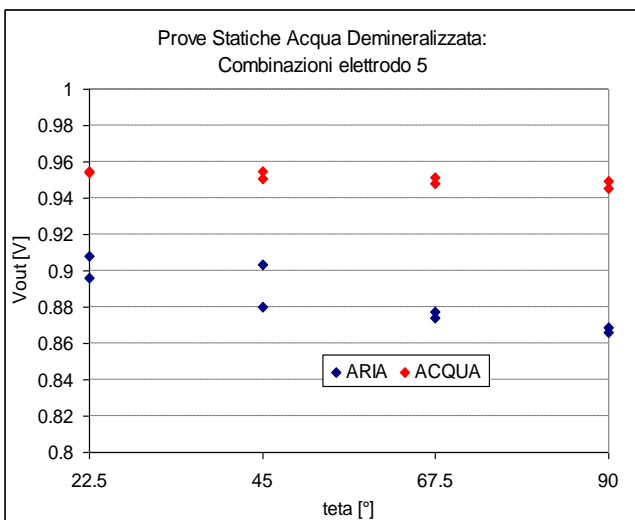
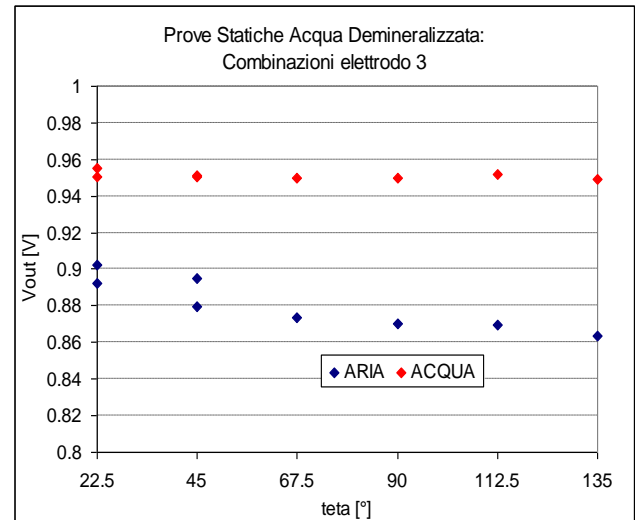
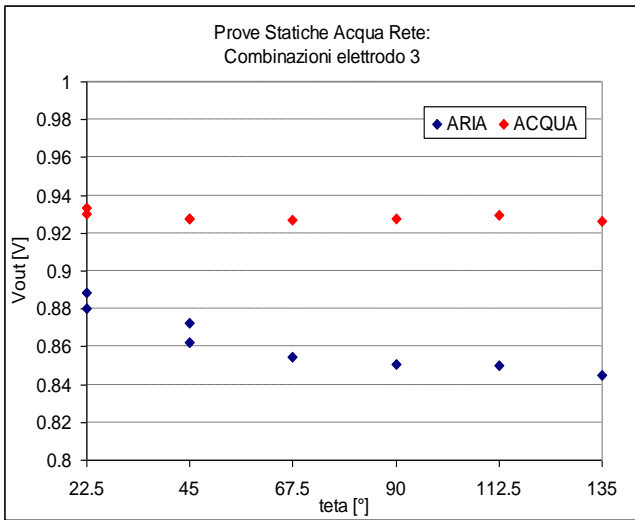
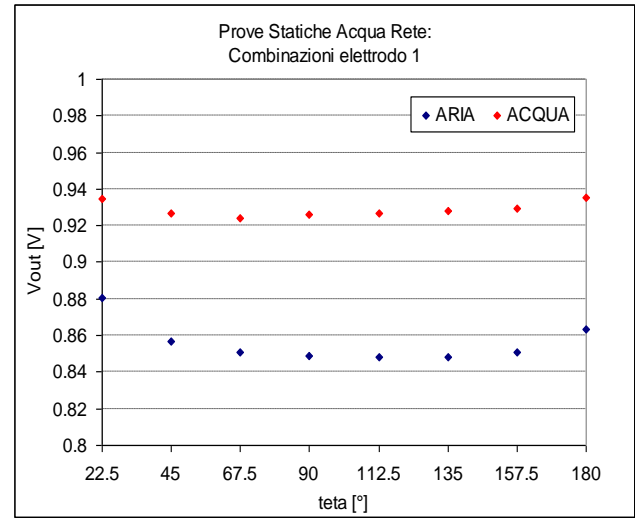
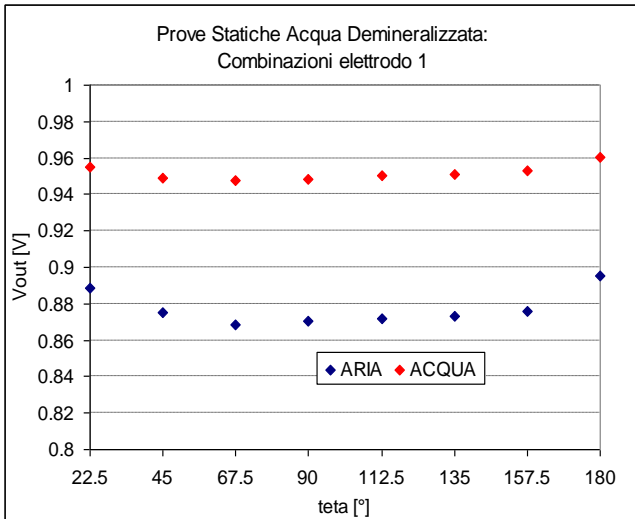
- **Variazione angolare del segnale**

Ai fini della misura del grado di vuoto di una miscela mediante la sonda tomografica capacitiva, è fondamentale conoscere la variazione del segnale al variare dell'angolo visto dagli elettrodi (Fig.9). La conoscenza del valore della derivata del segnale rispetto all'angolo $dV_{ij} / d\theta$, consente di mettere in relazione il segnale con la capacità vista tra gli elettrodi e in linea di principio dovrebbe consentire di ricavare il valore del grado di vuoto della miscela in deflusso bifase e in deflusso anulare il valore dello spessore del film.

Nei grafici di Fig.9 sono riportate le variazioni angolari del segnale relative alle combinazioni dell'elettrodo 1, dell'elettrodo 3, e dell'elettrodo 5 in presenza di aria e acqua.

Per quanto riguarda l'elettrodo centrale, l'angolo è definito in base all'elettrodo ricevente:

elettrodo 1: $\theta = 0$, elettrodo 2: $\theta = 22.5^\circ$ e elettrodo 9: $\theta = 180^\circ$.



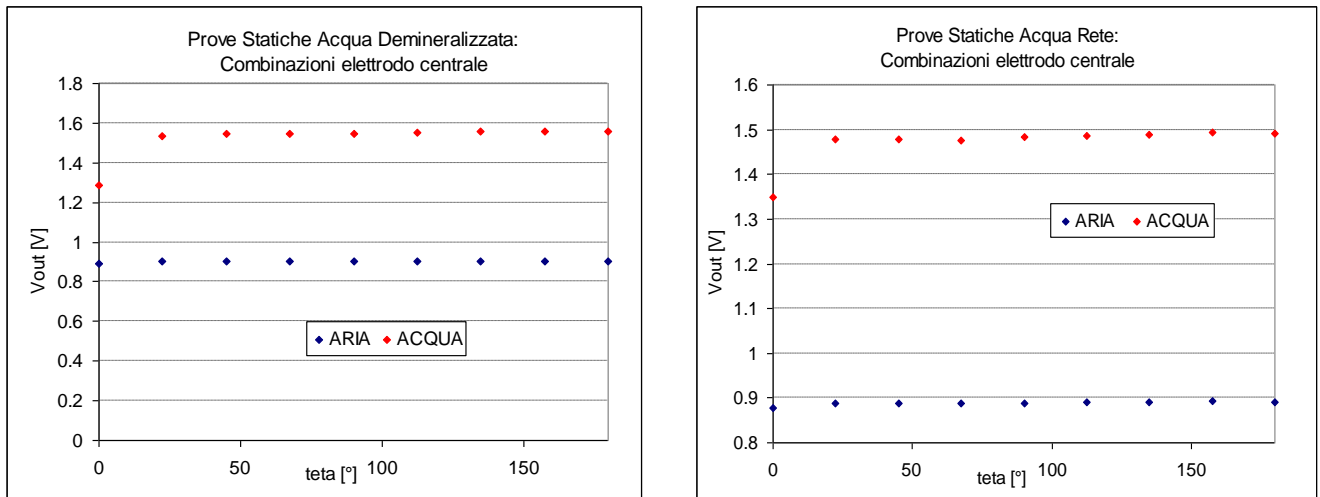


Fig. 9: Variazione angolare del segnale della sonda tomografica in presenza di aria e acqua. Prove di livello

Come ci si aspettava, nelle prove di livello, la derivata del segnale rispetto all'angolo è nulla per l'elettrodo centrale. Il segnale centrale-elettrodo 1 si discosta dagli altri valori per le motivazioni descritte precedentemente.

Per quanto riguarda gli elettrodi periferici, il segnale raggiunge un minimo per le combinazioni poste tra 67.5 e 135° e assume i valori massimi a 22.5° e a 180° (combinazione 1-9 e 9-1) per l'elettrodo 1, mentre decresce fino a 135° per l'elettrodo 3 e fino a 90° per l'elettrodo 5.

7.2 PROVE IN DEFLUSSO BIFASE ANULARE

- **Analisi della ripetibilità dei segnali**

In Tab.3 e Tab.4 sono riportati gli scarti percentuali dei valori assunti dal segnale elettrico di output per le permutazioni ij - ji .

Anche per deflusso bifase valgono le considerazioni riportate in 7.1, per le prove di livello, anche se in questo caso i valori degli scarti sono maggiori; le maggiori variazioni si hanno per la permutazione 19-91, che corrisponde agli elettrodi posti a 180°, anche in questo caso gli scarti sono leggermente maggiori per le prove con acqua demineralizzata.

Nel caso di deflusso bifase anulare, l'analisi di queste variazioni risulta complessa in quanto fortemente influenzata dallo spessore e dalla stabilità del film liquido; perturbazioni del film, onde, irregolarità potrebbero notevolmente alterare il segnale.

Dalla prima analisi effettuata è emerso che lo scarto percentuale aumenta passando da deflusso monofase aria a deflusso bifase, ma decresce al crescere della portata di liquido.

Occorre effettuare un set di prove atto a studiare questi fenomeni, in modo da discriminare le variazioni del segnale dovute alla fluidodinamica e quelle dovute all'elettronica.

Si sottolinea che i valori riportati per le combinazioni di ogni singola prova sono i valori medi relativi a 36 cicli di acquisizione. I tempi di acquisizione di ogni ciclo sono attualmente di circa 4 s; potrebbe essere utile ridurre questo periodo in modo da valutare l'influenza dei parametri fluidodinamici (onde e perturbazioni del film liquido) sul segnale elettrico.

Prove Deflusso Bifase Anulare, Acqua Rete										
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8	RUN 9	RUN 10
Q_{acqua} [m³/h]	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.1
Q_{aria} [m³/h]	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363
Permutazione	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %
12-21	-1.7303	-1.4048	-1.4558	-1.3666	-1.3201	-0.1408	-0.061	-0.1307	-0.1406	-0.1758
13-31	-1.5012	-1.4788	-1.8347	-0.841	-0.4776	-0.2201	-0.0786	-0.2902	-0.0652	-0.2908
14-41	-0.4977	-0.5722	-0.8647	0.1417	0.3557	0.1318	0.1069	0.11	0.1368	0.1203
15-51	-0.1365	-0.2172	-0.4599	0.3572	0.6122	0.153	0.0945	0.1749	0.1561	0.1571
16-61	0.0668	0.0214	-0.2235	0.7573	0.6825	0.1599	0.12	0.1603	0.1265	0.1304
17-71	0.4261	0.3885	-0.0921	1.0926	0.6805	0.18	0.1064	0.1934	0.1309	0.173
18-81	0.8694	0.8616	0.3035	1.1756	1.5407	0.2384	0.1355	0.2167	0.1789	0.1899
19-91	1.8877	2.5147	2.0789	2.3635	1.9052	0.9141	0.6958	0.8938	0.8537	0.9785
23-32	-1.0695	-0.8458	-1.4203	-0.7849	-0.7973	-0.2883	-0.082	-0.2266	-0.1726	-0.215
24-42	-2.0358	-2.1008	-1.9312	-1.6868	-1.5157	-0.5242	-0.2762	-0.3964	-0.3722	-0.533
25-52	-1.1538	-1.2091	-0.9582	-0.9607	-0.8021	-0.0045	0.022	-0.0142	0.0639	0.0211
26-62	-0.8343	-0.9323	-0.6365	-0.7927	-0.7577	-0.0638	0.0016	-0.0498	-0.0154	-0.0271
27-72	-0.6194	-0.4403	-0.4462	-0.6005	-0.5929	-0.0335	0.0141	-0.0118	0.0143	-0.0137
28-82	-0.4944	-0.4525	-0.3283	-0.4796	-0.495	0.0276	0.0666	0.059	0.0579	0.0529
29-92	-0.5991	-0.6452	-0.3932	-0.4645	-0.5692	-0.1422	-0.1009	-0.1475	-0.1397	-0.1864
34-43	-1.4172	-1.423	-1.28	-0.7044	-0.6402	-0.5727	-0.4162	-0.5152	-0.3961	-0.494
35-53	-1.8562	-1.6793	-1.8083	-1.3946	-1.2975	-0.4567	-0.3353	-0.4518	-0.3365	-0.3563
36-63	-1.1409	-1.0379	-0.9328	-1.0941	-0.8582	-0.142	-0.1458	-0.1385	-0.1313	-0.1222
37-73	-0.5825	-0.4687	-0.5184	-0.5625	-0.6349	-0.0237	-0.0798	-0.0497	-0.0358	-0.0341
38-83	-0.3607	-0.3486	-0.3101	-0.359	-0.306	0.0268	-0.0172	0.024	0.0046	0.0188
39-93	-0.4874	-0.5469	-0.4393	-0.4929	-0.5608	-0.1794	-0.2109	-0.1385	-0.2084	-0.1921
45-54	-1.0057	-1.0896	-1.3399	-0.6808	-0.6484	-0.2711	-0.2297	-0.3067	-0.2357	-0.3118
46-64	-1.8401	-2.1357	-1.9214	-1.2315	-0.9903	-0.387	-0.2563	-0.3587	-0.3058	-0.3971
47-74	-0.9681	-0.9232	-0.7325	-0.5972	-0.4224	-0.0099	-0.0335	-0.0293	-0.0159	-0.0283
48-84	-0.5531	-0.4662	-0.2972	-0.2661	-0.1736	0.0833	0.0541	0.0579	0.0786	0.0794
49-94	-0.6043	-0.6552	-0.3511	-0.3877	-0.5687	-0.1358	-0.1376	-0.1156	-0.1337	-0.1361
56-65	-1.344	-1.4272	-1.105	-0.9576	-0.4062	-0.1999	-0.1827	-0.349	-0.2148	-0.2484
57-75	-2.1388	-1.6036	-2.0949	-1.4374	-1.2568	-0.7008	-0.3966	-0.6416	-0.4728	-0.6831
58-85	-1.0242	-0.8289	-0.7453	-0.8049	0.0256	-0.2358	-0.0696	-0.1445	-0.1388	-0.1685
59-95	-0.8223	-0.9468	-0.5977	-0.9525	-0.8382	-0.4105	-0.2509	-0.3872	-0.3118	-0.3701
67-76	-1.2028	-1.1111	-1.3502	-0.6746	-0.4954	-0.4684	-0.2364	-0.3446	-0.3585	-0.3799
68-86	-1.7815	-1.4594	-1.6529	-0.8368	-0.8502	-0.3389	-0.181	-0.3361	-0.2535	-0.3171
69-96	-1.0952	-1.2972	-0.6939	-0.9463	-0.9862	-0.2707	-0.1845	-0.2809	-0.2097	-0.2779
78-87	-0.5612	-0.9915	-1.0541	-0.2944	-0.1488	-0.2125	-0.089	-0.2581	-0.0791	-0.337
79-97	-2.5888	-2.0174	-1.5252	-1.227	-1.3112	-0.699	-0.5043	-0.6757	-0.5621	-0.555
89-98	-1.3844	-1.654	-1.3618	-1.0797	-1.1144	-0.7302	-0.3702	-0.5347	-0.5365	-0.6185

Tab. 3: Variazione del segnale per le permutazioni ij-ji. Prove deflusso anulare, acqua di rete

Prove Deflusso Bifase Anulare, Acqua Demineralizzata					
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5
Q_{acqua} [m³/h]	0	0.01	0.02	0.065	0.02
Q_{aria} [m³/h]	373	373	373	373	457
Permutazione	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %	Δ %
12-21	-1.988	-2.3424	-1.6774	-1.5398	-2.7792
13-31	-2.2936	-1.2948	-2.2687	-2.1479	-2.5513
14-41	-0.8251	-0.1137	-1.3882	-1.1167	-0.8033
15-51	-0.1304	0.3907	-0.5374	-0.4546	-0.1752
16-61	0.147	0.689	0.1362	0.2816	0.3813
17-71	0.4668	1.4894	1.1153	0.8807	0.9117
18-81	1.2081	2.2025	2.2398	1.6602	1.9677
19-91	2.7013	3.5636	3.975	3.4248	3.7725
23-32	-1.1155	-0.989	-1.2176	-0.7316	-1.2995
24-42	-1.9649	-1.9592	-1.6791	-1.3904	-1.8871
25-52	-0.9694	-1.3003	-1.3006	-0.8788	-1.5418
26-62	-0.4918	-0.9825	-0.9244	-0.7964	-0.9056
27-72	-0.3209	-0.662	-0.5333	-0.5598	-0.6487
28-82	-0.1667	-0.2526	-0.2232	-0.22	-0.3253
29-92	-0.5882	-0.2024	-0.2269	-0.2486	-0.5076
34-43	-1.2242	-0.9509	-1.1853	-0.9898	-1.3291
35-53	-2.654	-2.138	-2.3187	-1.6888	-2.7305
36-63	-1.1233	-1.5689	-1.4822	-1.2607	-1.6426
37-73	-0.6038	-1.2908	-1.1142	-0.9835	-1.1676
38-83	-0.3092	-0.3849	-0.5787	-0.5826	-0.6817
39-93	-0.5731	-0.5941	-0.612	-0.6023	-0.7626
45-54	-1.8826	-1.2072	-1.5749	-0.9475	-1.5456
46-64	-2.131	-1.9887	-2.036	-1.6112	-2.5025
47-74	-1.2531	-1.5499	-1.7163	-1.2622	-1.6048
48-84	-0.5097	-0.7349	-0.8671	-0.8292	-0.9376
49-94	-0.6463	-0.625	-0.81	-0.7763	-0.9569
56-65	-1.3433	-1.1166	-1.2221	-0.8	-1.4013
57-75	-2.8581	-2.4816	-2.5347	-2.2575	-2.8867
58-85	-1.5096	-1.1819	-1.5058	-1.3841	-1.7659
59-95	-1.1362	-1.024	-1.3472	-1.3179	-1.3108
67-76	-1.987	-1.7089	-1.6254	-1.2985	-1.8078
68-86	-2.7382	-2.2592	-2.3857	-1.6414	-2.9898
69-96	-1.4329	-1.7819	-2.0004	-1.5337	-1.9122
78-87	-1.4772	-1.1014	-0.8658	-0.7636	-1.4799
79-97	-2.8278	-2.3065	-2.5309	-2.1037	-3.0143
89-98	-2.2113	-1.464	-1.6506	-1.3536	-1.5268

Tab. 4: Variazione del segnale per le permutazioni ij-ji. Prove deflusso anulare, acqua demineralizzata

- **Variazione angolare del segnale e sensibilità dello strumento alla variazione di portata**

In Fig. 10 sono riportati i grafici relativi alle variazioni angolari dei segnali, per le prove in deflusso bifase effettuate con acqua di rete e acqua demineralizzata, parametrizzate in funzione delle portate della miscela.

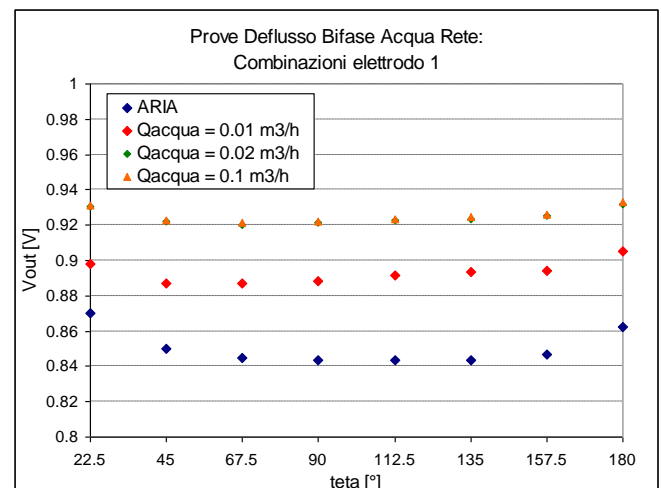
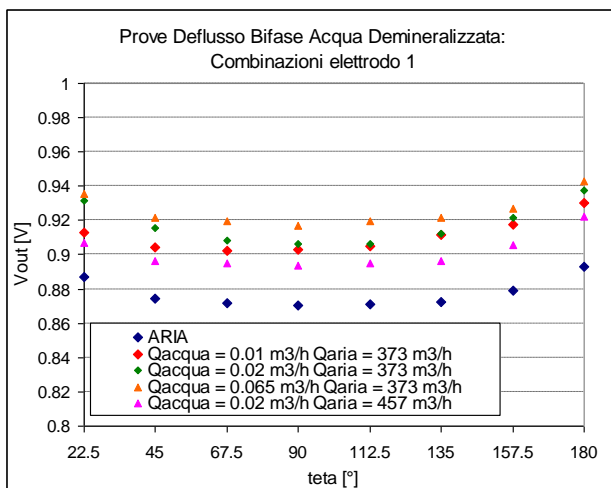
Anche in questo caso l'elettrodo centrale non è affetto da una dipendenza angolare, mentre come per le prove di livello il segnale decresce al crescere dell'angolo tra 22.5° e 67.5° , ha derivata nulla tra 67.5° e 135° e cresce tra 135° e 180° per l'elettrodo 1.

I grafici relativi all'eccitazione dell'elettrodo 3 e dell'elettrodo 5 mostrano un valore continuamente decrescente rispettivamente fino a 135° e 90° .

I grafici di Fig. 10, mostrano anche la dipendenza del segnale delle varie combinazioni al variare delle portate.

Per quanto riguarda l'elettrodo centrale è evidente la maggiore sensibilità alla variazione di portata con acqua di rete; il segnale passa da un valore di 0.88 in deflusso monofase aria a un valore di 1.45 relativo a una portata di liquido pari a $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ e una portata di aria pari a $363 \text{ m}^3/\text{h}$.

In deflusso anulare con acqua demineralizzata il segnale relativo all'elettrodo centrale assume valori notevolmente più bassi e confrontabili con quelli degli elettrodi periferici, con una variazione compresa tra 0.9 (monofase aria) e 0.94 ($Q_{\text{acqua}} = 0.065 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{aria}} = 373 \text{ m}^3/\text{h}$). Gli elettrodi 3 e 5, relativamente alle prove effettuate con portata di liquido pari a 0.01 e 0.02 a portata di aria costante, non mostrano nessuna sensibilità sia con acqua demineralizzata ($Q_{\text{aria}} = 373 \text{ m}^3/\text{h}$) che con acqua di rete ($Q_{\text{aria}} = 363 \text{ m}^3/\text{h}$), mentre variazioni del segnale sono state evidenziate per le combinazioni relative all'elettrodo 1, in particolare per angoli inferiori a 90° e superiori a 112.5° , solo per le prove con acqua demineralizzata.



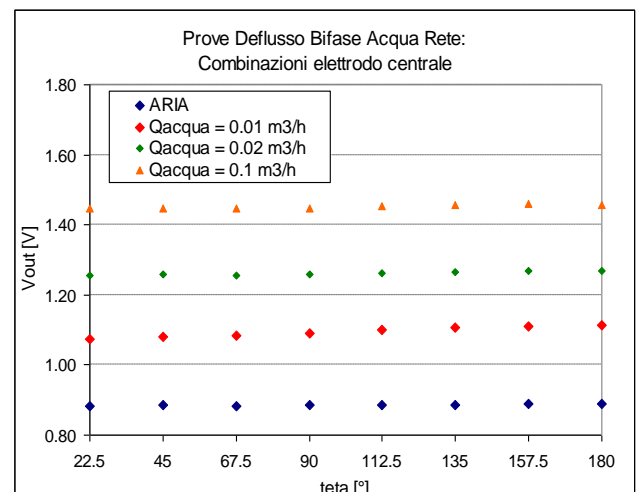
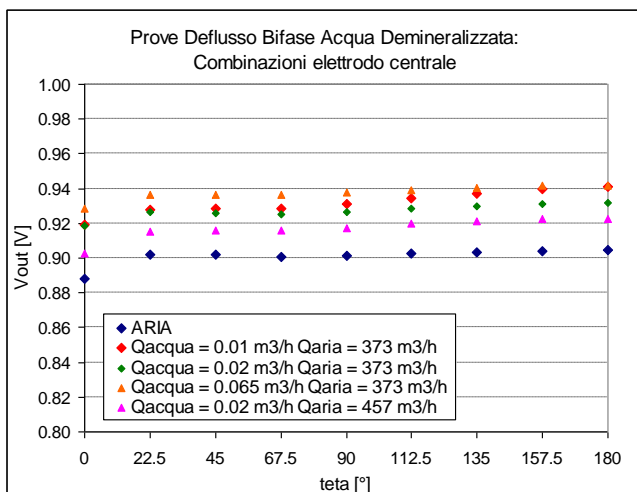
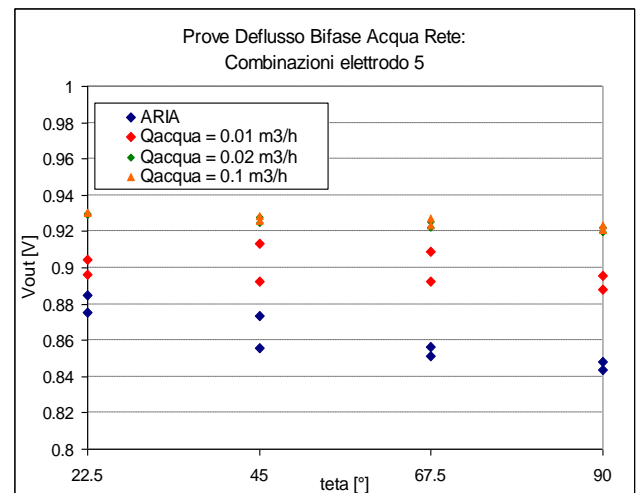
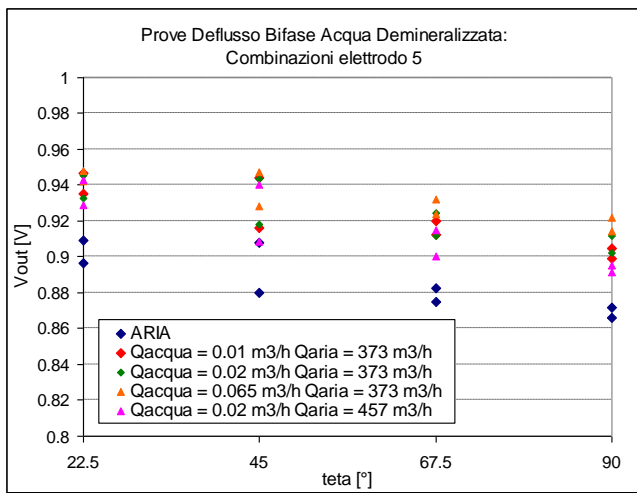
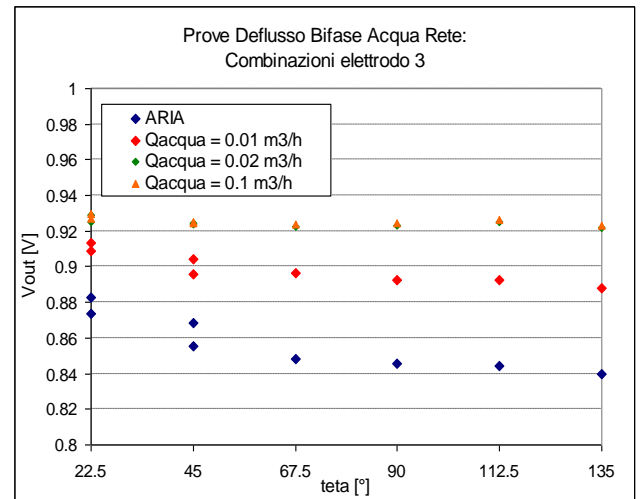
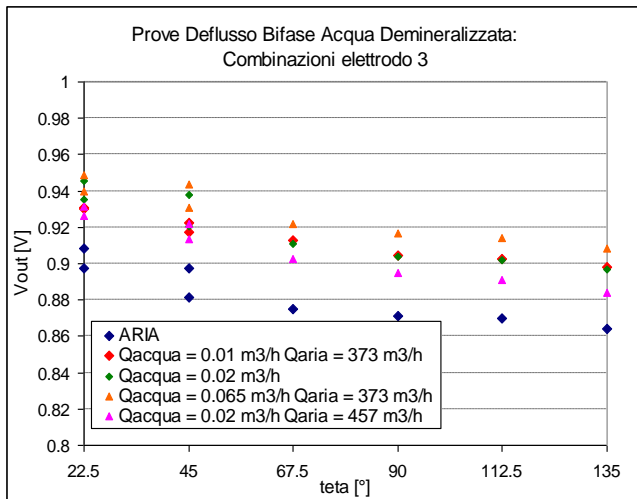


Fig. 10: Variazione angolare del segnale in funzione delle portate bifase della miscela. Prove deflusso anulare

La sonda mostra una certa sensibilità al variare delle portate e del grado di vuoto, ma occorre amplificare il segnale, eliminando accuratamente i rumori, al fine di evidenziare anche piccole variazioni nel grado di vuoto, che nelle prove in esame viene variato tra 0.968 e 1.

I grafici di Fig. 11 e Fig. 12, mostrano la variazione del segnale in funzione del grado di vuoto nella test section.

Il grado di vuoto è stato misurato con il metodo delle valvole a chiusura rapida e tramite pesata della massa di liquido intercettata.

Il grafico di Fig. 11 mostra la maggiore sensibilità del segnale per gli elettrodi posti a 90° e la buona ripetibilità, rispetto agli elettrodi posti a 22.5° .

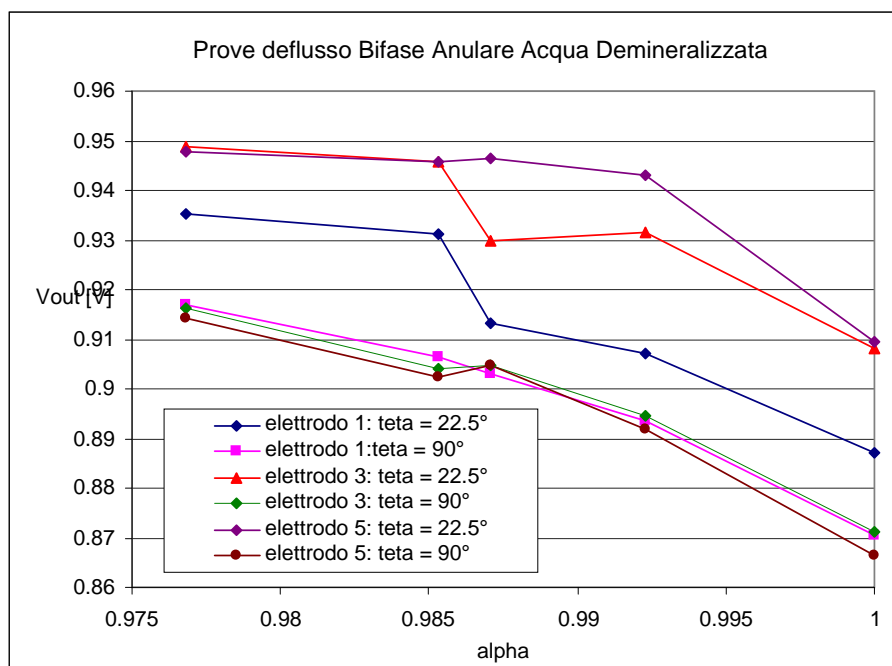


Fig. 11: Variazione del segnale elettrico in funzione del grado di vuoto volumetrico. Prove deflusso anulare, acqua demineralizzata.

In Fig. 12 è mostrata la variazione del segnale in funzione del grado di vuoto, per le prove effettuate utilizzando acqua di rete; rispetto alle prove con acqua demineralizzata la sensibilità e la ripetibilità del segnale sono in questo caso peggiori.

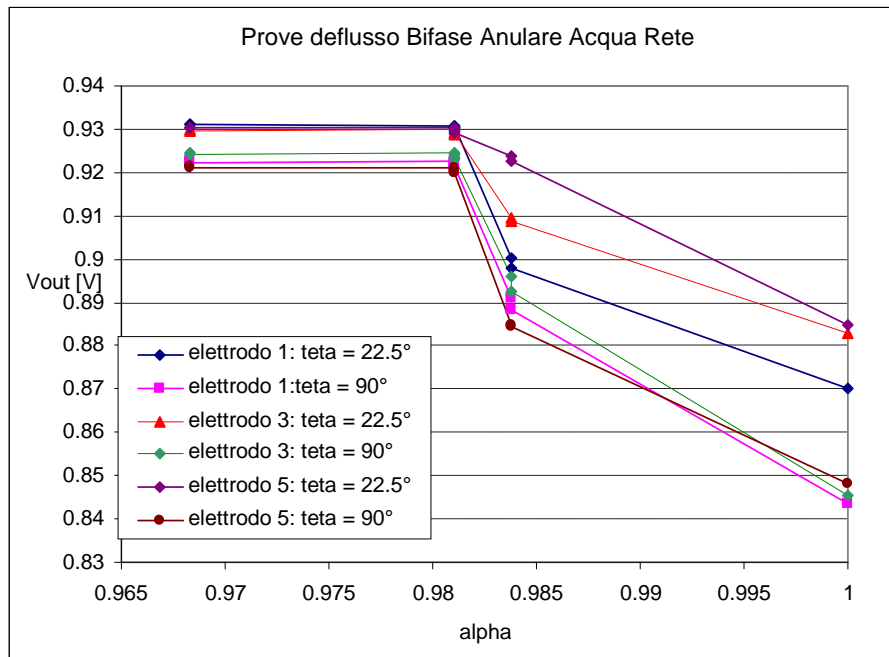


Fig. 12: Variazione del segnale elettrico in funzione del grado di vuoto volumetrico. Prove deflusso bifase anulare, acqua di rete.

7.3 ANALISI STANDARD DEVIATIONS DEI SEGNALI ELETTRICI

Le prove sperimentali sono state valutate tramite l'analisi dei valori della standard deviation relativa alle diverse combinazioni di elettrodi.

Il numero di riferimento delle varie combinazioni, riportato nei grafici di Fig. 13, è definito in *ALLEGATO II*.

Come evidenziato nei grafici di Fig. 13, la deviazione standard è sempre inferiore a 0.025 per tutte le combinazioni, sia nelle prove di livello che nelle prove in deflusso anulare, sia con acqua di rete che con acqua demineralizzata, tranne che per combinazioni relative all'elettrodo centrale.

In particolare la combinazione centrale-elettrodo 1 (numero di riferimento 9) è maggiore di 0.075 per le prove statiche (prove di livello) e di 0.05 per le prove in deflusso bifase anulare effettuate utilizzando acqua di rete; mentre per le prove effettuate con acqua demineralizzata in condizioni statiche è compresa tra 0.135 e 0.2. Nelle prove in deflusso bifase anulare, con acqua demineralizzata, la deviazione standard delle combinazioni centrale dell'elettrodo centrale con gli elettrodi esterni assume valori in linea con le combinazioni relative agli elettrodi periferici.

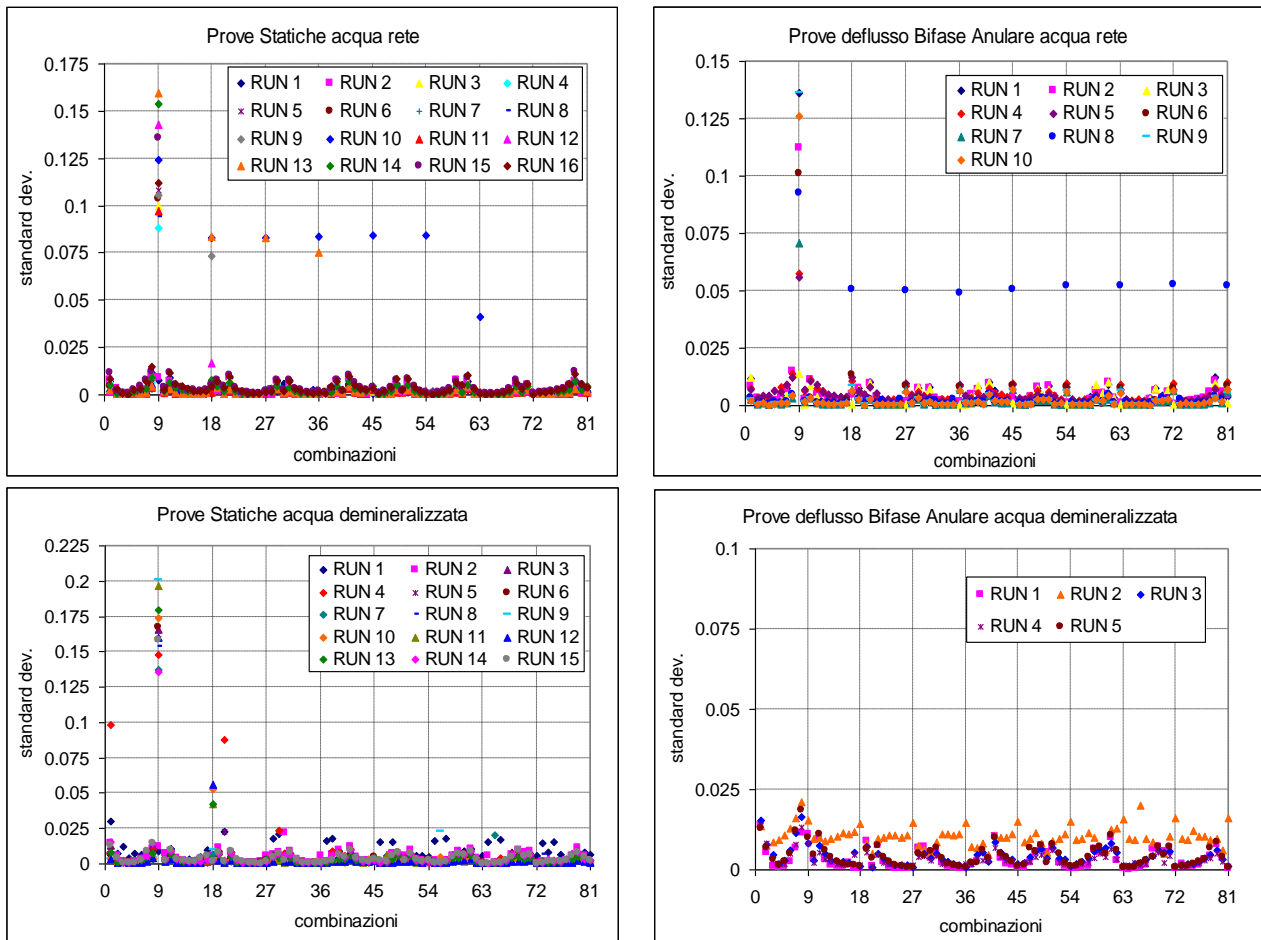


Fig. 13: Standard deviation dei segnali elettrici relativi alle varie combinazioni di elettrodi

L'elevato valore di deviazione standard dell'elettrodo centrale è dovuta alla sequenza utilizzata per scansionare le varie combinazioni (vedi *ALLEGATO I*).

I valori dell'elettrodo centrale, interno e a contatto con il liquido, sono sensibilmente maggiori di quelli relativi alle combinazioni tra elettrodi periferici. Il passaggio tra l'eccitazione dell'elettrodo 1 e l'elettrodo centrale, come evidenziato in precedenza, è problematica. I valori relativamente più elevati dell'elettrodo centrale condizionano l'acquisizione dei valori relativi alle combinazioni dell'elettrodo 1 e viceversa. Questo spiega anche perché nelle prove in deflusso anulare con acqua demineralizzata, non si hanno grosse variazioni della deviazione standard; in questa configurazione, le combinazioni dell'elettrodo centrale forniscono valori in uscita confrontabili con quelli delle altre combinazioni, evitando quindi il passaggio tra valori alti e bassi nel sistema di acquisizione.

Potrebbe essere opportuno ripetere per due volte consecutivamente la scansione relativa all'eccitazione dell'elettrodo 1 e la scansione relativa all'eccitazione dell'elettrodo centrale, e acquisire solo la seconda; in questo modo si eliminerebbero dalle acquisizioni le interferenze sopra evidenziate. Questa soluzione verrà testata nel proseguo dello studio. Si sottolinea però che la

soluzione proposta non è adeguata per deflussi transitori, in cui è richiesta una velocità di scansione degli elettrodi e di acquisizione delle misure notevolmente più elevata di quella qui testata.

Poiché la sonda dovrà lavorare in condizioni transitorie nell'impianto SPES3 sarà soggetta a brusche variazioni di presenza acqua-vapore, il problema deve essere accuratamente risolto.

Occorre inoltre sottolineare che in ogni ciclo di scansione, per ogni combinazione di elettrodi, viene registrata la media relativa a 8000 *samples*; nelle successive prove il programma di acquisizione verrà modificato in modo da valutare anche la deviazione standard relativa a ogni misura istantanea, in modo tale da valutare se la registrazione del solo valore medio è sufficiente a caratterizzare la combinazione.

8 CONCLUSIONI

Le prove preliminari effettuate nel circuito sperimentale del dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, riguardanti lo sviluppo e la messa a punto della sonda capacitiva SIET, hanno mostrato le potenzialità e le problematiche legate a questo strumento.

I test effettuati in condizioni statiche hanno permesso di evidenziare la necessità di modificare il sistema di acquisizione dei segnali, sia valutando la deviazione standard relativa al valore medio acquisito per ogni combinazione in ogni ciclo di misura, sia modificando la sequenza di eccitazione degli elettrodi.

I test effettuati con una miscela aria-acqua in deflusso anulare verticale ascendente hanno mostrato una variazione del segnale anche per piccole variazioni del grado di vuoto (inferiori all'1%) e la diversa risposta degli elettrodi al variare dell'angolo compreso tra elettrodo eccitato e elettrodo ricevente.

Al variare dell'angolo corrisponde una diversa sensibilità alle variazioni del grado di vuoto e anche una differente ripetibilità del segnale.

Ulteriori test e analisi devono essere effettuate, utilizzando acqua demineralizzata, al fine di caratterizzare completamente il comportamento della sonda e sviluppare algoritmi atti a identificare il grado di vuoto della miscela a partire dai segnali relativi alle varie combinazioni di elettrodi.

BIBLIOGRAFIA

1. *Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore.* A. Achilli, M. Greco, Report RdS/2010/x ENEA
2. *State of art and Selection of techniques in Multiphase Flow Measurement.* M. De Salve, G. Monni, B. Panella, Report RdS/2010/67, ENEA
3. *SPES-3 Facility Analysis, reference data for postulated Accident Simulation, Criteria for general and special instrumentation selection.* C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, G. Monni, B. Panella, A. Masetto, Report RdS/2010/68 ENEA
4. *Strumentazione speciale per l'impianto sperimentale SPES-3.* S. Gandolfi, M. Greco, Report RdS/2010/7
5. *Validation of electrical-impedance tomography for measurements of material distribution in two-phase flow.* D.L. George, J.R. Torczynski, K.A. Shollenberger, T.J. O'Hern, S.L. Ceccio, International Journal of Multiphase Flow 26 (2000) 549-581
6. *Application of Electrical Capacitance Tomography to the Void Fraction Measurement of Two-Phase Flow.* Z. Huang, B. Wang, and H. Li, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, No. 1, FEBRUARY 2003
7. *Characterisation of air-water two-phase vertical flow using electrical resistance imaging.* Y. Wu, H. Li, M. Wang, and R.A. Williams, R.A., The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 83, February 2005
8. *Measurement of real-time flow structures in gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems using electrical capacitance tomography (ECT).* W. Warsito, L.S. Fan, Chemical Engineering Science 56 (2001) 6455-6462

ALLEGATO I

Sequenza Tomografica

Sequenza	Lettura									Eccitazione										
	Angolo	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	2000
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
26	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
33	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
34	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
35	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
41	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
42	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
43	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
44	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
49	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
50	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
51	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
52	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

53	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
54	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
57	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
58	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
59	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
60	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
61	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
62	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
63	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
65	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
66	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
67	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
68	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
69	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
70	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
71	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
72	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
73	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
79	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
81	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
82	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
83	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
84	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
85	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
86	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
87	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
88	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
89	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

ALLEGATO II

Definizione combinazioni

combinazione	numero riferimento	teta [°]	combinazione	numero rif.	teta [°]	combinazione	numero rif.	teta [°]
1_2	1	22.5	4_1	28	67.5	7_1	55	135
1_3	2	45	4_2	29	45	7_2	56	112.5
1_4	3	67.5	4_3	30	22.5	7_3	57	90
1_5	4	90	4_5	31	22.5	7_4	58	67.5
1_6	5	112.5	4_6	32	45	7_5	59	45
1_7	6	135	4_7	33	67.5	7_6	60	22.5
1_8	7	157.5	4_8	34	90	7_8	61	22.5
1_9	8	180	4_9	35	112.5	7_9	62	45
1_10	9	0	4_10	36	0	7_10	63	0
2_1	10	22.5	5_1	37	90	8_1	64	157.5
2_3	11	22.5	5_2	38	67.5	8_2	65	135
2_4	12	45	5_3	39	45	8_3	66	112.5
2_5	13	67.5	5_4	40	22.5	8_4	67	90
2_6	14	90	5_6	41	22.5	8_5	68	67.5
2_7	15	112.5	5_7	42	45	8_6	69	45
2_8	16	135	5_8	43	67.5	8_7	70	22.5
2_9	17	157.5	5_9	44	90	8_9	71	22.5
2_10	18	0	5_10	45	0	8_10	72	0
3_1	19	45	6_1	46	112.5	9_1	73	22.5
3_2	20	22.5	6_2	47	90	9_2	74	45
3_4	21	22.5	6_3	48	67.5	9_3	75	67.5
3_5	22	45	6_4	49	45	9_4	76	90
3_6	23	67.5	6_5	50	22.5	9_5	77	112.5
3_7	24	90	6_7	51	22.5	9_6	78	135
3_8	25	112.5	6_8	52	45	9_7	79	157.5
3_9	26	135	6_9	53	67.5	9_8	80	180
3_10	27	0	6_10	54	0	9_10	81	0



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Energetica



Relazione tecnica sulle prove a freddo delle sonde per la misurazione del grado di vuoto e sulla verifica sperimentale della catena di misurazione, costituita da una turbina, un drag disk e della sonda sviluppata

Parte seconda

Analisi delle prestazioni di uno Spool Piece costituito da Turbina e Drag Disk in deflusso orizzontale bifase aria-acqua

Autori

M. De Salve

G. Monni

B. Panella

CERSE-POLITO RL 1260-II/2011

TORINO, LUGLIO 2011

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2-A3 dell'AdP ENEA MSE del 02/08/2010
Tema 1.3 – “Nuovo Nucleare da Fissione”*

Indice

LISTA DELLE FIGURE	3
LISTA DELLE TABELLE	4
NOMENCLATURA	5
1. INTRODUZIONE	6
2. CARATTERISTICHE DEGLI STRUMENTI DELLO SPOOL PIECE E LORO TEORIA	8
2.1 Turbina:	8
2.2 Drag Disk:	10
3. DESCRIZIONE DEL CIRCUITO	12
3.1 Circuito di prova.....	12
3.2 Strumentazione del circuito di prova	13
3.3 Circuiti ausiliari di alimentazione	14
3.4 Sistema di acquisizione dati.....	17
4. DEFLUSSO MONOFASE: MATRICE SPERIMENTALE E PROCEDURA DI PROVA	17
5. DEFLUSSO MONOFASE: ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI	20
5.1 Deflusso monofase acqua: Calibrazione Drag	20
5.2 Deflusso monofase acqua: Calibrazione Turbina.....	22
5.3 Deflusso monofase aria: Calibrazione Drag	23
5.4 Deflusso monofase aria: Calibrazione Turbina.....	23
5.5 Deflusso monofase: Confronto tra i coefficienti di calibrazione aria/acqua.....	25
6. DEFLUSSO BIFASE: DATI SPERIMENTALI E ANALISI DEI RISULTATI.....	28
6.1 Matrice Sperimentale e Procedura di prova.....	28
6.2 Risultati sperimentali Spool Piece in deflusso bifase	33
6.3 Analisi dei risultati	36
6.4 Analisi con coefficienti monofase acqua.....	42
6.5 Analisi con coefficienti monofase aria.....	45
6.6 Analisi con coefficienti monofase pesati.....	45
7. MAPPA DI FUNZIONAMENTO DELLO SPOOL PIECE	51
8. DISCUSSIONE DEI RISULTATI E ANALISI TEORICA	55
9. CONCLUSIONI.....	64
10. BIBLIOGRAFIA	65

LISTA DELLE FIGURE

FIG. 1: SCHEMA TURBINA ASSIALE.....	9
FIG. 2: SCHEMA DRAG DISK.....	11
FIG. 3: PONTE DI WHEATSTONE E VALORI DI RESISTENZA DEL PONTE DI WHEASTONE DEL DD CON F=0.....	11
FIG. 4: SCHEMA CIRCUITO DI PROVA.....	13
FIG. 5: SCHEMA CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE DELL'ACQUA.....	15
FIG. 6: SEGNALE DI OUTPUT DEL DRAG DISK IN FUNZIONE DELLA PORTATA DI ACQUA.....	21
FIG. 7: QUANTITÀ DI MOTO DEL DEFLUSSO MONOFASE ACQUA IN FUNZIONE DEL SEGNALE DEL DRAG DISK.....	21
FIG. 8: SEGNALE DI OUTPUT DELLA TURBINA IN FUNZIONE DELLA PORTATA DI ACQUA.....	22
FIG. 9: SEGNALE DI OUTPUT DEL DRAG DISK IN FUNZIONE DELLA PORTATA VOLUMETRICA DI ARIA.....	23
FIG. 10: VARIAZIONE TEMPORALE DEL SEGNALE DELLA TURBINA IN DEFLUSSO MONOFASE ARIA.....	24
FIG. 11: SEGNALE DI OUTPUT DELLA TURBINA IN FUNZIONE DELLA PORTATA VOLUMETRICA DI ARIA.....	25
FIG. 12: COEFFICIENTE DI CALIBRAZIONE DRAG IN FUNZIONE DEL NUMERO DI RE PER DEFLUSSO MONOFASE.....	26
FIG. 13 : COEFFICIENTE CALIBRAZIONE TURBINA IN FUNZIONE DEL NUMERO DI RE PER DEFLUSSO MONOFASE.....	27
FIG. 14: CAMPO DI PORTATE E TITOLI ANALIZZATI.....	31
FIG. 15: VARIAZIONE DELLA PRESSIONE MEDIA DEL CIRCUITO AL VARIARE DELLE PORTATE DI ARIA E ACQUA.....	32
FIG. 16: MAPPA DI TAITEL E DUKLER: REGIMI DI DEFLUSSO SPERIMENTATI.....	32
FIG. 17: ANDAMENTO TEMPORALE DEI SEGNALI ELETTRICI DEGLI STRUMENTI IN DEFLUSSO BIFASE.....	33
FIG. 18: SEGNALE ELETTRICO TURBINA IN FUNZIONE DELLA PORTATA IN DEFLUSSO BIFASE.....	34
FIG. 19: SEGNALE ELETTRICO DRAG IN FUNZIONE DELLA PORTATA MASSICA DI ACQUA IN DEFLUSSO BIFASE.....	35
FIG. 20: DENSITÀ APPARENTE "VISTA" DAL DD IN FUNZIONE DELLA DENSITÀ APPARENTE VISTA DALLA T.....	37
FIG. 21 : DENSITÀ APPARENTE CALCOLATA CON COEFFICIENTE MONOFASE ARIA IN FUNZIONE DELLA DENSITÀ CALCOLATA CON COEFFICIENTE MONOFASE ARIA PER DRAG E TURBINA.....	38
FIG. 22: VELOCITÀ MEDIA RICAVATA DA ST CON COEFFICIENTE MONOFASE.....	38
FIG. 23 : TITOLO DELLA MISCELA IN FUNZIONE DEL GRADO DI VUOTO RICAVATO DAL SEGNALE DEGLI STRUMENTI.....	39
FIG. 24: GRADO DI VUOTO – TITOLO : CONFRONTO CON LE CORRELAZIONI DELLA LETTERATURA.....	40
FIG. 25: DENSITÀ MISCELA BIFASE: CONFRONTO CON LE CORRELAZIONI.....	41
FIG. 26: GRADO DI VUOTO RICAVATO DA SP IN FUNZIONE DI X-SPERIMENTALE (A_{QDM}).....	42
FIG. 27: CONFRONTO TRA LA W_{TOT} -SPERIMENTALE E W_{TOT} -SP OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA DEL DEFLUSSO MONOFASE ACQUA.....	43
FIG. 28: CONFRONTO TRA X-MISCELA SPERIMENTALE E X-SP CON I COEFFICIENTI DI TARATURA MONOFASE ACQUA	43
FIG. 29: CONFRONTO TRA LA PORTATA DI ARIA SPERIMENTALE E QUELLA OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA DEL DEFLUSSO MONOFASE ACQUA.....	44
FIG. 30: CONFRONTO TRA LA PORTATA DI ACQUA SPERIMENTALE E QUELLA OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA DEL DEFLUSSO MONOFASE ACQUA.....	44
FIG. 31: CONFRONTO TRA LA PORTATA BIFASE SPERIMENTALE E QUELLA OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA DEL DEFLUSSO MONOFASE ARIA.....	45
FIG. 32: CONFRONTO TRA LE PORTATE DELLA MISCELA BIFASE OTTENUTE UTILIZZANDO I COEFFICIENTI DI CALIBRAZIONE MONOFASE DI ARIA E ACQUA RISPETTIVAMENTE.....	46
FIG. 33 : CONFRONTO TRA LA PORTATA DEL DEFLUSSO BIFASE SPERIMENTALE E QUELLA OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA PESATI SECONDO DIVERSI FATTORI.....	47
FIG. 34: CONFRONTO TRA LA PORTATA BIFASE SPERIMENTALE E QUELLA OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA PESATI.....	48
FIG. 35: CONFRONTO TRA IL TITOLO DELLA MISCELA SPERIMENTALE E QUELLO OTTENUTO ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA PESATI.....	49
FIG. 36 : CONFRONTO TRA LA PORTATA DI ARIA NEL DEFLUSSO BIFASE SPERIMENTALE E QUELLA OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA PESATI.....	49
FIG. 37 : CONFRONTO TRA LA PORTATA DI ACQUA NEL DEFLUSSO BIFASE SPERIMENTALE E QUELLA OTTENUTA ELABORANDO I SEGNALI DEGLI STRUMENTI CON I COEFFICIENTI DI TARATURA PESATI.....	50
FIG. 38: MAPPA SP. ASSE X : WACQUA [KG/S], SIMBOLI: SEGNALE TURBINA = ▲ . SEGNALE DRAG = ● .	52

FIG. 39: S^* IN FUNZIONE DELLA PORTATA IN MASSA DI ACQUA ADIMENSIONATA.....	53
FIG. 40: WACQUA SP vs. WACQUA SPERIMENTALE. BARRA $\gamma = \pm 15\%$ WACQUA SPERIMENTALE	54
FIG. 41: DEVIAZIONE STANDARD DEI SEGNALI ELETTRICI	56
FIG. 42: RAPPRESENTAZIONE DELLA VELOCITÀ IN INGRESSO DELLA TURBINA	58
FIG. 43: SLIP IN FUNZIONE DI P E P_L / P_G	60
FIG. 44: ANDAMENTO TEMPORALE DEI SEGNALI ELETTRICI DEGLI STRUMENTI IN DEFLUSSO BIFASE.....	61
FIG. 45: WAIR E WWATER STIMATE CON IL MODELLO DI AYA	62

LISTA DELLE TABELLE

TABELLA 1 : SCHEDA TECNICA TURBINA HOFFER HO	12
TABELLA 2: SCHEDA TECNICA DRAG DISK RAMAPO MARK V	12
TABELLA 3: CARATTERISTICHE TECNICHE MISURATORE DI PORTATA DEL CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE ARIA	14
TABELLA 4: CARATTERISTICHE TECNICHE TRASDUTTORE DI PRESSIONE (INGRESSO ACQUA NEL MISCELATORE).....	14
TABELLA 5: CARATTERISTICHE TECNICHE POMPA I CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE ACQUA.....	15
TABELLA 6: CARATTERISTICHE TECNICHE POMPA II CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE ACQUA	16
TABELLA 7: CARATTERISTICHE TECNICHE MISURATORE ELETTROMAGNETICO	16
TABELLA 8: MATRICE SPERIMENTALE SERIE 1: DEFLUSSO MONOFASE.....	19
TABELLA 9: ANALISI SEGNALE DEL DRAG IN DEFLUSSO MONOFASE ACQUA.....	20
TABELLA 10: MATRICE SPERIMENTALE SET 1: DEFLUSSO BIFASE	29
TABELLA 11: MATRICE SPERIMENTALE SET 2: DEFLUSSO BIFASE	30

NOMENCLATURA

SIMBOLO	GRANDEZZA		
a	Coefficiente di best-fit sperimentale o parametro modello di AYA		
b	Coefficiente di best-fit sperimentale o parametro modello di AYA		
f.s.v	valore di fondo scala		
p	Pressione		
r.v	Valore letto (read value)		
x	Titolo della miscela		
A	Area		
C_d	Coefficiente di Drag		
D	Diametro		
F	Forza		
K	Coefficiente di Calibrazione dello strumento		
G	Portata areica		
L	Lunghezza		
\dot{m}	Portata in massa		
Q	Portata Volumetrica		
QdM	Quantità di Moto		
R	Costante dei Gas		
R_x	Valore di resistenza del ponte di Wheatstone		
S	Segnale elettrico dello Strumento o Slip Ratio		
T	Temperatura		
V	Velocità media del deflusso		
α	Frazione di vuoto		
ρ	Densità		
μ	Viscosità dinamica		
PEDICI			
d	Drag Disk	tot	Totale
g	Gas	0	Condizioni Standard
i	Interno	*	Valore Normalizzato
l	Liquido	MP	Monofase (Mono-phase)
t	Turbina	TP	Bifase (Two-phase)

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi", con riferimento ai reattori di piccola e media taglia, il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, ha svolto una attività di ricerca teorico-sperimentale con lo scopo di sviluppare e caratterizzare uno "Spool Piece" per la misura della portata in un deflusso bifase.

Lo sviluppo di strumenti e metodi tali da fornire la portata e il titolo di una miscela bifase ha una lunga storia iniziata con lo sviluppo delle centrali termoelettriche a vapore e diventata sempre più importante a partire dagli anni 1960.

Negli anni 1975-1980 lo sviluppo della strumentazione in campo nucleare aveva l'obiettivo di misurare le grandezze che caratterizzavano i deflussi bifase nei grandi circuiti di prova per lo studio dei transitori incidentali degli impianti nucleari e si è introdotto il concetto di "spool piece" inteso come un insieme di strumenti connessi in serie in un condotto.

Lo spool piece è tipicamente costituito da un misuratore a turbina in grado di fornire un segnale funzione della portata volumetrica, un drag disk o anche un misuratore a strozzamento [17-18] tale da fornire una informazione proporzionale alla quantità di moto del deflusso ed infine un misuratore di frazione di vuoto (tipicamente un gamma-densitometro) tale da fornire una informazione proporzionale alla frazione di vuoto.

I misuratori volumetrici quali le turbine, sono state largamente utilizzate per analizzare il deflusso monofase, e il loro utilizzo è stato esteso anche al deflusso bifase in combinazione con altri strumenti come il Drag Disk [3,4,5,8,9,10,11,19,21].

L'utilizzo di questi strumenti in deflusso bifase non è semplice a causa dei diversi flow pattern che si instaurano e delle molteplici variabili fisiche che influenzano il deflusso [7].

L'utilizzo della turbina quale misuratore usualmente richiede l'utilizzo di un modello che consenta di ricavare le velocità a partire dalla velocità di rotazione delle palette dello strumento.

Esistono differenti modelli tra cui i più noti e accreditati sono:

- Modello Volumetrico;
- Modello di Rouhani;

- Modello di Aya.

I primi due hanno il vantaggio di essere semplici, mentre il modello di Aya risulta essere più accurato. Comunque sia anche il modello di Aya può essere utilizzato limitatamente, tenendo conto delle sue ipotesi semplificative sulla configurazione geometrica delle palette e sulla distribuzione uniforme del grado di vuoto sulla sezione del condotto (deflusso disperso con slip tra le due fasi).

Hardy [21] ha dimostrato che il funzionamento della turbina è fortemente dipendente dal flow pattern, anche a basse portate di liquido la velocità della turbina è nettamente inferiore a quella che si avrebbe con deflusso monofase aeriforme. La risposta della turbina è dominata dalla fase liquida, e l'introduzione di acqua tende a rallentare la velocità di rotazione delle palette. Solo per deflussi dispersi la velocità di rotazione approssima quella del monofase aria [21].

In condizioni di deflusso anulare, la presenza del film liquido che si muove a velocità sensibilmente inferiori rispetto al *core*, agisce quindi come un freno per le palette della turbina, inviando un segnale non direttamente correlabile con la velocità media della miscela.

L'obiettivo del presente studio è l'analisi sperimentale e teorica del funzionamento di uno Spool Piece (SP) costituito da strumenti convenzionali: una turbina assiale e da un misuratore a bersaglio, installati, con giacitura orizzontale, in un circuito che opera con un deflusso bifase aria-acqua.

I dati sperimentali hanno consentito di costruire una mappa di funzionamento dei due misuratori; l'analisi della mappa, insieme a ipotesi sul flow pattern e sul grado di vuoto, permette di stimare, le portate della fase liquida e della fase gassosa e/o altre informazioni atte a caratterizzare il deflusso bifase con le relative incertezze.

2. CARATTERISTICHE DEGLI STRUMENTI DELLO SPOOL PIECE E LORO TEORIA

Uno SP ideale è un condotto praticamente adiabatico costituito da una serie di strumenti, alimentati in ingresso da un deflusso. Lo SP ideale ha una dinamica veloce, e individua un set di equazioni algebriche (in cui il numero di equazioni indipendenti è pari al numero delle grandezze incognite del deflusso) che permettono di descrivere il deflusso noti i segnali elettrici degli strumenti.

La scelta degli strumenti che compongono lo SP, è strettamente legata al tipo di deflusso che si intende analizzare, alla velocità delle fasi, alle pressioni e alle temperature.

Per quanto riguarda l'utilizzo del misuratore volumetrico e del misuratore di quantità di moto, si possono più in generale utilizzare due strumenti basati su principi fisici diversi che permettano di valutare la velocità media delle fasi e le portate specifiche.

Nel presente studio si vuole verificare la possibilità di caratterizzare il deflusso aria-acqua mediante uno SP costituito da una turbina e da un drag disk.

Ovvero si intende formulare una metodologia per l'interpretazione dei segnali quando la strumentazione convenzionale per deflussi monofase è interessata da un deflusso bifase.

Un'elaborazione dei segnali associati a questi misuratori, dovrebbe, in linea di principio, consentire la stima della portata in massa delle fasi.

2.1 Turbina:

La turbina, essendo un misuratore volumetrico, fornisce, in un deflusso monofase, un segnale proporzionale alla portata volumetrica e quindi alla velocità del fluido che durante il deflusso mette in rotazione le palette:

$$V_t = \frac{\omega}{\text{tg}\phi / r} \quad (1)$$

Dove

$$tg\phi / r = cost \quad (2)$$

V_t = velocità del fluido

ω = velocità di rotazione del rotore della turbina

ϕ = angolo di inclinazione delle palette

r = raggio delle palette

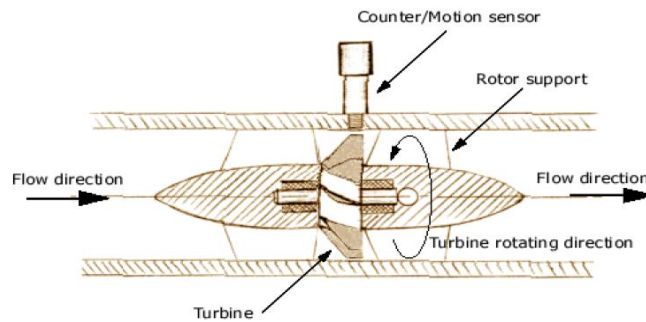


Fig. 1: Schema Turbina assiale

Il rotore raggiunge rapidamente la velocità di fuga, ovvero, la velocità in corrispondenza della quale il fluido trasferisce al rotore una coppia pari alla coppia di attrito associata ai cuscinetti e più in generale alle varie coppie resistenti presenti.

Nell'ipotesi di comportamento volumetrico anche in deflusso bifase, il legame tra segnale elettrico e portata è di tipo lineare:

$$S_t = K_t \cdot Q \quad (3)$$

Il coefficiente di calibrazione K_t deve essere valutato tenendo conto del grado di vuoto della miscela rispetto alle condizioni monofase.

Nota la portata volumetrica la velocità media del deflusso si calcola come:

$$V = Q / A \quad (4)$$

Dove A è la sezione del condotto di misura.

Il misuratore a turbina utilizzato è un misuratore delle serie HO Hoffer le cui caratteristiche tecniche sono di riportate in Tabella 1 .

La turbina utilizzata nel presente studio è un modello precedente a quello attualmente prodotto dalla Hoffer. Nelle turbine attualmente in commercio i raddrizzatori di filetto vengono inseriti anche nei tratti di calma, oltre che in ingresso e in uscita dal misuratore; questo consente di poter utilizzare dei tratti di calma sensibilmente inferiori a quelli del presente studio.

Nella prosecuzione dello studio [22] è stato studiato il funzionamento del nuovo modello e le differenze rispetto al misuratore fin qui utilizzato.

2.2 Drag Disk:

Il misuratore di portata a bersaglio (Drag plate) si basa sulla misura dello spostamento di un bersaglio all'interno del corpo di misura, quando questo viene investito dal flusso, generando un segnale che può essere espresso in funzione della quantità di moto del fluido attraverso un coefficiente di drag C_d .

$$S_d = K_d \cdot F = K_d \left(\frac{1}{2} C_d A_d \cdot \rho V^2 \right) \quad (5)$$

In deflusso monofase il coefficiente C_d è una funzione del numero di Re e in un ristretto intervallo di questo risulta essere costante ($10^4 - 10^7$).

In bifase, a causa di asimmetrie del deflusso il coefficiente differisce da quello monofase (dipende dal regime di deflusso) e può essere correlato alla frazione di vuoto e alla portata areica G:

$$C_{dTP} = C_{dMP} \left(+ a \cdot \left(\frac{G}{G_0} \right) + b \cdot \left(\frac{G}{G_0} \right)^2 \right) \quad (6)$$

Un modello sufficientemente accurato per dedurre la quantità di moto della miscela bifase è il modello a due velocità. In tale modello la velocità della fase gassosa e la velocità della fase liquida vengono ipotizzate uniformi sulla sezione.

Il coefficiente C_d viene assunto pari a quello del caso monofase (o meglio come descritto nel paragrafo 6 pari a una media pesata tra i coefficienti monofase di liquido e gas).

L'equazione del modello diventa:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A_d \cdot \rho V^2 + \alpha \rho V^2 \quad (7)$$

Il drag è pertanto sensibile alla frazione di vuoto.

Il misuratore a bersaglio adottato è un RAMAPO Mark V con dimensione nominale 1" ($D_i = 21 \text{ mm}$) e bersaglio di tipo full-flow. Esso può operare con una pressione massima di esercizio di 300 bar e a una temperatura massima di 345°C.

L'intervallo di portate monofase misurabile dipende dalle dimensioni del bersaglio installato, ed in genere il rapporto tra la portata massima e quella minima è pari a 10.

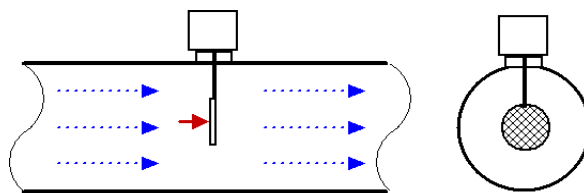
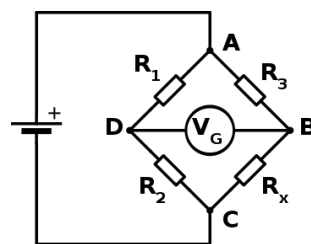


Fig. 2: Schema DRAG DISK

La misura della forza applicata sul bersaglio è realizzata con l'ausilio di uno *strain gauge*.

Un ponte di Wheatstone (Fig. 3) misura la variazione di resistenza R_x indotta dalle forze F applicate dal deflusso sul bersaglio. Le resistenze con $F=0$ sono riportate in Fig.3.



$R_1 = 265,1 \Omega$	$R_3 = 265,1 \Omega$
$R_2 = 264,8 \Omega$	$R_x = 264,8 \Omega$

Fig. 3: Ponte di Wheatstone e Valori di resistenza del ponte di Wheastone del DD con $F=0$

Caratteristiche (deflusso monofase acqua)	
HOFFER	
mod: HO 1X1-4-60-G-HT-MS	Overrange: 150% della massima portata (intermittente)
SN:17357	Linearità: $\pm 0,5\%$
Diametro: 1" nominale ($D_i = 22$ mm)	Range di Temperature: -270°C - 270°C (Standard) e fino a 450°C
N° palette : 5	Cadute di pressione: 4-5 psi (0,276 – 0.345 bar) alla portata massima lineare
Range lineare di misura di portata: 15-230 l/m	Materiale: 316/316L stainless steel
Range di ripetibilità: 8-285 l/m	Tratti di calma: 15,5 D (monte) e 5,8 D (valle)

Tabella 1 : Scheda tecnica Turbina Hoffer HO

Caratteristiche (deflusso monofase acqua)	
RAMAPO	
Type: Mark V	Range di portate: 5.4 – 54 Lt/min (acqua)
Materiali:	Range di pressione: 345 bar (massima)
- Sensing element: Inconel X-750	Range di temperature: -55°C - 345°C
- Housing: T304 S.S.	Force Factor (K): 0,595 V/V/Kg
Target: ACR-484 F (indica il diametro in millesimi di inch) $A_{\text{bersaglio}} = 1,187\text{cm}^2$	Tratti di calma: 18 D (monte) e 8,7 D (valle)

Tabella 2: Scheda tecnica Drag Disk Ramapo Mark V

3. DESCRIZIONE DEL CIRCUITO

3.1 Circuito di prova

La Fig. 4 rappresenta il circuito di prova della turbina e del drag disk

Il circuito di prova è costituito da un condotto orizzontale, avente lunghezza totale di 2050 mm, in cui si trovano in serie:

- Condotto aria
- Miscelatore ($D_i = 50$ mm, $L = 52$ mm)
- tratto in plexiglass ($D_i = 26$ mm, $L = 600$ mm)
- Spool Piece : Turbina e Drag con i relativi tratti di calma (vedi paragrafo 2).

Nel miscelatore, l'aria viene introdotta nella direzione assiale del condotto, mentre l'acqua è introdotta in direzione radiale con o senza l'ausilio di un bronzo poroso.

Viene misurata la pressione di ingresso dell'acqua nel miscelatore con un trasduttore di pressione assoluta Rosemount 3051/1.

A valle del tratto in plexiglass, che consente al deflusso di svilupparsi, è posto lo SP vero e proprio costituito da una turbina (Hoffer SN:17357) e da un Drag Disk (Ramapo MARK-V SN:31195) posti in serie in un condotto da 1" di diametro esterno, con un diametro interno $D_i = 21 \text{ mm}$ [Tabella 1 e Tabella 2].

La turbina è posta a valle di un tratto di calma pari a 345 mm (15,5 D) ed è seguita da un tratto di calma di 145 mm (circa 5,8 D). I tratti a monte e a valle del Drag sono invece rispettivamente di 450 mm (18 D) e 217 mm (8,7 D).

Il circuito opera a una pressione compresa tra la pressione atmosferica (scarico) e una pressione massima di 2,5 bar, a seconda delle condizioni di prova.

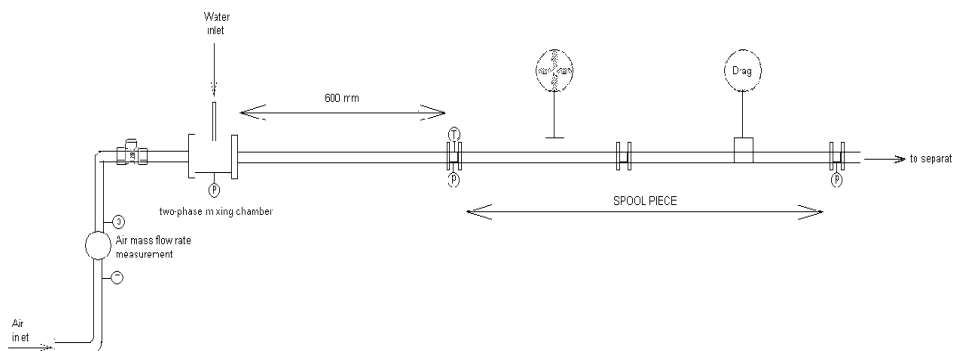


Fig. 4: Schema circuito di prova

3.2 Strumentazione del circuito di prova

La portata d'aria è misurata, all'ingresso del circuito di prova, con il rotametro (ASA E5 3000) la cui scala, quando il fluido si trova in condizioni standard ($p = 1.013 \text{ bar}$ e $T = 20^\circ\text{C}$) è compresa tra 6300 e 63000 NI/h.

La portata d'aria viene attualmente regolata strozzando la sezione di uscita del rotametro ASA; in questo modo si ha un controllo grossolano della portata e un valore di pressione all'interno dello strumento che varia con il grado di chiusura della valvola.

Vengono misurate le condizioni dell'aria all'interno dello strumento: la pressione attraverso un manometro e la temperatura con una termocoppia.

Per la descrizione della strumentazione dello SP si rimanda al paragrafo 2.

Le caratteristiche degli strumenti del circuito vengono riassunte in Tabella 3 e Tabella 4.

Rotametro

Denominazione	Simbolo	Valore	Unità di misura
ASA			
Tipo		E5 3000	
Matricola		121023	
Fluido		aria	
pressione	p	760	mmHg
Temper.	T	20	°C
Campo di misura	Q	6300-63000	NI/h

Tabella 3: Caratteristiche tecniche misuratore di portata del circuito di alimentazione aria

Trasduttore di pressione assoluta

Denominazione	Simbolo	Valore	Unità di misura
ROSEMOUNT			
Tipo		3051/1	
Campo di misura	p	0-10.3	bar
Output		4-20 (0-10)	mA (V)
Span	p	0.01-10.3	bar

Tabella 4: Caratteristiche tecniche trasduttore di pressione (ingresso acqua nel miscelatore)

3.3 Circuiti ausiliari di alimentazione

L'alimentazione dell'aria è assicurata dalla rete di servizio dell'aria compressa (pressione di circa 6 bar) e da un riduttore di pressione o attraverso un turbocompressore che fornisce il fluido a bassa pressione.

L'alimentazione dell'acqua è assicurata da un circuito (Fig. 5) costituito da una vasca, da due pompe esercite a numero di giri variabile, grazie all'impiego di un inverter, e da un collettore che distribuisce l'acqua ai circuiti di prova.

La portata d'acqua può essere ottenuta dal circuito ausiliario sia utilizzando le pompe sia utilizzando il battente costante della vasca.

Il condotto di collegamento tra il circuito di alimentazione e il miscelatore ha un diametro di 3/8".

La portata di liquido viene misurata mediante un misuratore elettromagnetico (ASA AW6 – 2900/1/B/1/AA).

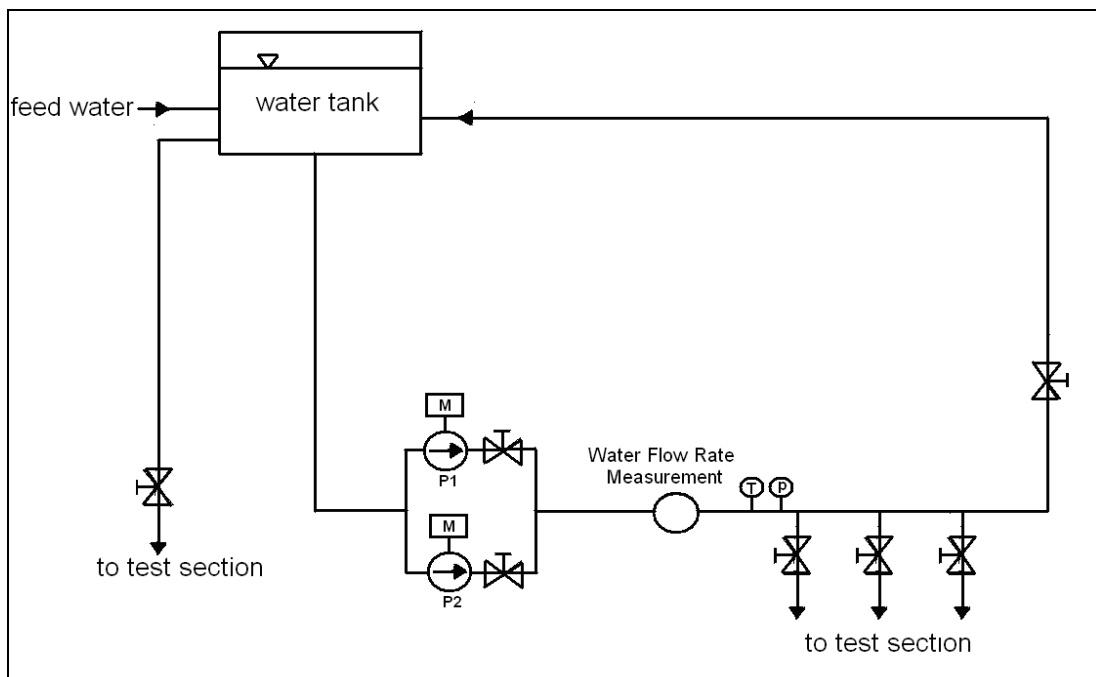


Fig. 5: Schema circuito di alimentazione dell'acqua

Le caratteristiche degli strumenti di misura dei circuiti ausiliari vengono riassunte nelle tabelle seguenti.

Pompa I acqua

Denominazione	Simbolo	Valore	Unità di misura
WILO—WERK			
Tipo		NH 32/160,1 -2.9/2	
Anno costruzione		1989-02	
Matricola		500784	
SN		1680090	
Portata	Q	6	m ³ /h
Portata		1,67	litri/s
Prevalenza	H	38,6	m
Numero di giri	n	2900	G/minuto
Potenza	P	2,2	kW
Temperatura	t	160	°C

Tabella 5: Caratteristiche tecniche pompa I circuito di alimentazione acqua

Pompa II acqua

Denominazione	Simbolo	valore	Unità di misura
WILO-WERK			
Tipo		NH 32/125-1.5/2	
Anno costruzione		1989-07	
matricola		500768	
SN		1680187	
Portata	Q	2	m ³ /h
Portata		0,55	litri/s
Prevalenza	H	22	m
Numero di giri	n	2900	G/minuto
Potenza	P	1,5	kW
Temperatura	t	160	°C

Tabella 6: Caratteristiche tecniche pompa II circuito di alimentazione acqua

Misuratore elettromagnetico

Denominazione	Simbolo	Valore	Unità di misura
ASAMAG			
Tipo		AW6 – 2900/1/B/1/AA	
SN		M0H000095	
Campo di misura	V	0,3-12	m/s
precisione		± 0,5% v.l	
Ripetibilità		± 0,1% v.l.	
Pressione massima	p	25	bar
Temperatura	T	-10:75	°C
Alimentazione		88-250 Vca 50/60 Hz 11,5 W	

Tabella 7: Caratteristiche tecniche misuratore elettromagnetico

3.4 Sistema di acquisizione dati

La catena che costituisce il sistema di acquisizione dati è costituita dai seguenti elementi:

1. generazione fisica del segnale,
2. trasduttore che converte il segnale fisico in un segnale elettrico (tensione),
4. scheda di acquisizione dati che converte il segnale analogico in ingresso in un segnale digitale,
5. computer dotato di software dedicato che controlla il sistema di acquisizione dati, analizza i dati acquisiti e presenta i risultati elaborati.

I segnali inviati dagli strumenti di misura vengono acquisiti con la scheda di acquisizione DAQ National Instrument NI USB-6218 in ambiente LabView®.

4. DEFLUSSO MONOFASE: MATRICE SPERIMENTALE E PROCEDURA DI PROVA

Gli strumenti adottati, convenzionalmente utilizzati per deflussi monofase, vengono qualificati eseguendo una verifica delle curve di calibrazione relative al deflusso monofase di acqua. Sono state effettuate anche una serie di misure con deflusso monofase di aria.

Nell'impiego con un deflusso bifase è infatti fondamentale conoscere i coefficienti di proporzionalità, tra i segnali degli strumenti e le grandezze correlate, e le differenze rispetto al deflusso monofase liquido.

La velocità del fluido, nel deflusso monofase, può essere ricavata considerando la sezione di passaggio del condotto avente un diametro interno di 21 mm:

$$A_{pipe} = 3,46cm^2$$

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_{pipe}}$$

La conoscenza del campo di velocità è di fondamentale importanza per la valutazione dei segnali degli strumenti.

Per effettuare l'analisi degli strumenti nel caso di deflusso monofase di acqua, il liquido viene introdotto nel miscelatore attraverso un *pipe* di 3/8" connesso con il circuito di alimentazione dell'acqua (Fig. 4 e Fig. 5). La portata d'acqua viene variata, modificando il numero di giri della pompa e misurata attraverso il misuratore elettromagnetico ASAMAG (dati tecnici paragrafo 3.3).

La taratura con deflusso d'aria viene eseguita chiudendo la valvola lato acqua. La portata di aria viene gradualmente aumentata da 6300 a 35000 NI/h nominali.

Vengono inoltre misurate la pressione e la temperatura dell'aria all'interno del rotometro. Questa misura consente di correggere il valore della portata volumetrica tenendo conto delle condizioni in cui si trova l'aria.

Analizzando i valori di temperatura attraverso la termocoppia si è visto che questa grandezza rimane costante a un valore di 22°C.

Si ricava quindi la variazione della densità dell'aria in funzione di temperatura e pressione (pressione che varia per ogni portata volumetrica registrata dall'esometro).

In condizioni standard ($p = 1,013$ bar, $T = 20$ °C) la densità dell'aria risulta essere pari a $1,18$ kg/m³.

La portata volumetrica letta nell'asometro, viene espressa in NI/h tenendo conto delle effettive condizioni attraverso la seguente formula:

$$Q_g(\phi_0, T_0) \cong Q_{ASA}(\phi, T) \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T}} \cdot \sqrt{\frac{p}{p_0}} \quad (8)$$

Per ricavare la portata massica si deve moltiplicare per la densità ottenendo:

$$m_g = Q_g(\phi_0, T_0) \cdot \rho_g(\phi_0, T_0) \quad (9)$$

Occorre sottolineare che le pressioni all'interno del rotometro sono sensibilmente superiori a quelle del circuito. La pressione media a cui si trova il circuito, e alla quale vengono calcolate le proprietà dell'aria viene considerata la pressione media tra la sezione di ingresso

acqua e la pressione atmosferica (pressione all'uscita). Si ottengono così le portate volumetriche d'aria effettive.

Nell'ambito delle pressioni che si instaurano nel circuito durante le prove, la densità dell'aria è stata calcolata come:

$$\frac{p}{\rho} = R^* T \quad (10)$$

Serie 1: Deflussi Monofase			
ACQUA			
Wacqua [kg/s]	p ingresso miscelat. [bar]	v [m/s]	Re
0.138	1.06	0.399	8387
0.196	1.07	0.565	11873
0.258	1.08	0.746	15663
0.286	1.12	0.827	17364
0.319	1.18	0.922	19368
0.349	1.23	1.006	21136
0.399	1.34	1.151	24168
0.433	1.42	1.250	26240
0.458	1.47	1.321	27738
0.502	1.6	1.450	30450
ARIA			
Waria [kg/s]	p assoluta rotometro [bar]	v [m/s]	Re
0.00521	6.2	12.71	14046
0.00785	5.6	19.17	21189
0.01091	4.8	26.62	29426
0.01242	3.5	30.31	33503
0.01388	2.8	33.89	37458
0.01372	1.9	33.50	37027
0.01374	1.4	33.55	37081

Tabella 8: Matrice sperimentale Serie 1: deflusso monofase

NOTA: i numeri di Reynolds sono stati calcolati considerando una viscosità dinamica costante per i due deflussi:

Acqua $\mu = 1 \cdot 10^{-3}$ [Pa·s]

Aria $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$ [Pa·s]

5. DEFLUSSO MONOFASE: ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

5.1 Deflusso monofase acqua: Calibrazione Drag

La legge che lega il segnale di output del drag e il moto del fluido è l'equazione che esprime la forza che il fluido cede al bersaglio del drag in funzione della quantità di moto del fluido (QdM); ovvero il segnale è linearmente proporzionale a questa.

Lo scopo della taratura monofase è determinare quale proporzionalità esiste tra la QdM e il segnale elettrico, ovvero il prodotto $K_d \cdot C_d$.

Introducendo nell'equazione i parametri geometrici ($A_{bersaglio} = 1,182\text{cm}^2$, $A_{pipe} = 3,46\text{cm}^2$), ricavando dai valori di velocità, riportati in Tabella 8 (matrice sperimentale), la quantità di moto associata a ogni segnale di output del Drag:

$$QdM = \rho_l \cdot (V_l)^2 \quad (11)$$

e considerando la densità dell'acqua costante e pari a 999 kg/m^3 si ha:

Matrice sperimentale					Segnale strumento	Analisi segnale
W_{acqua} [kg/s]	p [bar]	Q [l/h]	V [m/s]	$\rho \cdot V^2$ [kg/ms ²]	Sd [V]	$K_d \cdot C_d$ [-]
0.1382	1.06	498	0.399	159.4	0.23	24.3
0.1956	1.07	705	0.565	319.4	0.46	24.3
0.2581	1.08	930	0.746	555.7	0.83	25.2
0.2861	1.12	1031	0.827	683.0	1.03	25.4
0.3191	1.18	1150	0.922	849.8	1.29	25.6
0.3483	1.23	1255	1.006	1012.0	1.54	25.6
0.3982	1.34	1435	1.151	1323.1	2.05	26.1
0.4323	1.42	1558	1.25	1559.7	2.39	25.8
0.4570	1.47	1647	1.321	1743.0	2.66	25.7
0.5017	1.6	1808	1.45	2100.4	3.25	26.1

Tabella 9: Analisi Segnale del Drag in deflusso monofase acqua

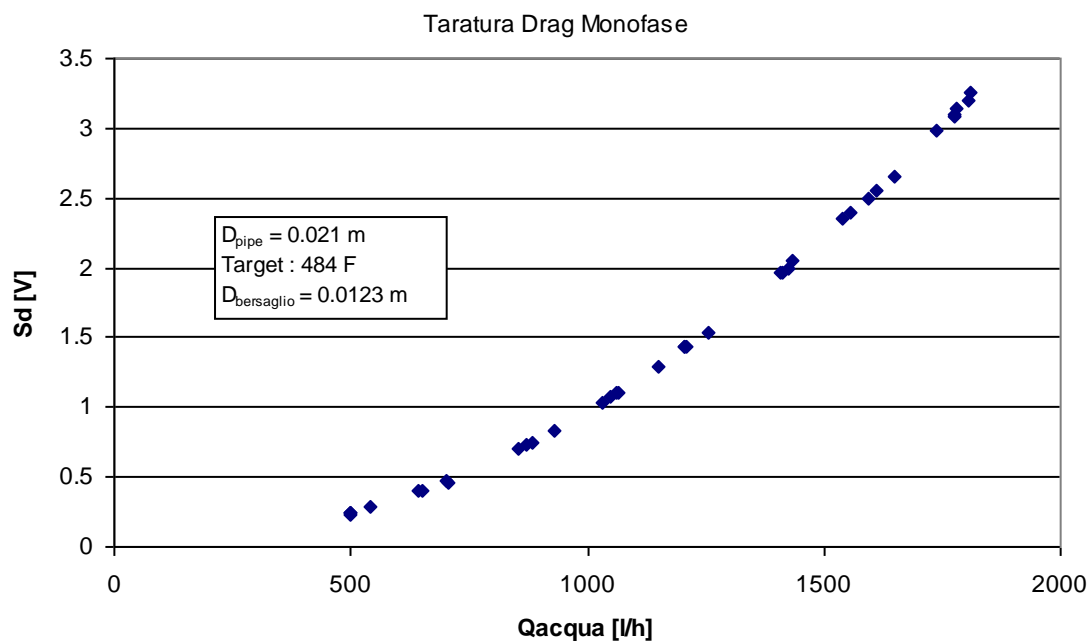


Fig. 6: Segnale di output del Drag Disk in funzione della portata di acqua

La curva di Fig. 6, che riporta i dati sperimentali (dove le portate sono espresse il l/h e i segnali elettrici in Volt), risulta essere perfettamente parabolica, in accordo con le equazioni teoriche che descrivono il principio di funzionamento del drag disk.

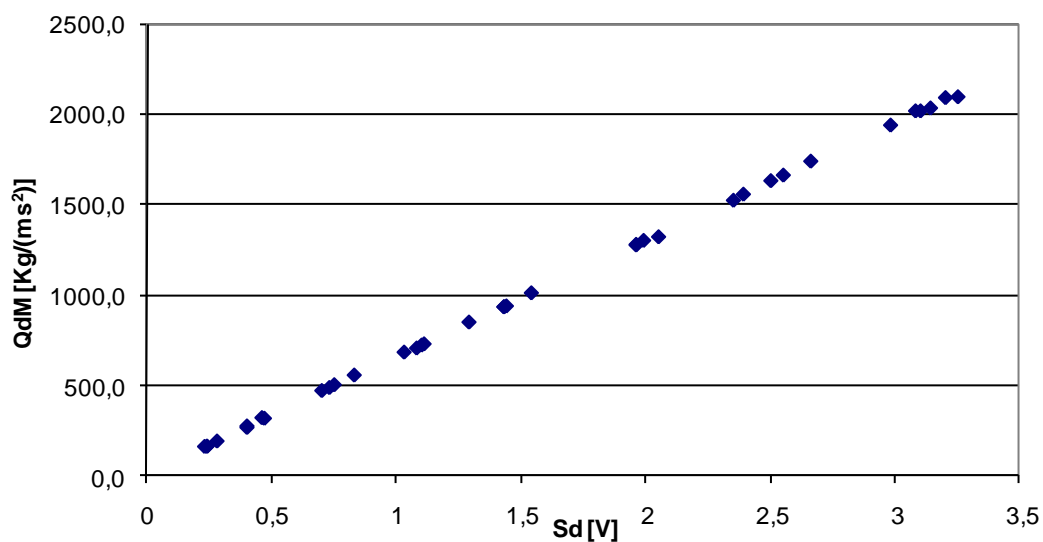


Fig. 7: Quantità di moto del deflusso monofase acqua in funzione del segnale del Drag Disk

Rielaborando i dati e esprimendo il segnale di output del drag in funzione della quantità di moto del fluido si ottiene la curva lineare riportata in Fig. 7.

5.2 Deflusso monofase acqua: Calibrazione Turbina

Con riferimento alla matrice sperimentale di Tabella 8 il segnale elettrico fornito dalla turbina è riportato in Fig. 8.

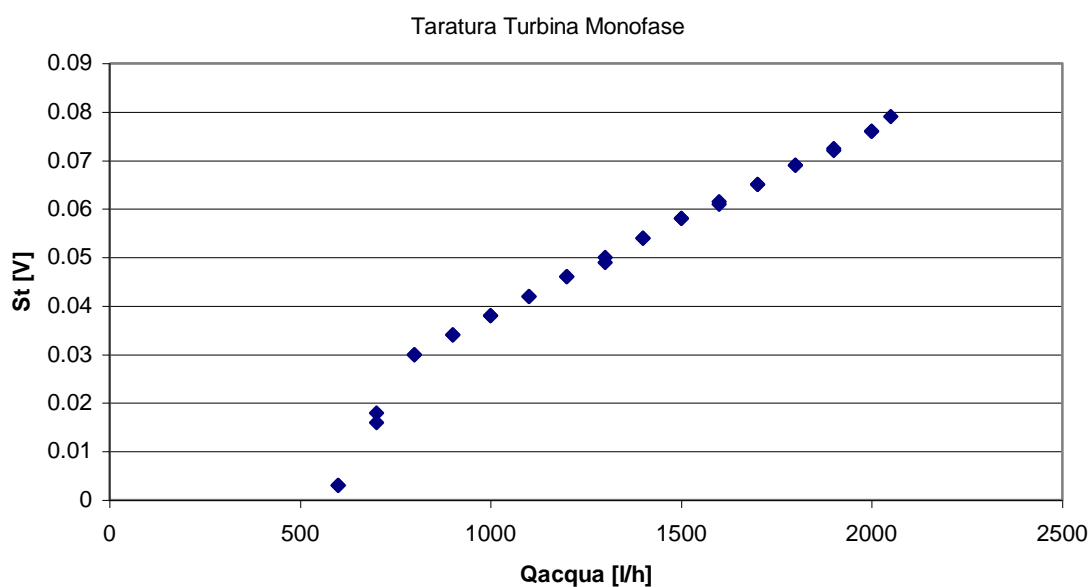


Fig. 8: Segnale di output della turbina in funzione della portata di acqua

Il misuratore volumetrico risulta avere un andamento lineare in funzione della portata volumetrica della turbina per portate maggiori di 800 l/h.

Utilizzando le leggi che descrivono il funzionamento misuratore volumetrico (equazioni 3 e 4) e ricordando che il segnale di output, registrato dal LabView® e espresso in Volt, viene convertito in Hz moltiplicando per 1000 Hz/V, si ricava il coefficiente di calibrazione monofase della turbina in deflusso di acqua.

Le prove forniscono nel range di portate sperimentato (Range Lineare) un valore medio del parametro K_t costante e pari a 0,0382 Hz/(l/h).

5.3 Deflusso monofase aria: Calibrazione Drag

Per la calibrazione del drag in deflusso monofase di aria si fa riferimento alla matrice sperimentale riportata in Tabella 8.

Vengono calcolate la portata in massa e la portata volumetrica effettiva, come descritto nella procedura di prova del paragrafo 4.

Il segnale di output del drag in funzione della portata volumetrica effettiva è riportato in Fig. 9.

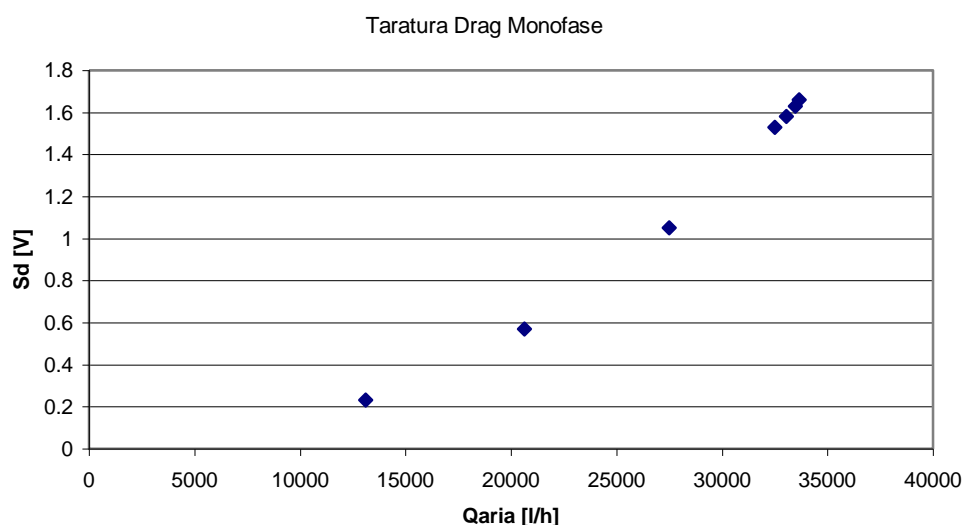


Fig. 9: Segnale di output del Drag Disk in funzione della portata volumetrica di aria

I segnali del Drag risultano essere consistenti con il modello dello strumento.

Sebbene il *range* di portate sperimentato sia superiore a quello di applicabilità del drag, la quantità di moto che l'aria esercita sul disco è dello stesso ordine di grandezza di quella che esercita l'acqua; è quindi verificato che, seppure lo strumento sia stato sviluppato per misurare deflussi di liquidi, può essere considerato affidabile anche per misure di portata di fluidi gassosi.

5.4 Deflusso monofase aria: Calibrazione Turbina

Il range di funzionamento della turbina è compreso tra 900 e 9000 l/h. Nel deflusso monofase aria la portata volumetrica varia tra 10000 e 35000 l/h, e lo strumento non lavora

quindi in condizioni ottimali. Gli elevati valori di velocità si traducono in un funzionamento non stazionario dello strumento in corrispondenza di un dato valore di portata. Si osservano infatti velocità del rotore non costanti: la velocità di rotazione dopo essersi mantenuta costante per un certo intervallo crolla a valori prossimi allo zero, come riportato nella Fig. 10.

Tenendo conto di questo tipo di funzionamento vengono riportati i valori massimi del segnale per ogni portata. Nel grafico di Fig. 11, si vede che con questo “filtraggio” del segnale la relazione tra velocità del fluido e frequenza di rotazione mantiene un andamento lineare anche con deflusso di aria.

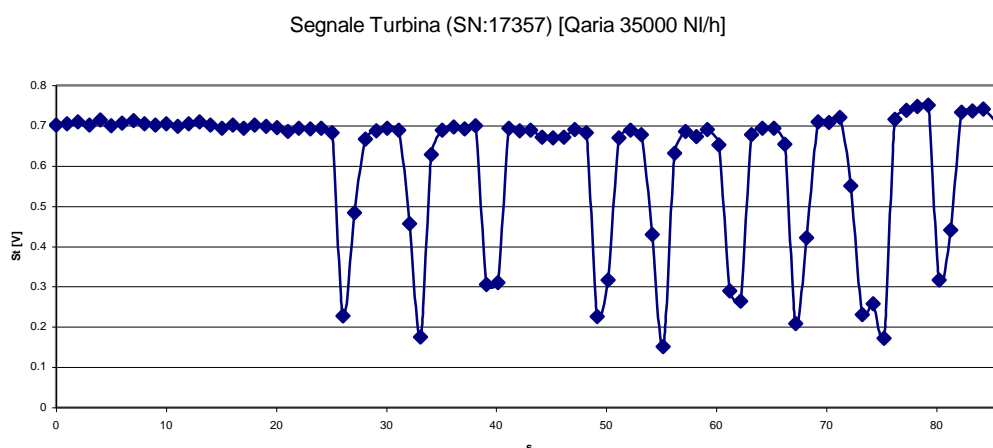


Fig. 10: Variazione temporale del segnale della turbina in deflusso monofase aria

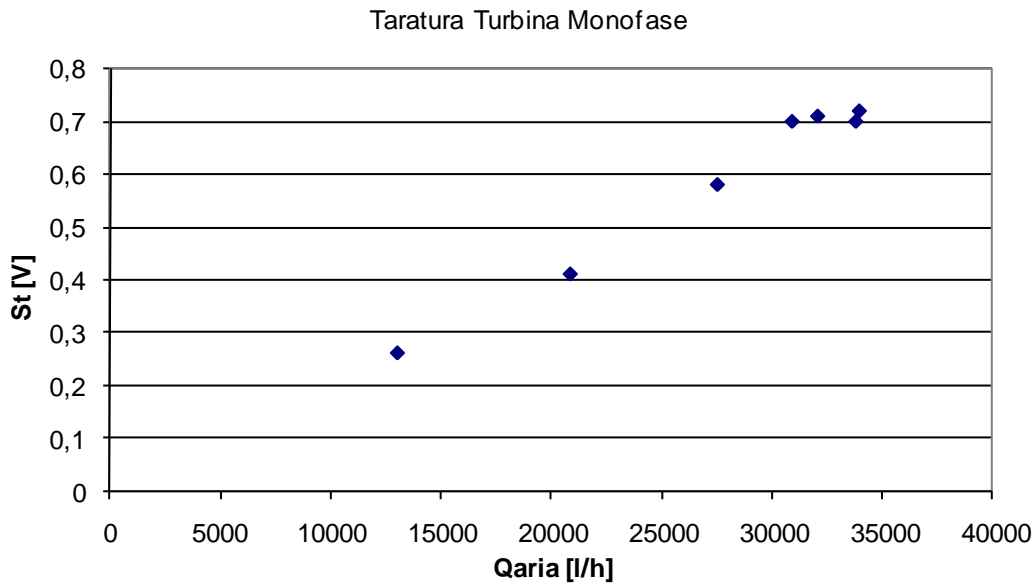


Fig. 11: Segnale di output della turbina in funzione della portata volumetrica di aria

La Fig. 11 mostra che il segnale della turbina è lineare per portate d'aria comprese tra 10000 e 33000 l/h, al di sopra di questo *range* il segnale di output non risulta essere proporzionale alla portata volumetrica.

Le prove forniscono nel *range* di portata sperimentato un valore medio del parametro K_t costante e pari a circa 0,02 Hz/(l/h).

5.5 Deflusso monofase: Confronto tra i coefficienti di calibrazione aria/acqua

Confrontando i due deflussi monofase, si conclude che nel range di portate analizzato il coefficiente di calibrazione è uguale per i deflussi monofase di aria e di acqua (Fig. 12).

Poiché il bersaglio utilizzato è caratterizzato da un fattore di forza di 0.595 mV/V/kg, il coefficiente C_d risulta pari a 421 mV/V.

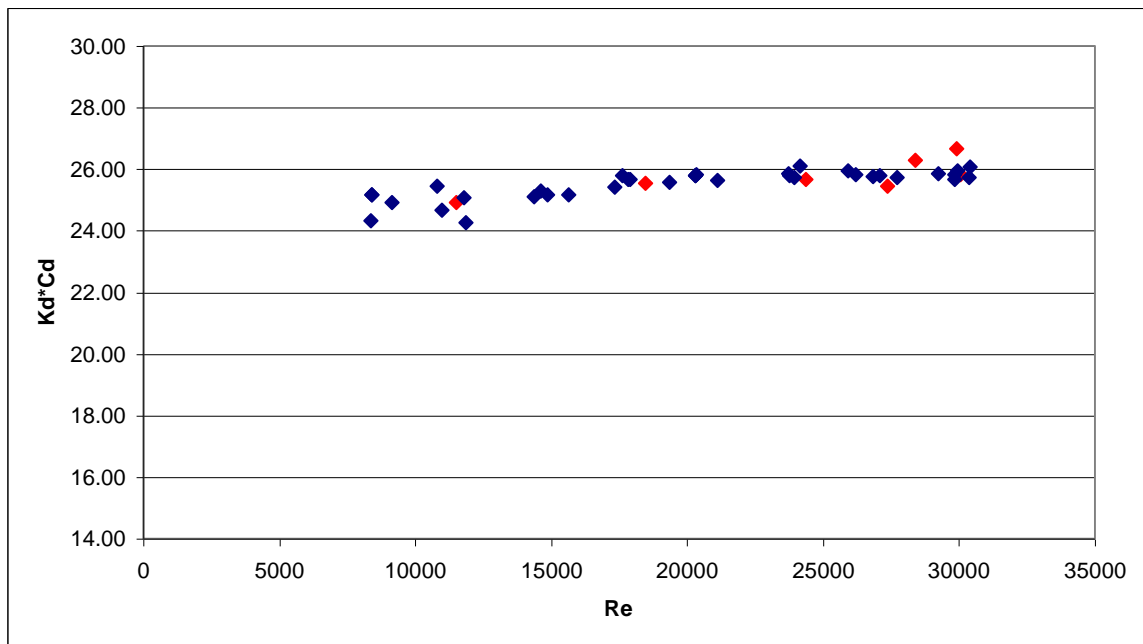


Fig. 12: Coefficiente di calibrazione drag in funzione del numero di Re per deflusso monofase

Per quanto riguarda la turbina, si evidenzia una notevole differenza tra deflusso monofase liquido e gassoso, dovuto ai differenti campi di velocità.

Il fattore K_t per l'aria è inferiore al fattore K_t per deflusso di acqua a parità di numero di Reynolds, a causa, probabilmente, della maggiore coppia resistente che si ha nella turbina all'interno del campo di velocità dell'aria sperimentato.

L'utilizzo del fattore di proporzionalità monofase nel caso di deflusso bifase risulta essere maggiormente problematico che rispetto al drag.

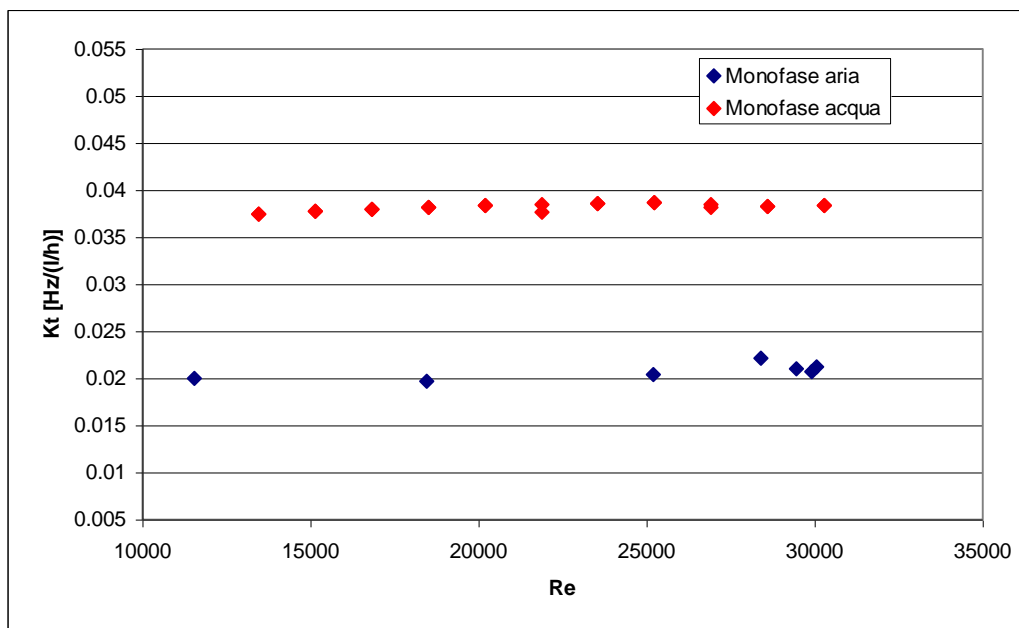


Fig. 13 : Coefficiente calibrazione Turbina in funzione del numero di Re per deflusso monofase

6. DEFLUSSO BIFASE: DATI SPERIMENTALI E ANALISI DEI RISULTATI

6.1 Matrice Sperimentale e Procedura di prova

Le procedure di prova adottate nello studio del deflusso bifase sono state due: nel primo set di misure per definite portate d'aria si è variata parametricamente la portata d'acqua (vedi Tabella 10); mentre nel secondo set di misure per definite portate d'acqua si è variata parametricamente la portata d'aria (vedi Tabella 11).

Set 1: Deflussi bifase con variazione W_{acqua} a W_{aria} costante

W_{aria} [kg/s]	W_{acqua} [kg/s]	p ing. aria [bar]	p ing. acqua [bar]	Temperatura [° C]
0.0052	0.0942	6.3	1.18	22
0.0052	0.1722	6.3	1.4	22
0.0052	0.2492	6.3	1.68	22
0.0052	0.3036	6.3	1.9	22
0.0080	0.0703	5.9	1.26	22
0.0080	0.1528	5.9	1.54	22
0.0080	0.2236	5.9	1.85	22
0.0080	0.2500	5.9	1.95	22
0.0109	0.0556	4.8	1.3	22
0.0109	0.1111	4.8	1.58	22
0.0109	0.1625	4.8	1.82	22
0.0109	0.1944	4.8	1.96	22
0.0109	0.2297	4.8	2.16	22
0.0122	0.0889	3.4	1.62	22
0.0122	0.1481	3.4	1.89	22
0.0122	0.1994	3.4	2.14	22
0.0130	0.1072	2.45	1.75	22
0.0130	0.1603	2.45	2	22
0.0130	0.2031	2.45	2.27	22
0.0122	0.1167	1.5	1.74	22

0.0122	0.1778	1.5	2.13	22
0.0122	0.2222	1.5	2.36	22
0.0078	0.0839	5.8	1.3	22
0.0078	0.1375	5.8	1.47	22
0.0078	0.1961	5.8	1.7	22
0.0078	0.2483	5.8	1.95	22
0.0097	0.0875	5.3	1.4	22
0.0097	0.1389	5.3	1.6	22
0.0097	0.1914	5.3	1.86	22
0.0097	0.2539	5.3	2.16	22
0.0115	0.0853	4.3	1.5	22
0.0115	0.1444	4.3	1.83	22
0.0115	0.1972	4.3	2.06	22
0.0115	0.2697	4.3	2.46	22
0.0128	0.0744	3.2	1.59	22
0.0128	0.1472	3.2	1.91	22
0.0128	0.2003	3.2	2.14	22
0.0128	0.2422	3.2	2.48	22
0.0130	0.0853	2.2	1.58	22
0.0130	0.1308	2.2	1.88	22
0.0130	0.2008	2.2	2.22	22

Tabella 10: Matrice sperimentale Set 1: deflusso bifase

Set 2: Deflussi bifase con variazione W_{aria} a W_{acqua} costante

W_{aria} [kg/s]	W_{acqua} [kg/s]	p ing. aria [bar]	p ing. acqua [bar]	Temperatura [° C]
0.0051	0.1306	6.1	1.27	22
0.0080	0.1322	6	1.44	22
0.0109	0.1322	5	1.7	22
0.0127	0.1314	3.8	1.76	22
0.0126	0.1375	2.4	1.9	22
0.0124	0.1322	1.6	1.82	22
0.0052	0.1947	6.4	1.51	22
0.0078	0.1972	5.8	1.7	22

0.0107	0.1947	4.8	1.94	22
0.0124	0.1956	3.6	2.17	22
0.0134	0.1942	2.7	2.17	22
0.0052	0.2506	6.4	1.65	22
0.0077	0.2519	5.6	1.98	22
0.0107	0.2511	4.8	2.25	22
0.0120	0.2381	3.4	2.47	22
0.0051	0.3036	6.2	1.86	22
0.0077	0.3042	5.6	2.2	22
0.0107	0.3000	4.8	2.53	22

Tabella 11: Matrice sperimentale Set 2: deflusso bifase

I valori di titoli realizzati:

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_{tot}} \quad (12)$$

sono riportati in Fig. 14.

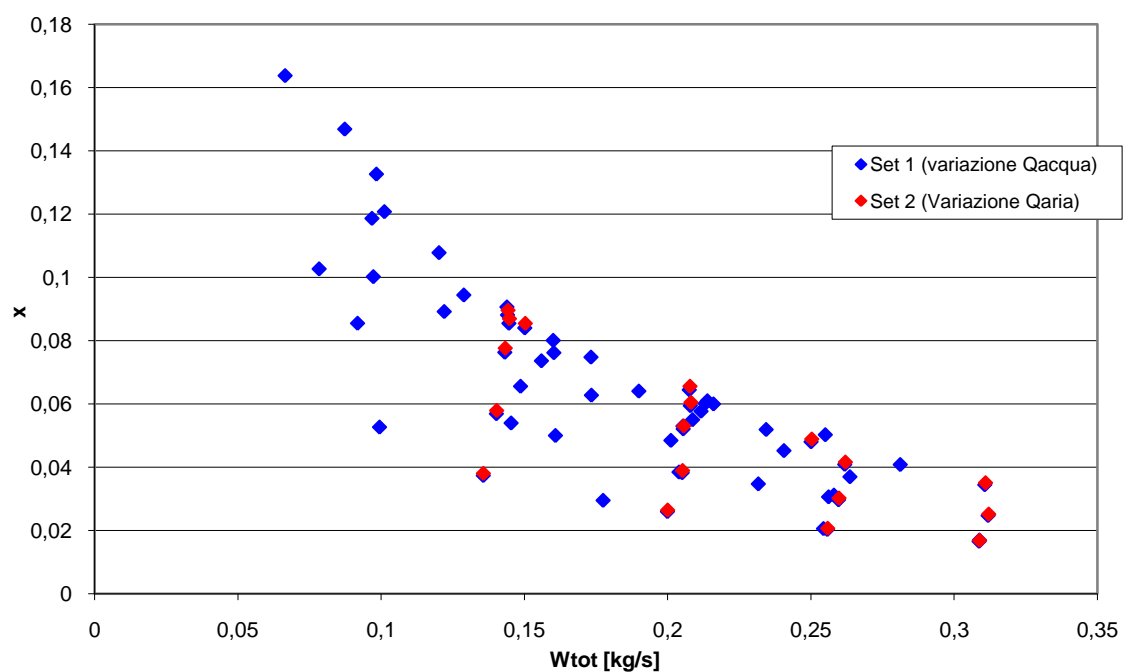
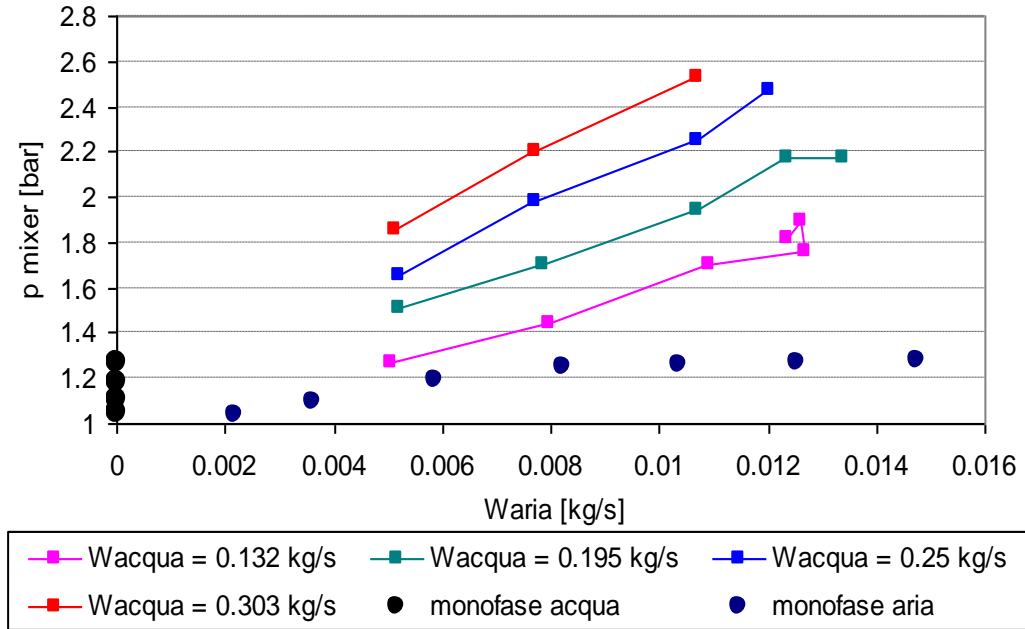
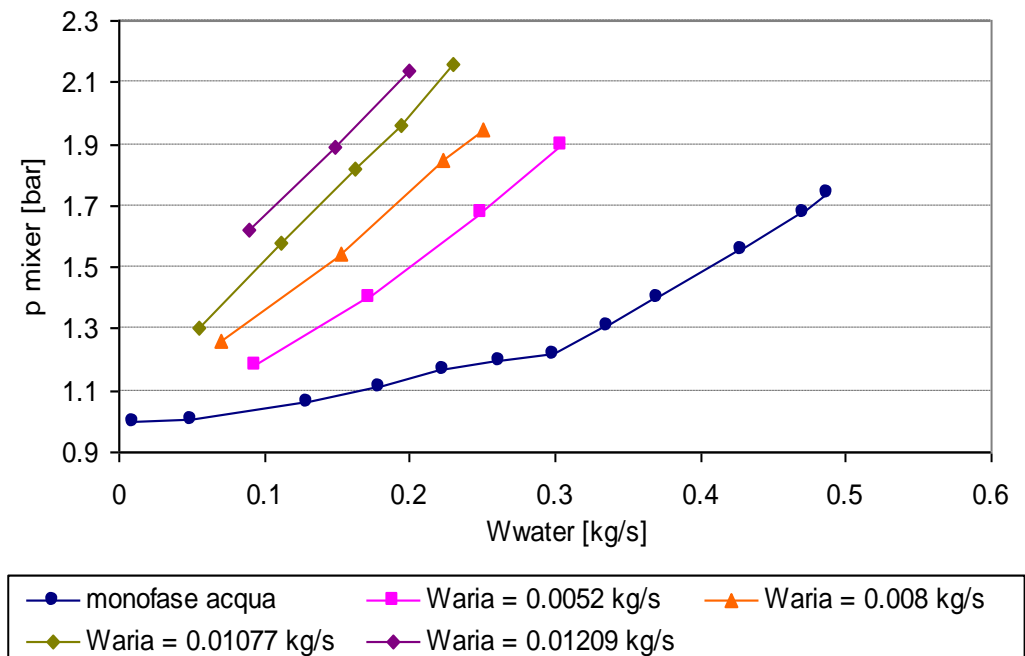


Fig. 14: Campo di portate e titoli analizzati



(a)



(b)

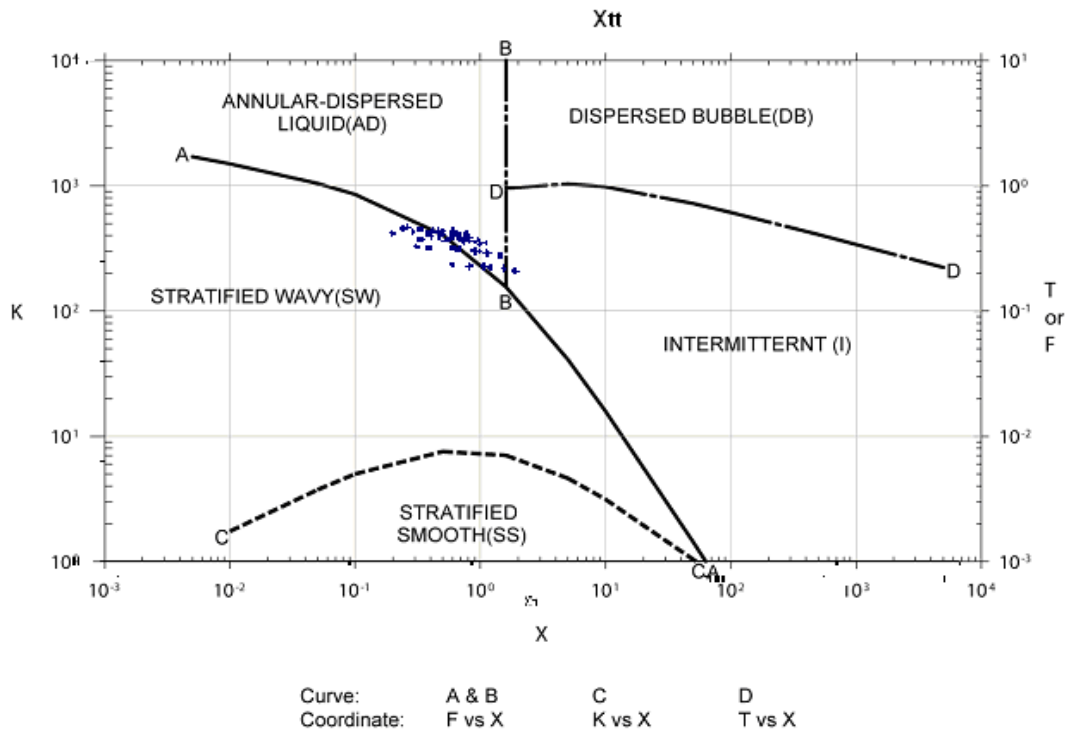
Fig. 15: Variazione della pressione media del circuito al variare delle portate di aria e acqua

I flow pattern definiti visivamente nella *test section* a monte dello SP sono stati i seguenti:

$W_{aria} \leq 0.0109$ kg/s: stratificato intermittente

$W_{aria} > 0.0109$ kg/s: anulare/ anulare intermittente (wavy).

Come previsto per i valori di portate utilizzati dalla mappa di deflusso di Taitel e Dukler.



$$T = \left[\frac{|(dp/dz)_{SL}|}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \theta} \right]^{1/2} \quad K = F \left(\frac{D u_{SL}}{v_L} \right)^{1/2} = F Re_{SL}^{1/2} \quad F = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \frac{u_{SG}}{\sqrt{D g \cos \theta}}$$

Fig. 16: Mappa di Taitel e Dukler: Regimi di deflusso sperimentati

6.2 Risultati sperimentali Spool Piece in deflusso bifase

Le prove effettuate con la miscela aria-acqua vengono eseguite iniettando l'acqua nel miscelatore come descritto precedentemente. Nella configurazione adottata il tipo di *flow-pattern* che si instaura, con le portate e le velocità utilizzate, risulta essere stratificato per portate d'aria e acqua basse, mentre al crescere di queste si instaura un deflusso anulare.

Inoltre il deflusso ha natura pulsata, come si evince dagli andamenti temporali degli strumenti (di cui si riporta un esempio in Fig. 17), è di ciò bisogna tener conto nell'analisi dei risultati.

Sono stati eseguiti due set di prove:

- Q_{aria} costante con variazione di Q_{acqua}
- Q_{acqua} costante con variazione di Q_{aria} .

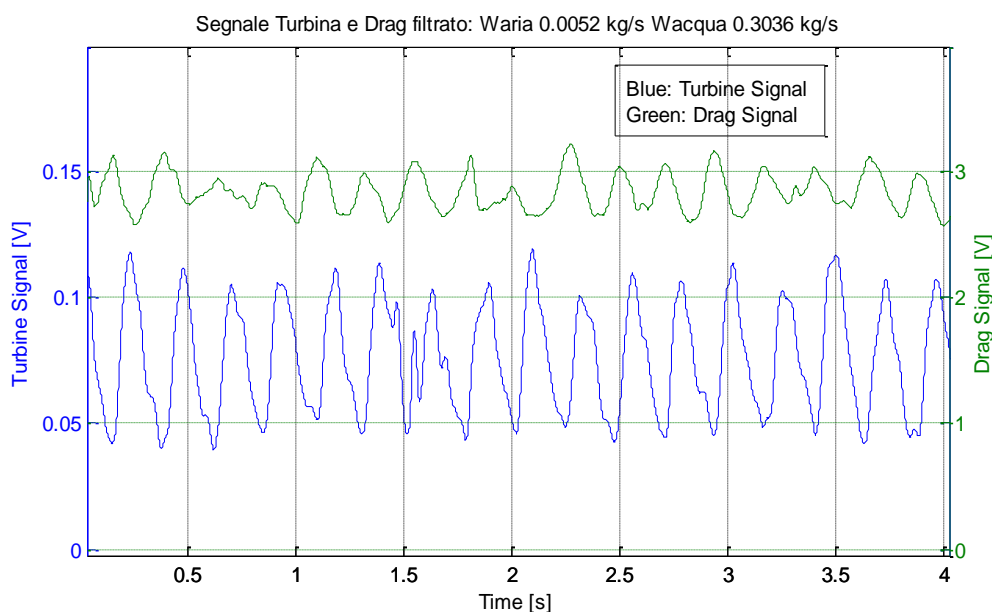


Fig. 17: Andamento temporale dei segnali elettrici degli strumenti in deflusso bifase

In Fig. 18 e Fig. 19 vengono presentati gli andamenti dei segnali elettrici associati alla turbina e al misuratore a bersaglio in funzione delle portate di aria e acqua sperimentate. Si ricorda

che, da un punto di vista fisico, i segnali di turbina e drag sono proporzionali rispettivamente alla velocità di rotazione della turbina e alla forza esercitata dal miscela sul bersaglio.

Si osserva che, fissata la portata di aria, al crescere della portata d'acqua, nell'intervallo sperimentato, la velocità di rotazione della turbina diminuisce. Questo effetto è significativo per portate d'aria maggiori di 0.0096 kg/s, avendosi in queste condizioni una significativa variazione della portata volumetrica. Per portate d'aria inferiori, i risultati sperimentali mettono in evidenza un comportamento, in prima approssimazione, attribuibile a un deflusso con portata volumetrica circa costante o lievemente crescente.

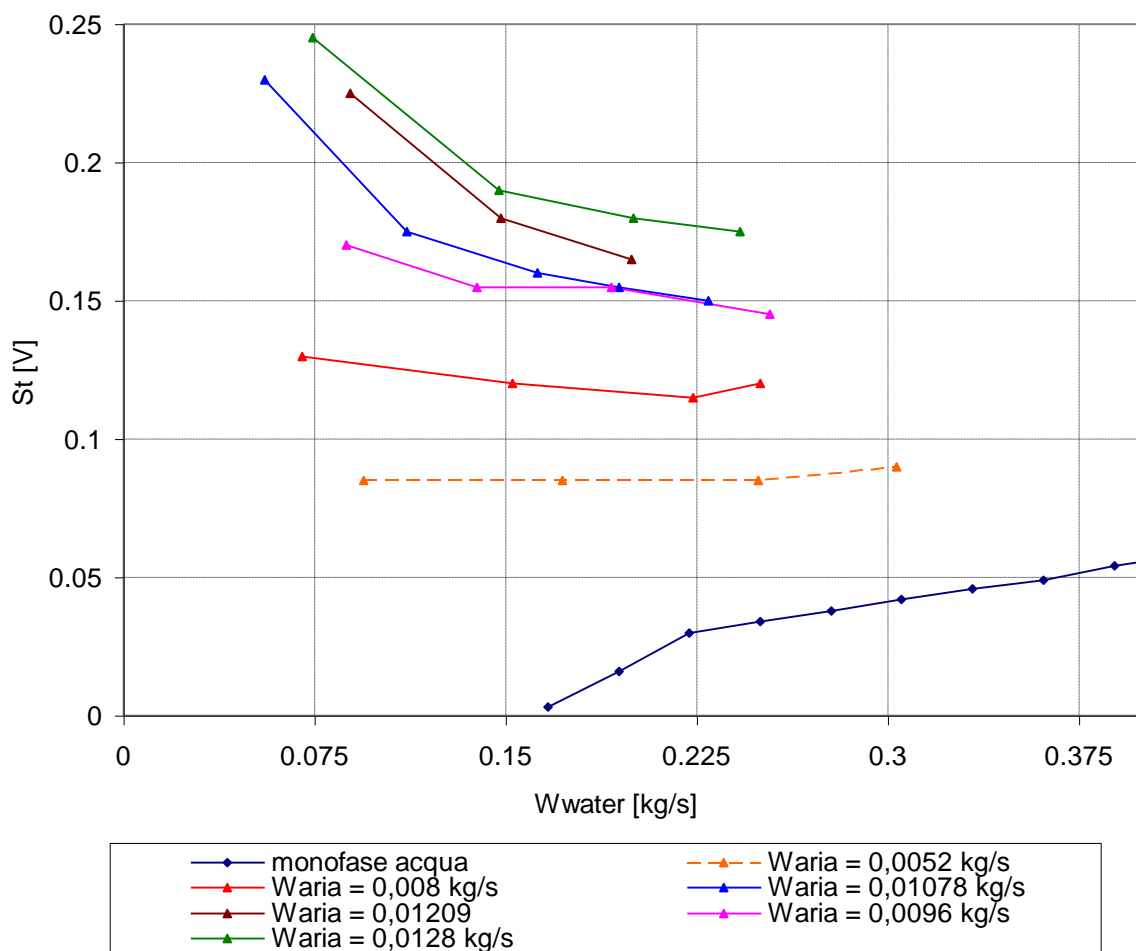


Fig. 18: Segnale elettrico Turbina in funzione della portata in deflusso bifase

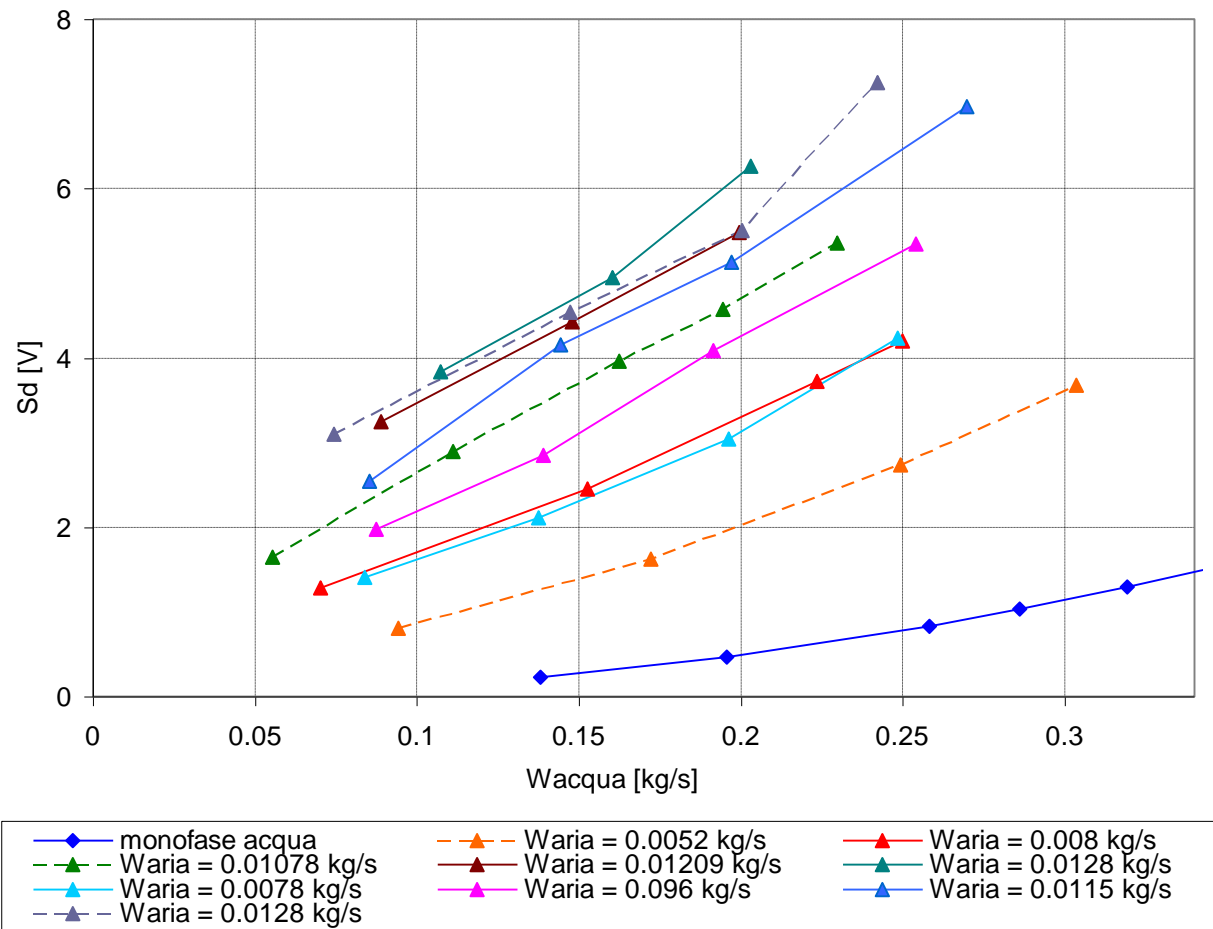


Fig. 19: Segnale elettrico Drag in funzione della portata massica di acqua in deflusso bifase.

In Fig. 19, è riportato il segnale elettrico del drag in funzione della portata d'acqua e parametrizzato in funzione della portata d'aria. Si osserva che la forza, e quindi la quantità di moto che il fluido trasferisce al bersaglio, aumenta con la portata di liquido e in modo più significativo al crescere della portata d'aria. Ciò si può giustificare con l'aumento della velocità del liquido che viene trascinato dalla corrente gassosa.

6.3 Analisi dei risultati

Nelle condizioni di prova, lo SP fornisce i due segnali relativi al drag e alla turbina; si vuole verificare che questi strumenti convenzionali per misure in monofase, possano essere utilizzati nelle misure di portate bifase.

Poiché il problema è costituito da un numero di incognite maggiore del numero di equazioni date dagli strumenti occorre introdurre un modello che consenta di definire un sistema avente un numero adeguato di equazioni.

Ovvero occorre definire un modello che supplisca all'assenza del misuratore di densità / grado di vuoto.

In prima analisi i segnali forniti dagli strumenti vengono elaborati utilizzando i coefficienti di taratura monofase; vengono riportati i valori ottenuti utilizzando i coefficienti relativi al deflusso di aria e di acqua rispettivamente in modo da verificare quale modello sia più corretto.

Vengono calcolate le densità della miscela viste dai due strumenti secondo la procedura seguente:

- densità vista dal drag:

$$S_d = K_d \cdot F = K_d \left(\frac{1}{2} C_d A_d \cdot \rho V^2 \right) \quad (13)$$

$$\text{con } V^2 = \left(\frac{W_{tot}}{A\rho} \right)^2$$

Sostituendo e invertendo la formula si ottiene:

$$\rho_d = \frac{K_d}{S_d} \left(\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_d \right) \left(\frac{W_{tot}^2}{A^2} \right) \quad (14)$$

- densità vista dalla turbina:

$$S_t = K_t \cdot Q$$

Esprimendo la portata volumetrica in funzione della velocità media del fluido:

$$S_t = K_t \cdot A \cdot V \quad (15)$$

$$\rho_t = \frac{W_{tot}}{A \cdot V} \quad (16)$$

Le densità “viste” dagli strumenti calcolate con i diversi coefficienti di calibrazione monofase vengono riportati in Fig. 20.

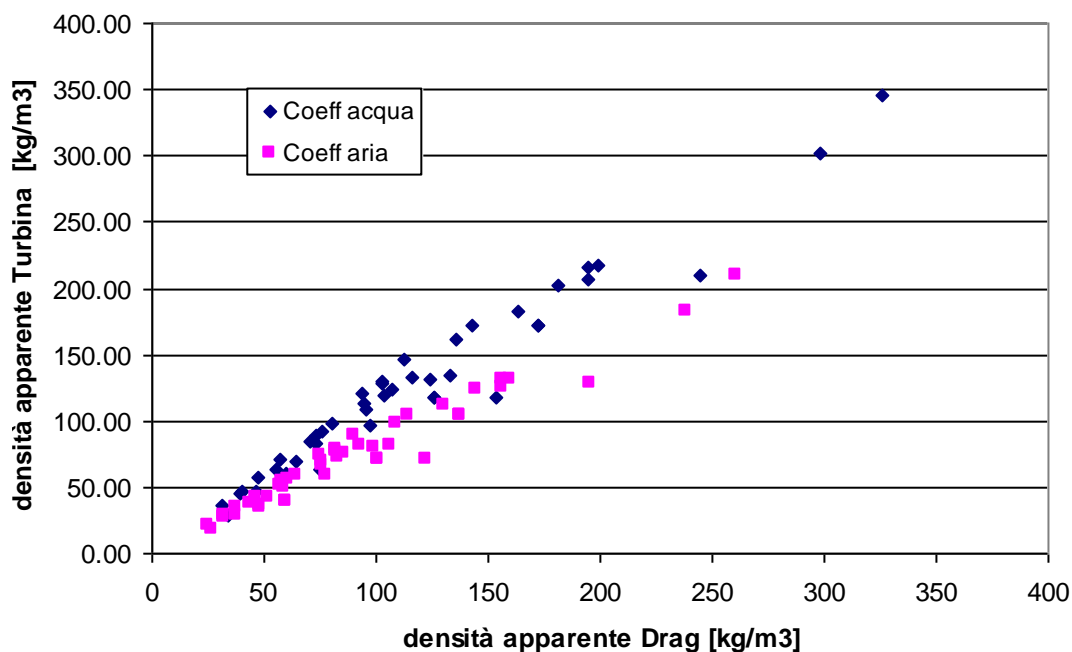


Fig. 20: Densità apparente “vista” dal DD in funzione della densità apparente vista dalla T

Dal grafico emerge che se si utilizzano per entrambi gli strumenti i coefficienti di calibrazione monofase dell’acqua, le densità apparenti sono le stesse (retta a 45°), per i due strumenti.

Utilizzando i coefficienti di calibrazione dell’aria la densità “vista” dal drag è superiore a quella “vista” dalla turbina.

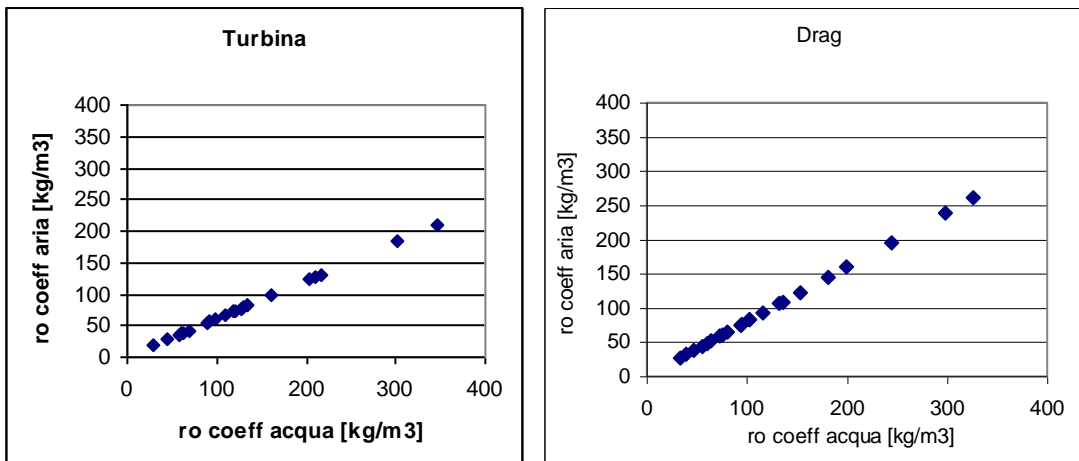


Fig. 21 : Densità apparente calcolata con coefficiente monofase aria in funzione della densità calcolata con coefficiente monofase aria per Drag e Turbina

Dall'analisi del segnale della turbina si ricava la velocità media della miscela:

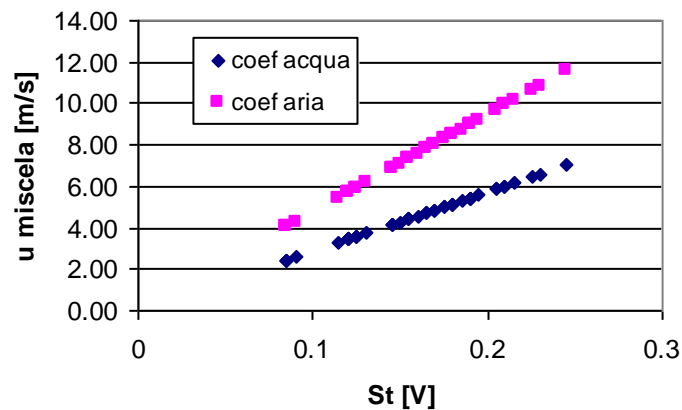


Fig. 22: Velocità media ricavata da St con coefficiente monofase

Sono note le due portate in ingresso e la pressione del circuito; è quindi agevole ricavare il titolo della miscela.

Nella misura in cui le densità medie viste dagli strumenti sono le stesse si può ricavare il grado di vuoto come:

$$\alpha = \frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_g - \rho_l} \quad (17)$$

Come evidenziato nel grafico di seguito riportato nelle condizioni analizzate esiste una relazione univoca (ricavata con curva di best-fit) tra titolo della miscela e grado di vuoto.

I valori del titolo riportati nel grafico seguente sono stati ricavati dalla misura della portate delle singole fasi effettuata durante le prove con il rotometro (portata aria) e con il misuratore elettromagnetico (portata acqua). Questa relazione viene utilizzata nella forma inversa (Fig. 23) per ricavare il titolo della miscela, noto il grado di vuoto ricavato dai segnali elettrici dello SP.

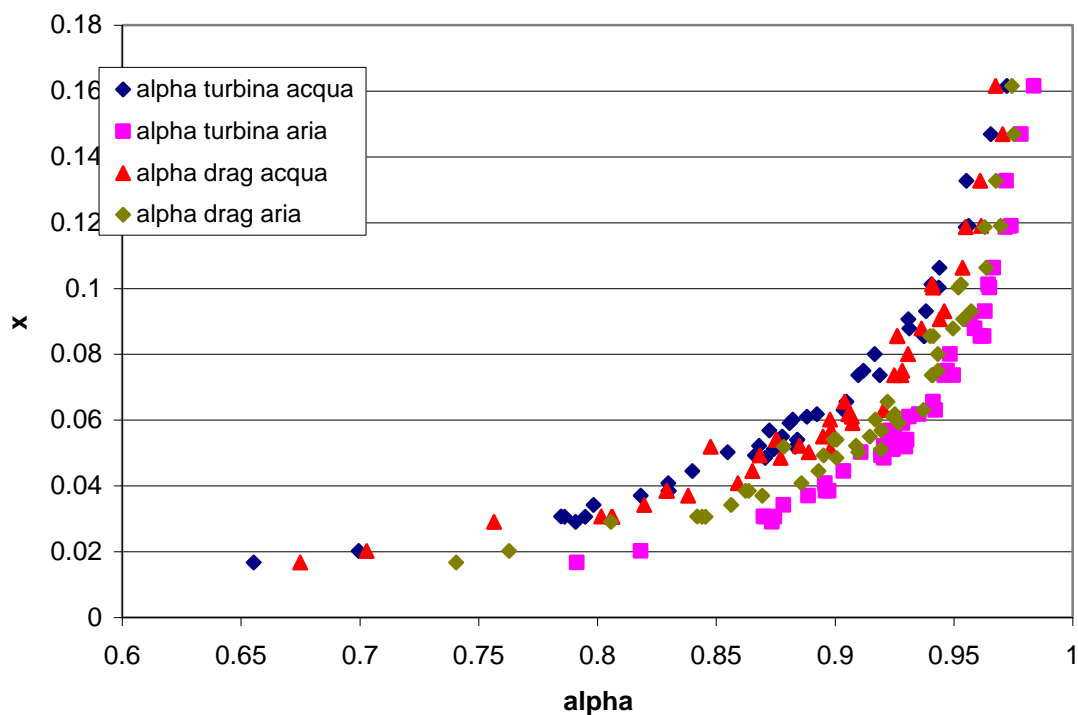


Fig. 23 : Titolo della miscela in funzione del grado di vuoto ricavato dal segnale degli strumenti

I due strumenti che formano lo Spool Piece sono teoricamente in grado di determinare, congiuntamente alle misure di pressione e temperatura del circuito, le grandezze del deflusso bifase secondo lo schema seguente:

Dati: S_d , S_t , p , T e geometria del circuito

- la velocità media del deflusso viene ricavata da S_t ,
- nota la velocità, si ricava la densità media dal valore di S_d ,
- si ottiene la portata totale come $W = \rho \cdot V \cdot A$,
- si ottiene il grado di vuoto dalla relazione con la densità media,
- si ricava il *titolo* e il valore dello *Slip*,
- si determinano le portate delle singole fasi ($W_g = x \cdot W_{tot}$, $W_{liq} = (1-x) \cdot W_{tot}$).

Il grado di vuoto così ricavato, è un grado di vuoto detto “fotografico”, in quanto la densità “vista” dagli strumenti viene interpretata come: $\bar{\rho} = \alpha \rho_{gas} + (1-\alpha) \rho_{liq}$; Rohuani (1964) ha dimostrato che la densità vista dalla turbina è in realtà una densità di quantità di moto [19]:

$$\bar{\rho} = \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_{gas}} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_{liq}} \right]^{-1} \quad (18)$$

Per verificare se lo SP “vede” una densità di quantità di moto o una densità fotografica, vengono calcolati i gradi di vuoto utilizzando le correlazioni di CISE, Chisholm e Zivi [6].

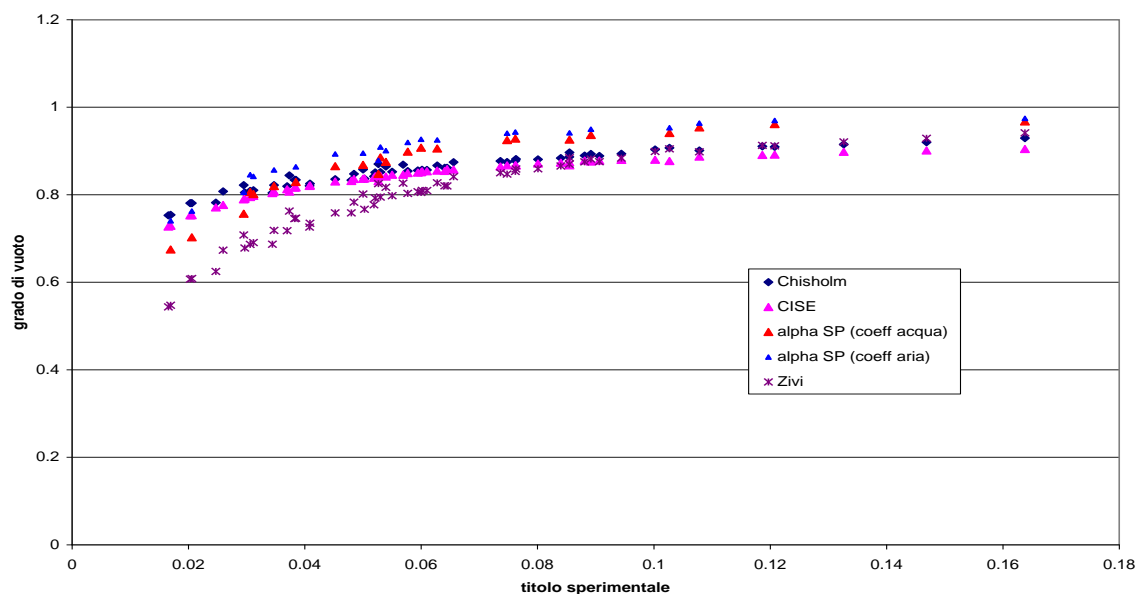


Fig. 24: Grado di vuoto – titolo : Confronto con le correlazioni della letteratura

Viene quindi effettuato un confronto tra la densità ricavata dai segnali dello SP e quella ottenuta interpretando i gradi di vuoto delle correlazioni come “fotografici” e come di “Quantità di Moto”:

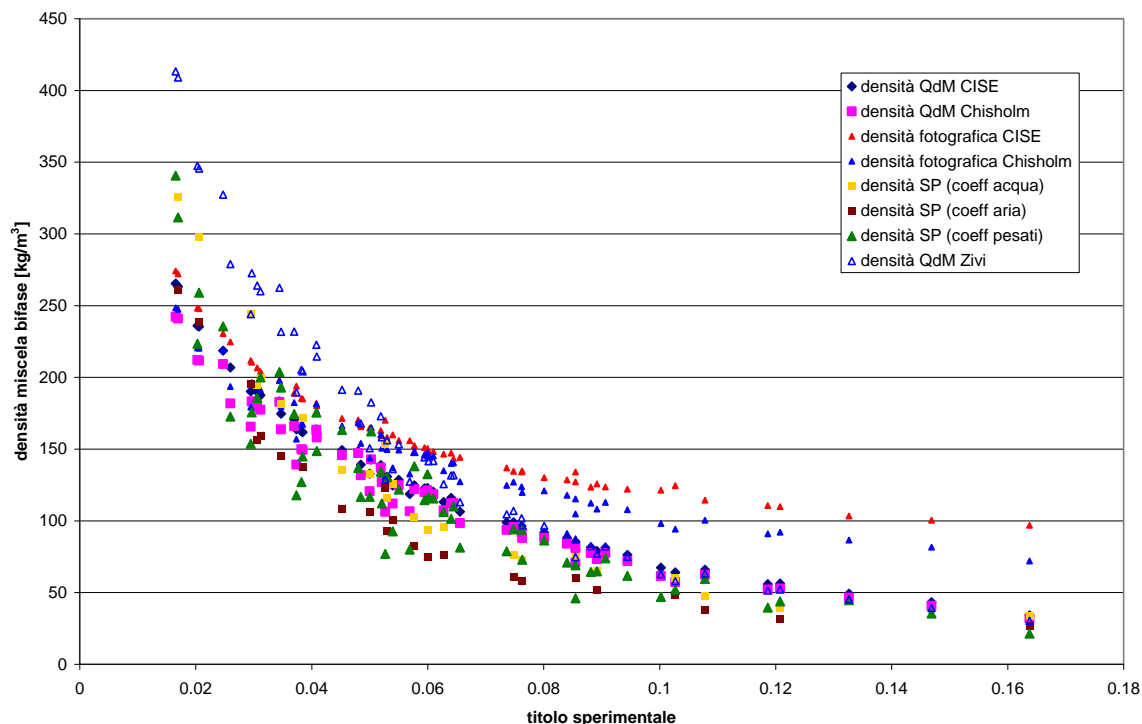


Fig. 25: Densità miscela bifase: Confronto con le correlazioni

Analizzando il grafico riportato in Fig. 25, si può concludere che effettivamente è più corretto interpretare la densità vista dallo SP, come densità di quantità di moto.

Per cui la curva sperimentale che lega il titolo al grado di vuoto è quella riportata in Fig. 26.

La curva è stata ricavata utilizzando come coefficienti degli strumenti, in deflusso bifase, dei valori pesati, come descritto nel paragrafo 6.6.

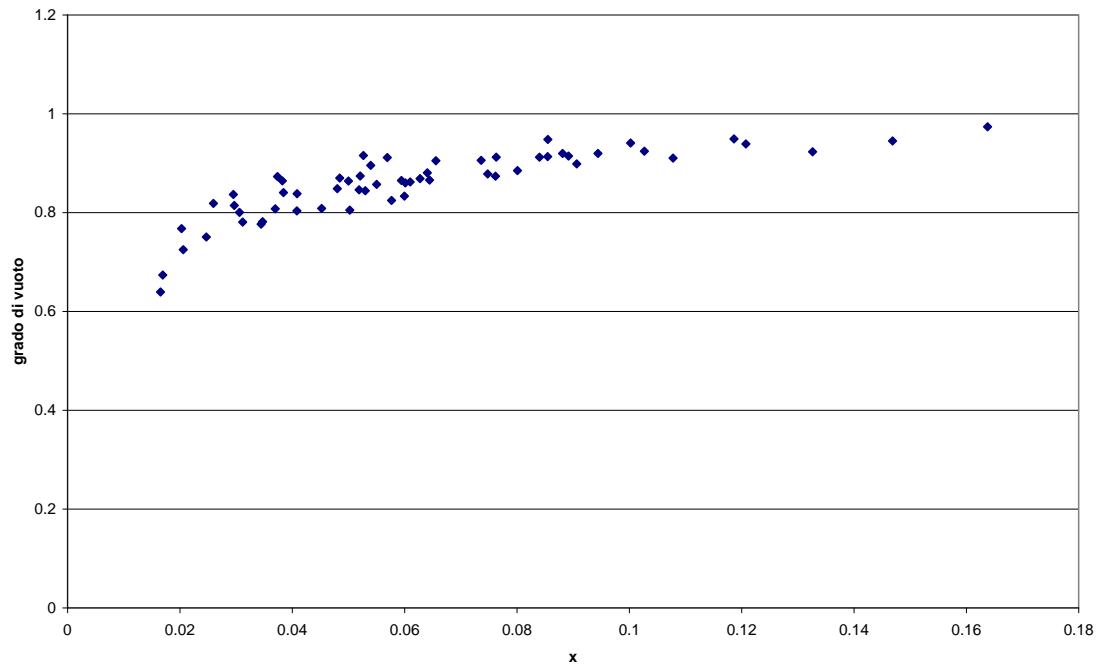


Fig. 26: Grado di vuoto ricavato da SP in funzione di x-sperimentale (α_{QdM})

6.4 Analisi con coefficienti monofase acqua

Applicando il modello descritto nel paragrafo precedente si ottengono i risultati riportati nei grafici seguenti.

La portata totale bifase si discosta dal valore sperimentale di circa il 20%, occorre però sottolineare che le incertezze sulle misure sperimentali delle singole portate non sono trascurabili e che il tipo di moto che si instaura è pulsato, con conseguenti oscillazioni dei segnali elettrici pronunciate intorno al valor medio. Tenendo conto di queste considerazioni i risultati ottenuti sono accettabili.

Dalla relazione tra il titolo e il grado di vuoto si ottengono le portate di aria e acqua; i grafici seguenti (Figs. 27-30) riportano l'incertezza del 20% rispetto ai valori misurati.

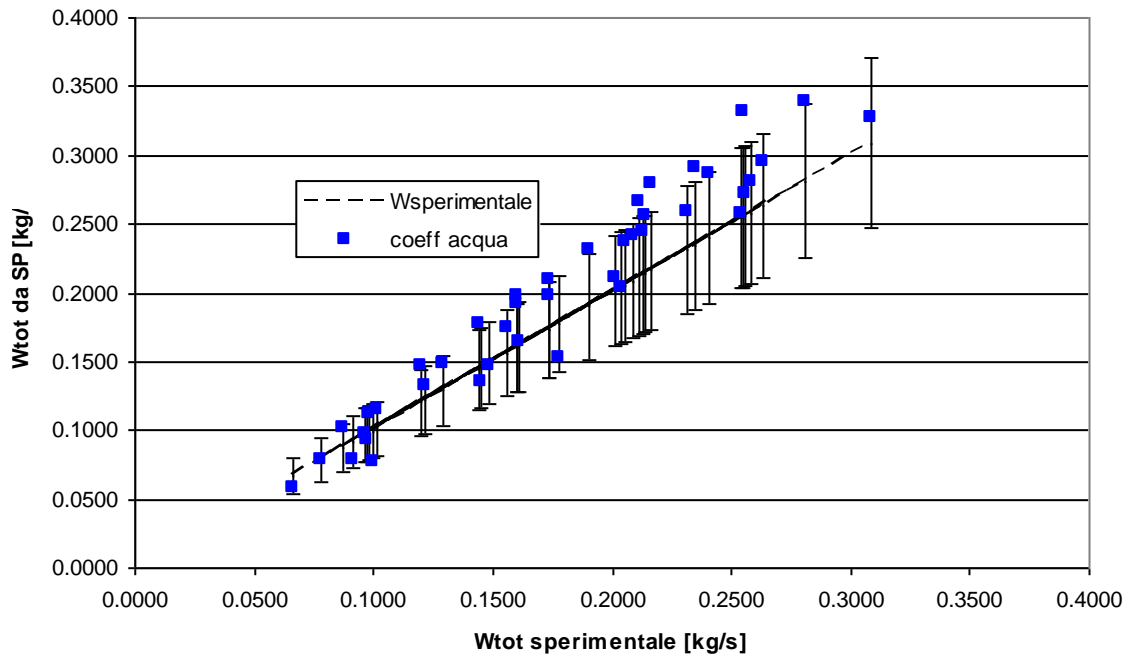


Fig. 27: Confronto tra la $W_{tot-sperimentale}$ e W_{tot-SP} ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura del deflusso monofase acqua

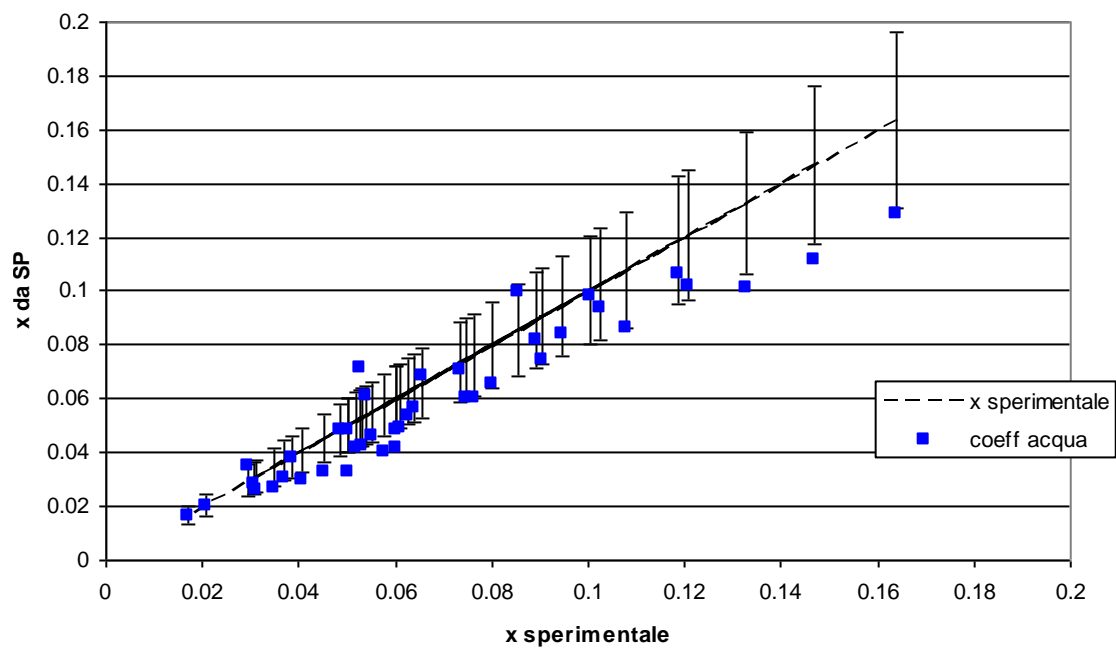


Fig. 28: Confronto tra $x-miscela$ sperimentale e $x-SP$ con i coefficienti di taratura monofase acqua

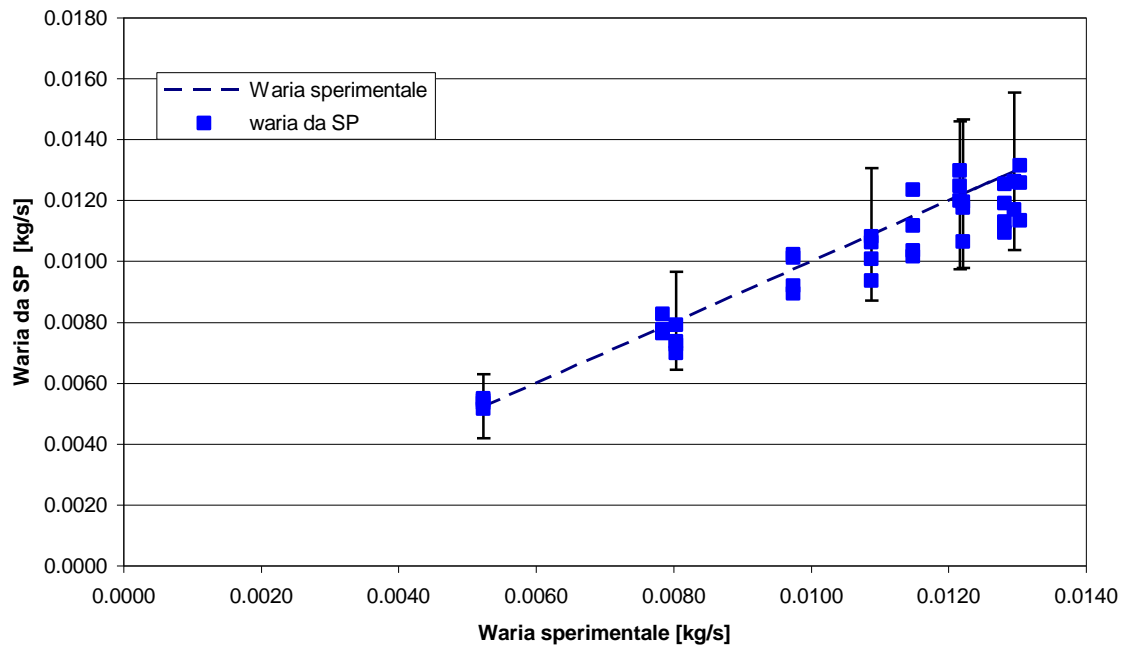


Fig. 29: Confronto tra la portata di aria sperimentale e quella ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura del deflusso monofase acqua

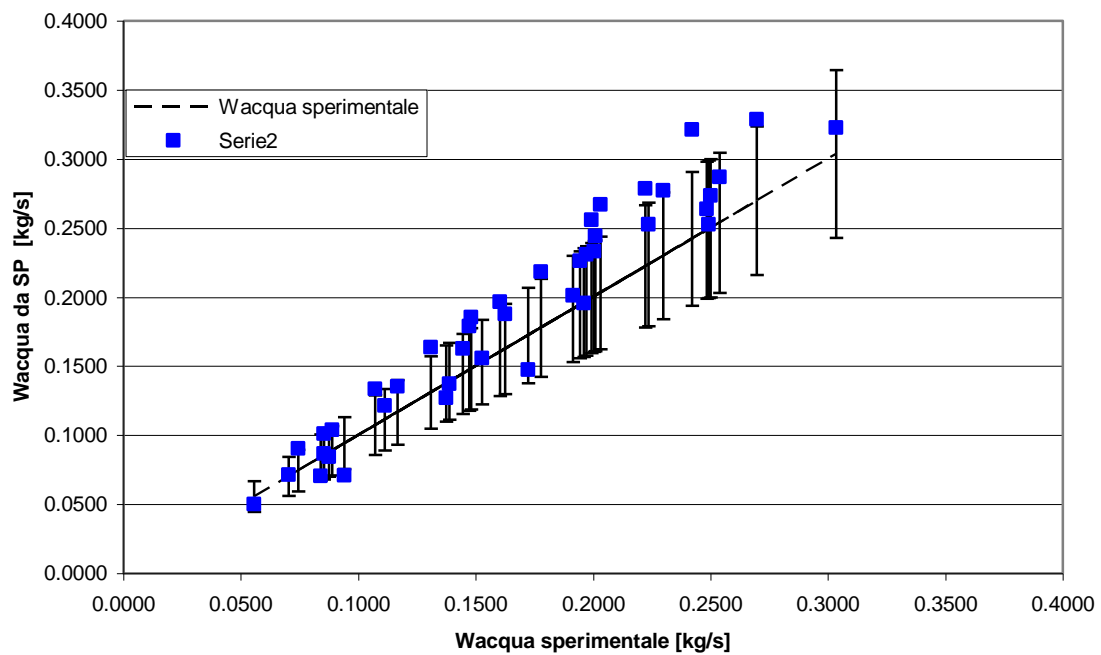


Fig. 30: Confronto tra la portata di acqua sperimentale e quella ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura del deflusso monofase acqua

6.5 Analisi con coefficienti monofase aria

Utilizzando lo stesso procedimento si ha:

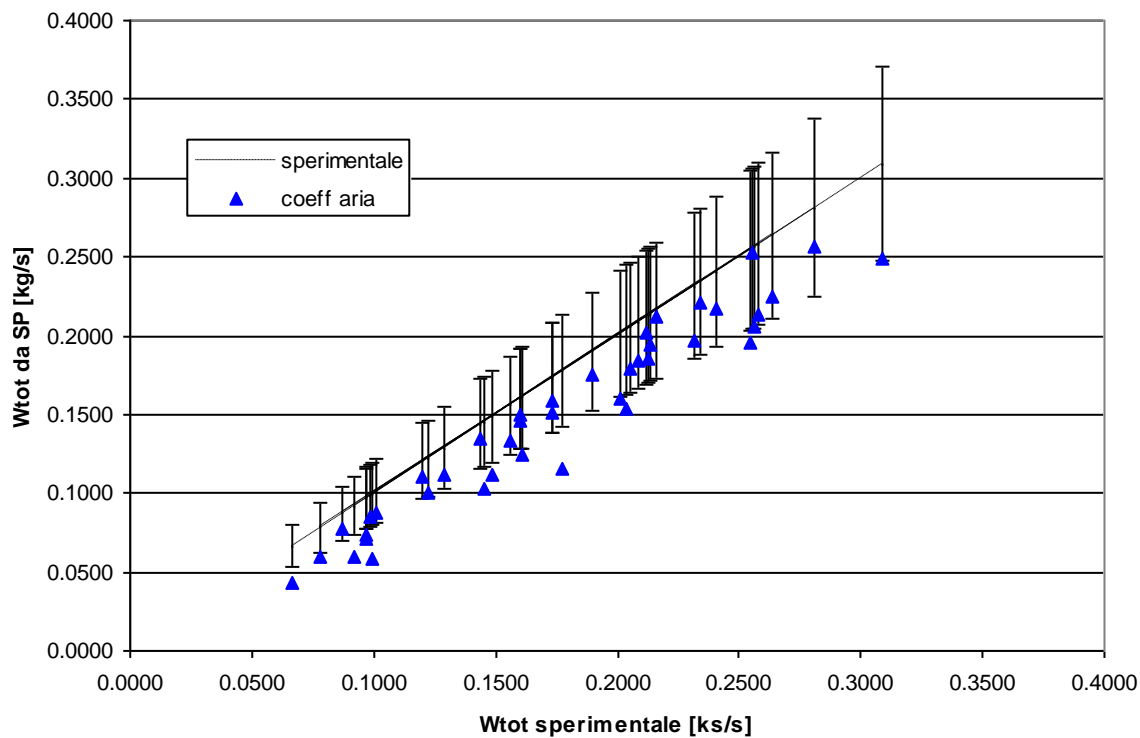


Fig. 31: Confronto tra la portata bifase sperimentale e quella ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura del deflusso monofase aria

Utilizzando i coefficienti di taratura monofase relativi all'aria le portate risultano essere sottostimate.

6.6 Analisi con coefficienti monofase pesati

Dal confronto tra le portate della miscela ottenute dai segnali elettrici degli strumenti utilizzando i coefficienti monofase si vede che mentre l'utilizzo dei coefficienti relativi al deflusso di liquido tende a sovrastimare la portata, l'utilizzo dei coefficienti relativi al deflusso di aria tende a sottostimarla.

Occorre quindi valutare come le portate di aria e acqua influenzano i segnali di drag e turbina.

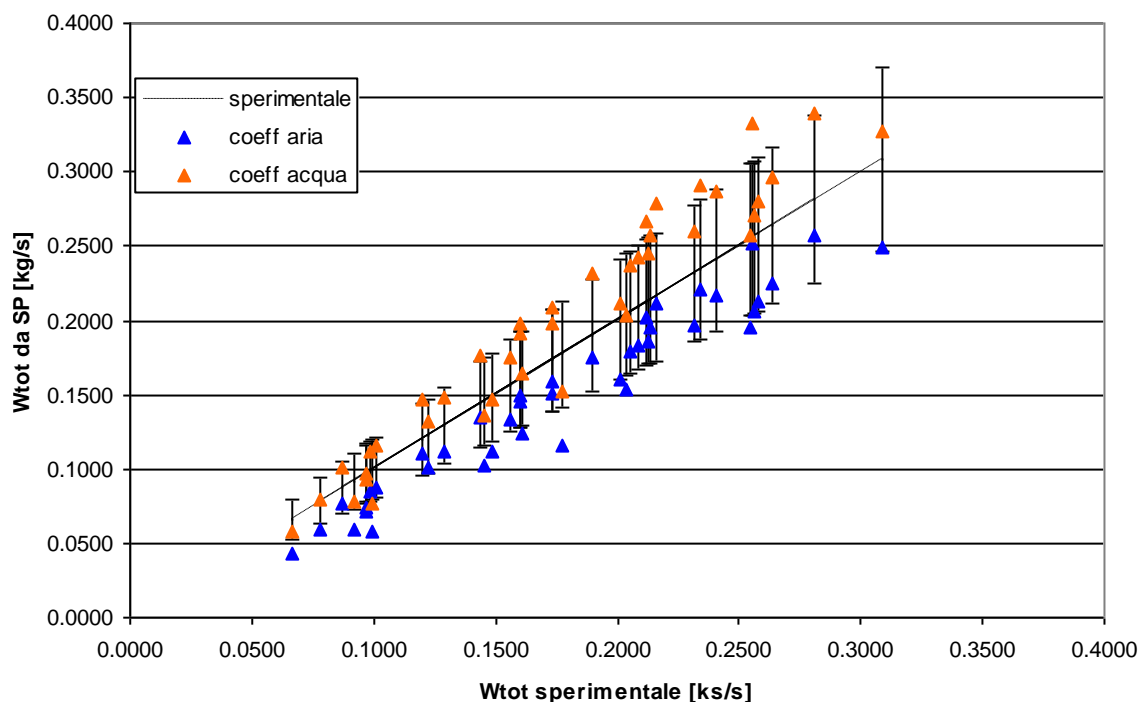


Fig. 32: Confronto tra le portate della miscela bifase ottenute utilizzando i coefficienti di calibrazione monofase di aria e acqua rispettivamente

Per fare ciò, si utilizzano nell'analisi del deflusso bifase dei coefficienti ricavati dai coefficienti di taratura monofase pesati:

$$Cd_{TP} = a \cdot Cd_l + (-a) \cdot Cd_g \quad (19)$$

$$Kt_{TP} = b \cdot Kt_l + (-b) \cdot Kt_g \quad (20)$$

Dove a e b sono dei fattori peso che vengono ricavati in base all'analisi dei dati sperimentali.

Confrontando le portate ottenute pesando parametricamente i coefficienti monofase per ottenere la portata della miscela bifase si ottiene:

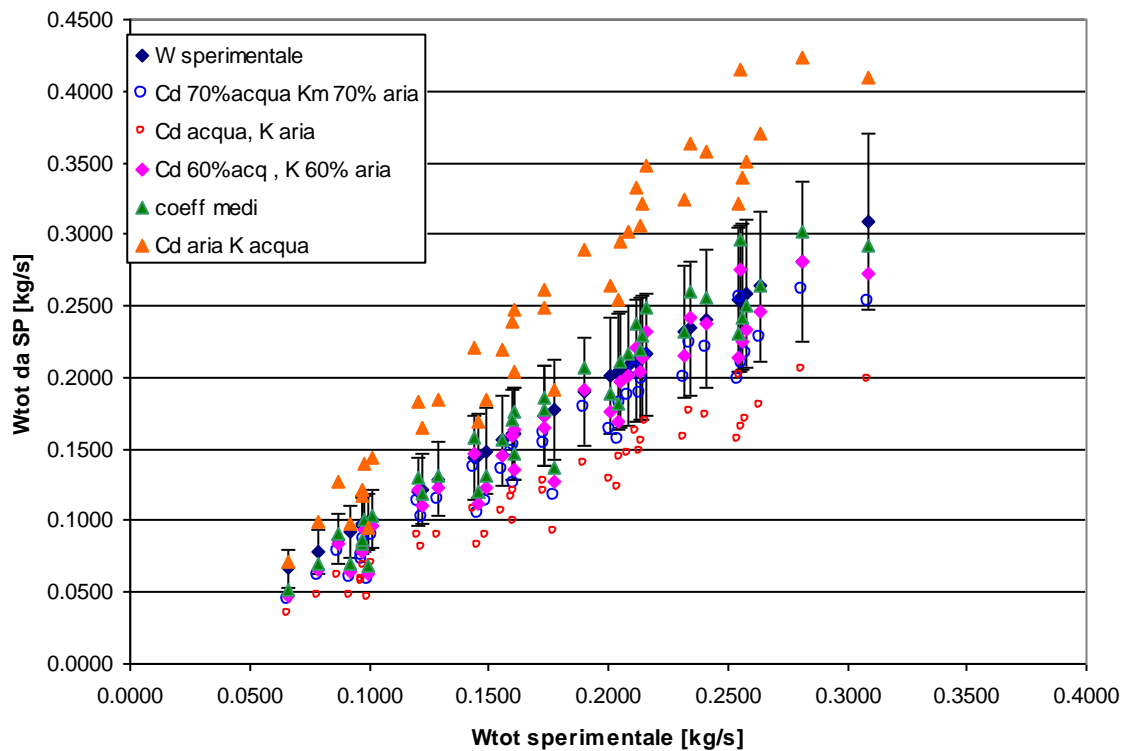


Fig. 33 : Confronto tra la portata del deflusso bifase sperimentale e quella ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura pesati secondo diversi fattori

Se si corregge il fattore monofase della turbina tenendo conto che si sta operando a elevati gradi di vuoto, e il fattore di calibrazione del drag, tenendo conto che questo strumento è maggiormente sensibile alla presenza di acqua (dovuta alla densità maggiore rispetto all'aria), si ottiene:

$$C_{d_{TP}} = 0.7 \cdot C_{d_l} + 0.3 \cdot C_{d_g} \quad (21)$$

$$K_{t_{TP}} = 0.025 \quad (22)$$

Dove il valore del coefficiente della turbina è quello ricavato dalla retta di best-fit dei deflussi monofase.

Dal confronto, presentato nei grafici seguenti, emerge che i coefficienti calcolati con le equazioni 21 e 22 consentono di valutare le grandezze bifase (titolo e portate delle due fasi) con uno scarto inferiore al 20%, sebbene le portate della miscela siano valutate con

un'incertezza maggiore rispetto a quella fornita dai calcoli effettuati con i coefficienti bifase dati dalla media aritmetica dei coefficienti monofase.

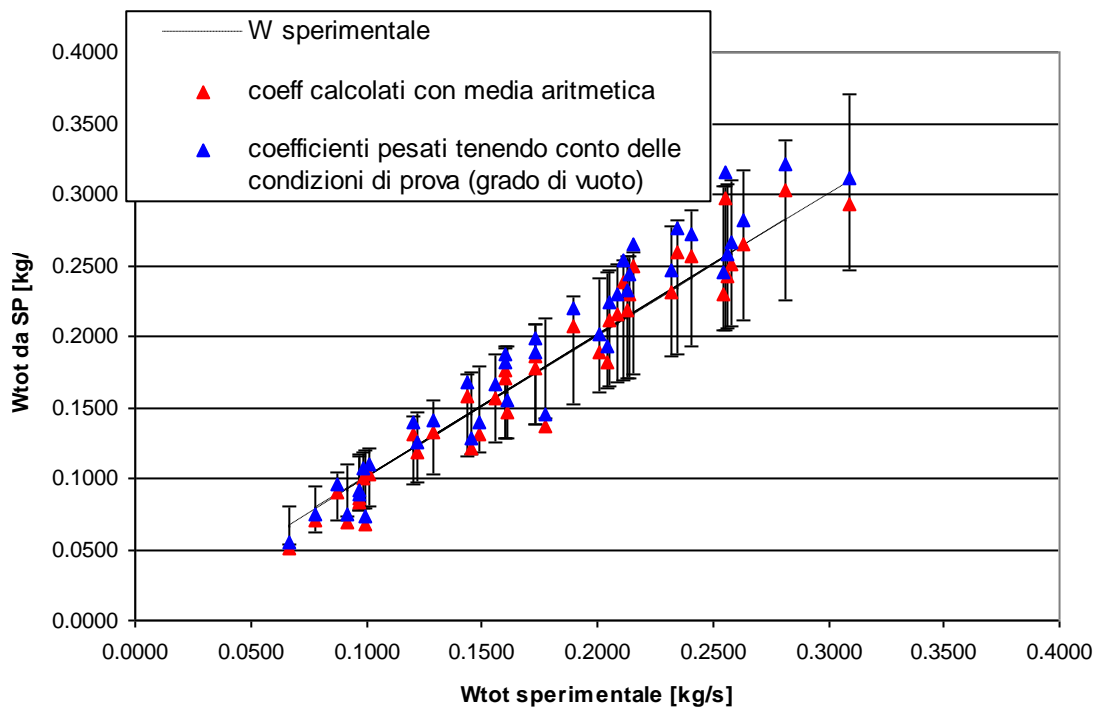


Fig. 34: Confronto tra la portata bifase sperimentale e quella ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura pesati.

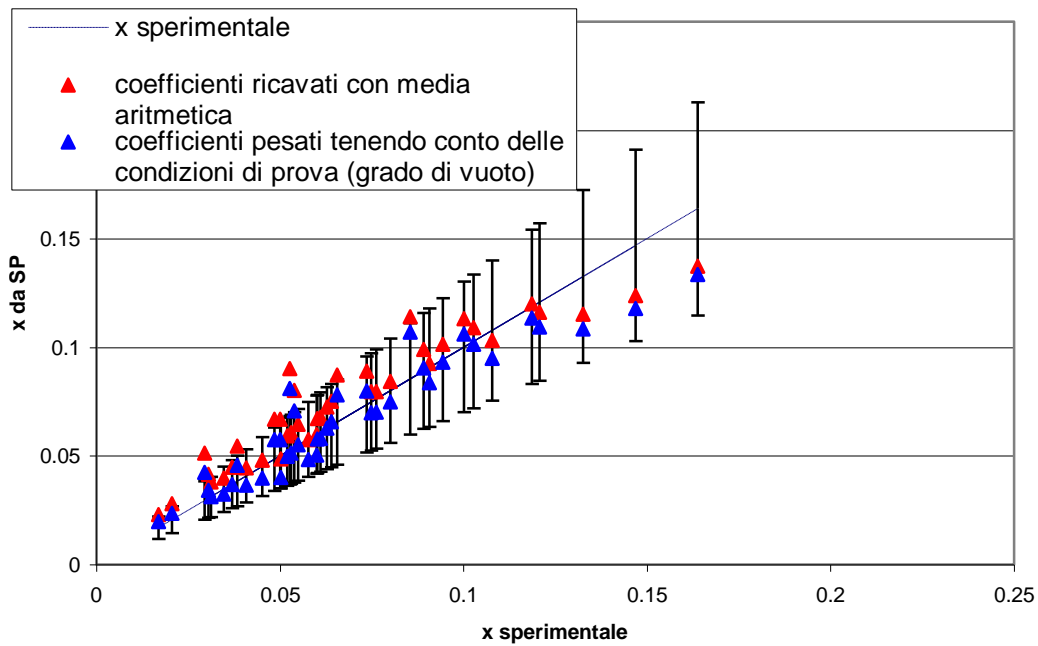


Fig. 35: Confronto tra il titolo della miscela sperimentale e quello ottenuto elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura pesati

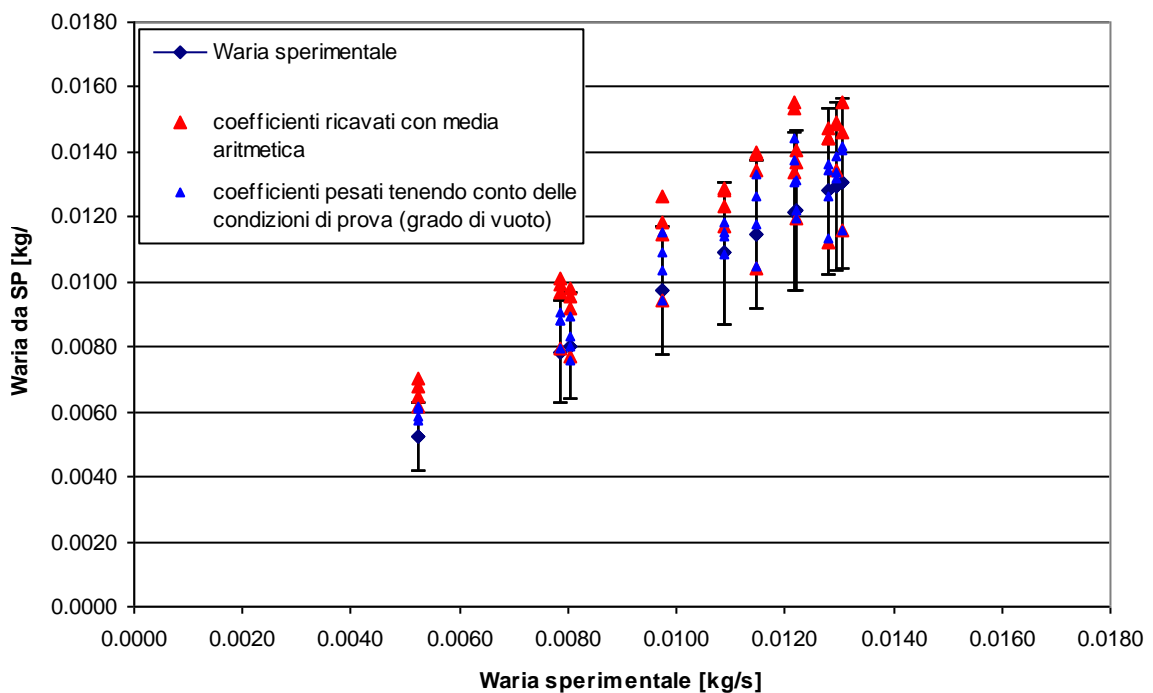


Fig. 36 : Confronto tra la portata di aria nel deflusso bifase sperimentale e quella ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura pesati

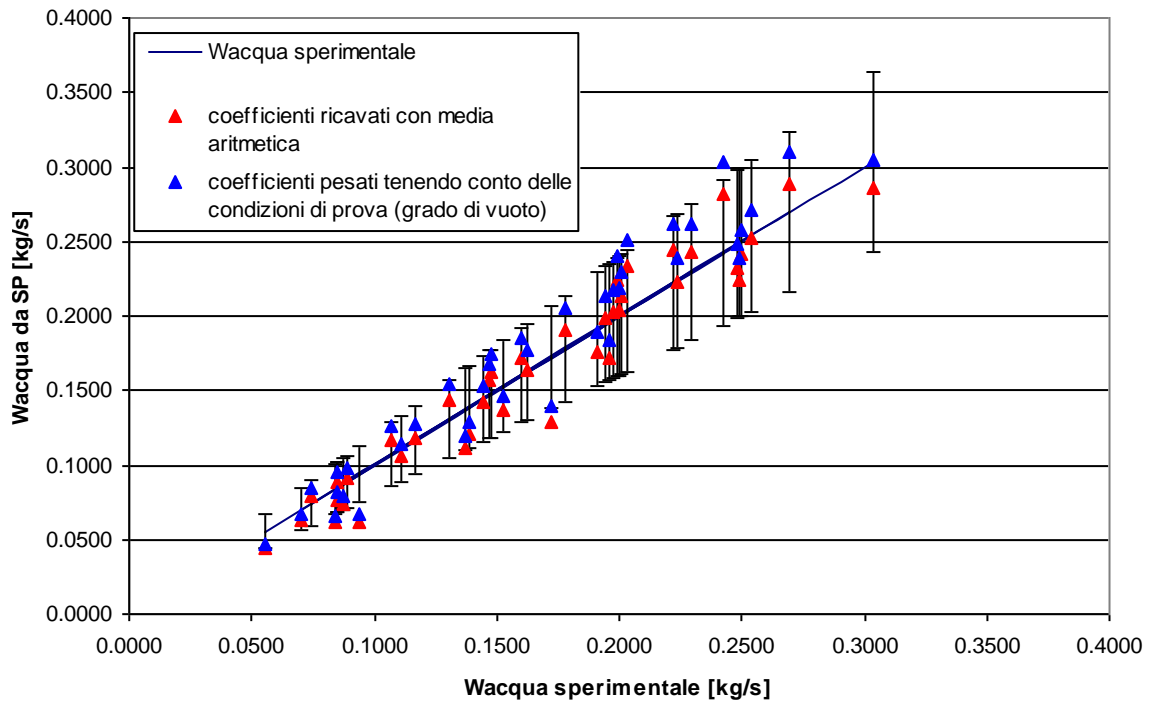


Fig. 37 : Confronto tra la portata di acqua nel deflusso bifase sperimentale e quella ottenuta elaborando i segnali degli strumenti con i coefficienti di taratura pesati

7. MAPPA DI FUNZIONAMENTO DELLO SPOOL PIECE

Nell'analisi svolta nel paragrafo 6 le grandezze del deflusso bifase sono state ottenute grazie alla combinazione dei segnali elettrici di Drag e Turbina.

Occorre sottolineare che l'analisi ha richiesto l'utilizzo di un modello che consentisse di correlare il grado di vuoto ricavato dai segnali dello SP al titolo della miscela.

È stata utilizzata a questo scopo la curva di best-fit riportata in Fig. 23.

Il procedimento utilizzato viene di seguito riportato:

Dati: S_d , S_t , p , T e geometria del circuito

la velocità media del deflusso viene ricavata da S_t ,

$$S_t = K_t \cdot Q \qquad V = Q / A$$

nota la velocità, si ricava la densità media dal valore di S_d ,

$$S_d = K_d \cdot F = K_d \left(\frac{1}{2} C_d A_d \cdot \rho V^2 \right) \qquad \rho_d = \frac{K_d}{S_d} \left(\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_d \right) \left(\frac{W_{tot}^2}{A^2} \right)$$

si ottiene la portata totale

$$W = \rho \cdot V \cdot A = \left[\frac{S_d}{K_d C_d A_d} \cdot \frac{2}{S_t / K_t A} \right] \cdot A$$

si ottiene il grado di vuoto dalla relazione con la densità media (iterando con x)

$$\bar{\rho} = \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_{gas}} + \frac{(-x)^2}{(-\alpha) \rho_{liq}} \right]^{-1}$$

si ricava il titolo e il valore dello Slip,

$$x = f(\psi)$$

$$S = \frac{x}{1-x} \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{\rho_l}{\rho_g}$$

si determinano le portate delle singole fasi

$$W_g = x W_{tot} \qquad W_l = (-x) W_{tot}$$

Si vuole costruire una mappa di funzionamento, teorica, dello SP in esame, che permetta di correlare il segnale del Drag e il segnale della turbina alle grandezze bifase, prescindendo dalla conoscenza diretta del grado di vuoto.

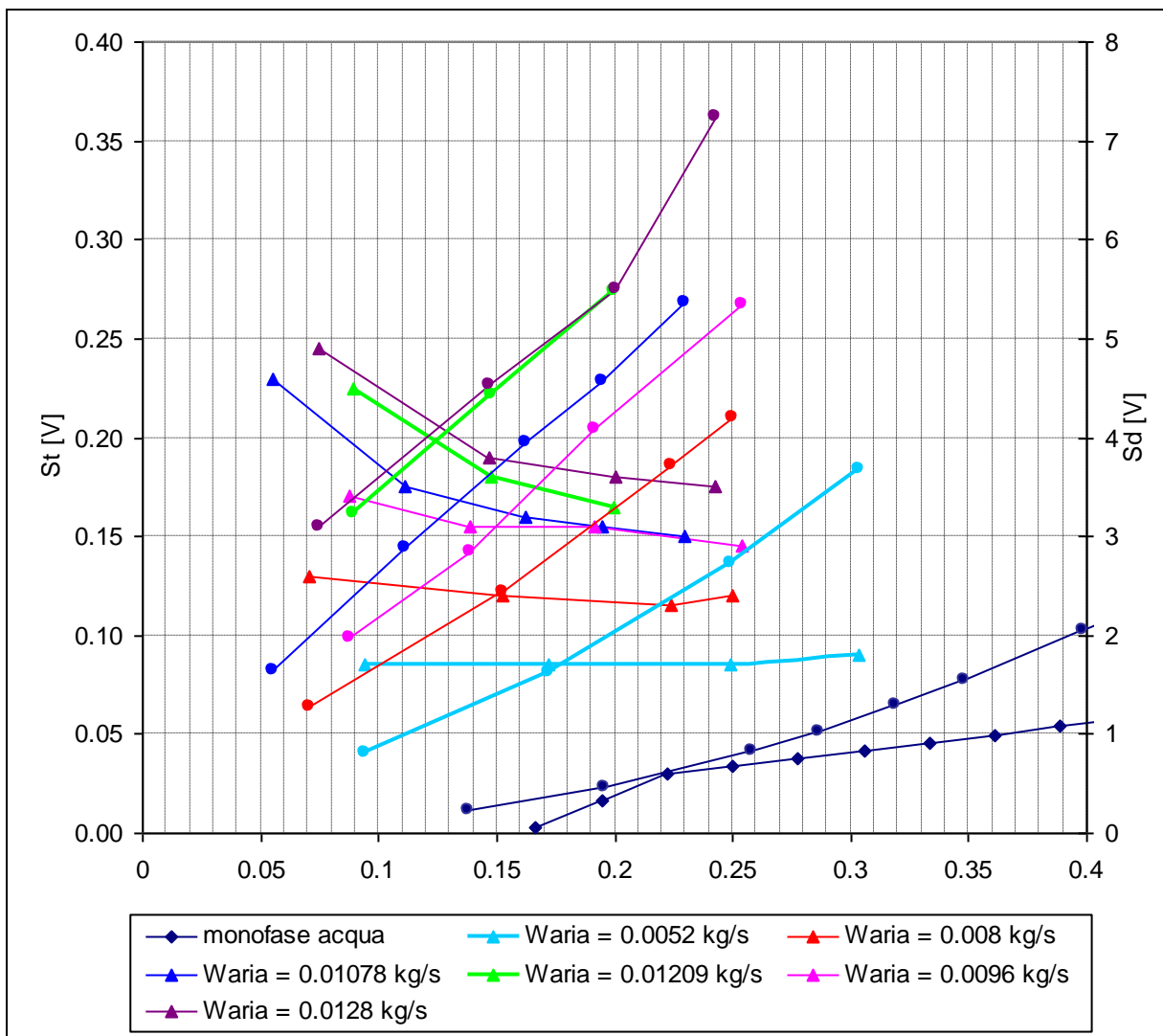


Fig. 38: Mappa SP. Asse x : W_{acqua} [kg/s], Simboli: Segnale Turbina = \blacktriangle . Segnale Drag = \bullet .

Rappresentando i segnali elettrici dei due strumenti in un unico grafico (Fig. 38), si ottiene la mappa di funzionamento dello SP.

La misura congiunta dei valori di pressione e temperatura e dei segnali elettrici dello SP, consente di ricostruire le portate di aria e acqua in maniera univoca utilizzando il grafico di Fig. 38 e Fig. 39.

I segnali dello SP sono stati correlati tra loro e corretti per tenere conto dell'effetto della pressione a cui si trova il circuito:

$$S^* = \frac{S_d \cdot \rho_g \left(\phi_o, T_o \right)}{S_t \cdot \rho_g \left(\phi, T \right)} \quad (23)$$

Il rapporto così calcolato consente di raggruppare in un'unica curva la variazione di S^* in funzione della portata di liquido normalizzata rispetto alla portata massima sperimentata:

$$W^* = \frac{W_l}{W_{l_max}} \quad (24)$$

La misura dei segnali elettrici e della pressione consente di ricavare direttamente la portata di liquido; nota questa si ricava il valore della portata di gas dai grafici che correlano i segnali di drag e turbina alle portate.

Dalla curva di best-fit, riportata in Fig. 39, si ricavano le portate massiche di liquido stimate; confrontando questi valori con le portate misurate si ottiene il grafico di Fig. 40.

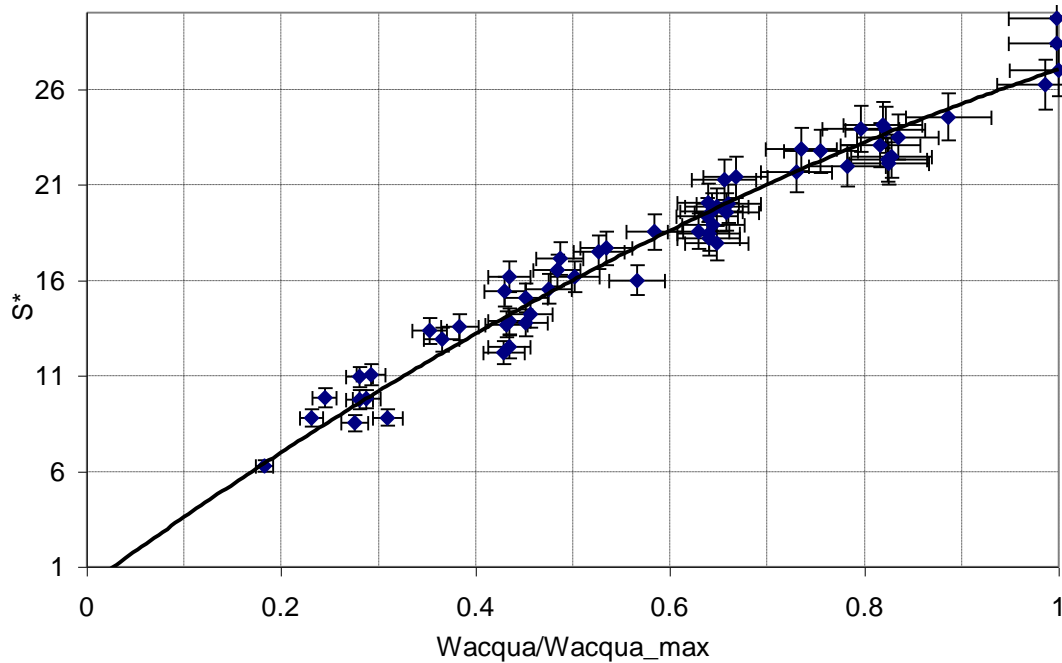


Fig. 39: S^* in funzione della portata in massa di acqua adimensionata.

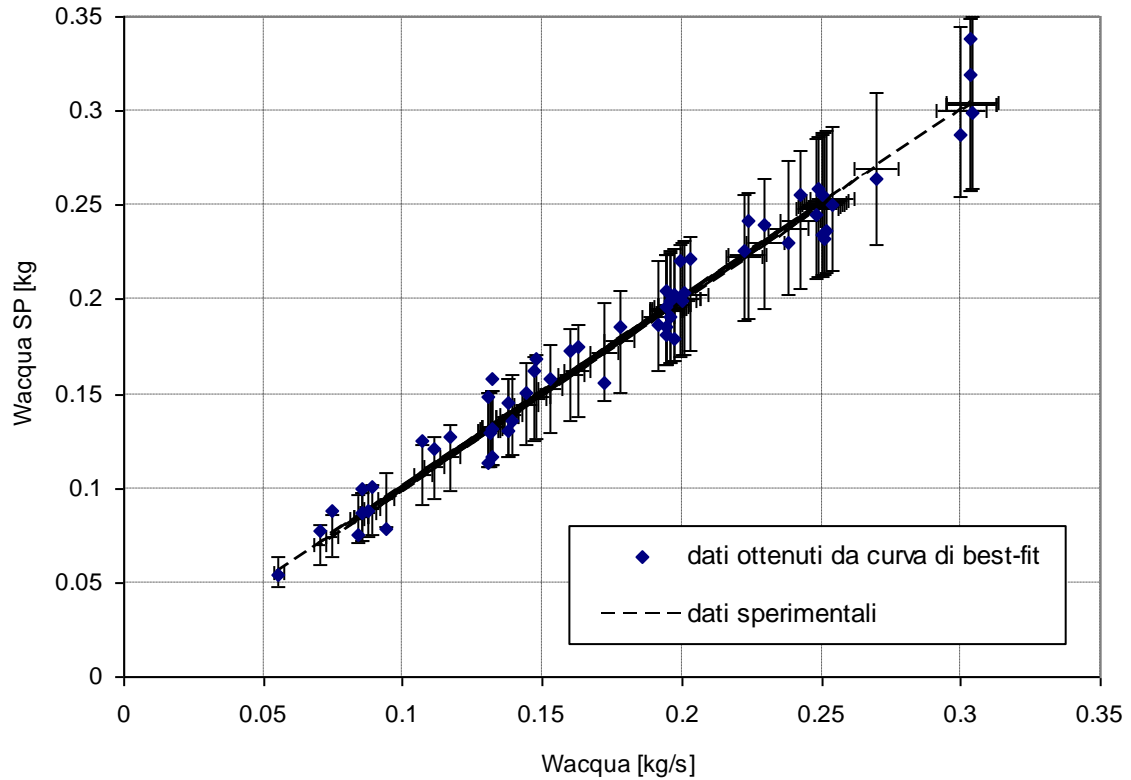


Fig. 40: Wacqua SP vs. Wacqua sperimentale. Barra y $\pm 15\%$ Wacqua sperimentale

La portata di liquido, è stimata con un'incertezza inferiore al 10% per il 74% delle prove; le incertezze maggiori si hanno per bassi valori di portata. Il 91% delle portate viene valutato con un'incertezza inferiore al 15%.

L'incertezza sulla portata di aria è quindi data dalla somma dell'incertezza sulla portata di liquido e dagli errori introdotti nella lettura dei grafici.

Analizzando le leggi che regolano il comportamento degli strumenti che costituiscono lo SP, è inoltre possibile discriminare tra deflusso monofase liquido e deflusso di miscela bifase.

Esprimendo in funzione della portata massica si ricava:

$$S_t = K_t \cdot \frac{W}{\rho} \quad (25)$$

$$S_d = K_d \cdot F = K_d \left(\frac{1}{2} C_d A_d \cdot \frac{W^2}{\rho \cdot A_{pipe}^2} \right) \quad (26)$$

Nel deflusso monofase, la densità può essere considerata costante all'interno dello SP; noti i coefficienti di calibrazione è quindi agevole ricavare la relazione esistente tra i segnali degli strumenti:

$$W = \left[2 \cdot \frac{S_d}{C_d A_d} \cdot \rho \cdot A_{pipe}^2 \right]^{1/2} = \frac{S_t}{K_t} \rho \quad (27)$$

da cui:

$$\left[2 \cdot \frac{S_d}{C_d A_d} \cdot \rho \cdot A_{pipe}^2 \right]^{1/2} \Big/ \frac{S_t}{K_t} \rho = 1 \quad (28)$$

Ovvero:

$$\sqrt{S_d} / S_t = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot K_d C_d A_d} \Big/ K_t \cdot \sqrt{\rho} / A_{pipe} \quad (29)$$

8. DISCUSSIONE DEI RISULTATI E ANALISI TEORICA

I deflussi sperimentati sono caratterizzati da un andamento intermittente; per cui i valori di pressione e i valori dei segnali elettrici rappresentano i valori medi, aventi le deviazioni standard riportate in Fig. 41.

Si osserva che gli scarti quadratici medi (normalizzati rispetto ai segnali elettrici) sono contenuti nel caso di pressione e drag, mentre risultano più consistenti e crescenti con la portata nel caso della turbina. Probabilmente le elevate deviazioni standard della turbina sono da associare al fatto che i deflussi sono di tipo pulsato e, nell'ambito delle frequenze di oscillazione, la turbina riesce a seguire le variazioni di velocità del fluido in modo più sensibile rispetto al drag.

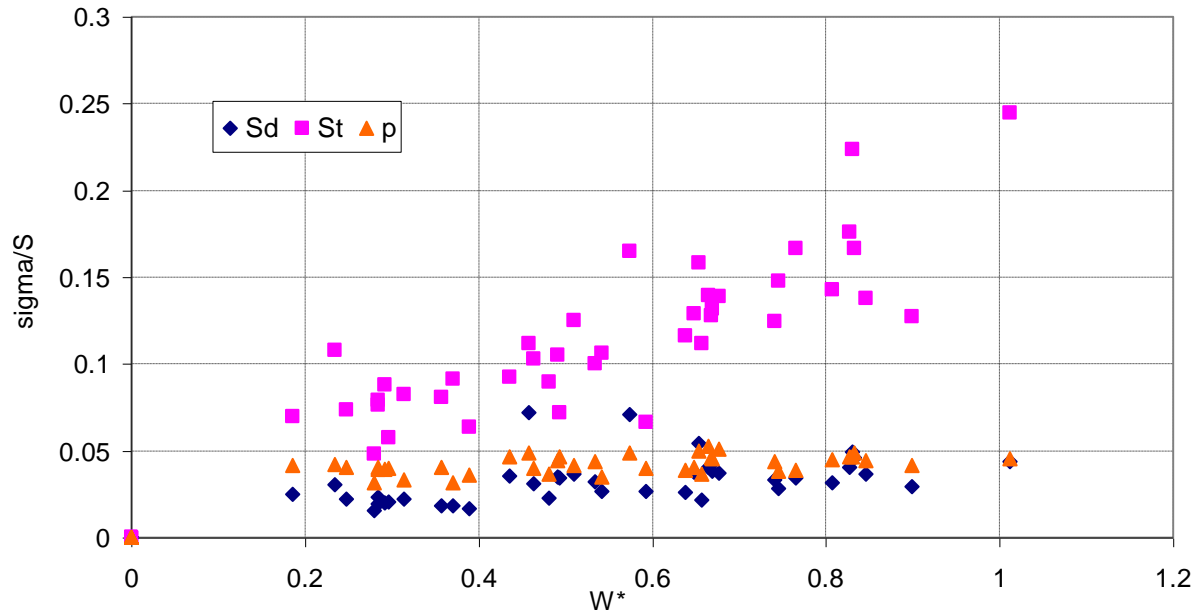


Fig. 41: Deviazione standard dei segnali elettrici

Un esempio dell'andamento istantaneo dei segnali, filtrati dai disturbi a 50 Hz, è riportato in Fig. 44.

L'andamento temporale permette di caratterizzare l'intermittenza del deflusso, evidenziandone le frequenze caratteristiche, al variare delle portate di aria e acqua. In particolare si nota che per basse portate di liquido, il segnale elettrico non ha una periodicità ben definita, mentre all'aumentare della portata l'intermittenza del segnale aumenta in ampiezza e in frequenza; la frequenza caratteristica cresce inoltre, anche se in maniera meno marcata, al crescere della portata di aria.

La variazione del deflusso viene evidenziata inoltre nell'analisi degli istogrammi relativi ai segnali di drag e turbina: la gaussiana che caratterizza la dispersione del segnale per basse portate di liquido, si evolve in bimodale per portate di liquido crescenti.

Un modello teorico, atto a descrivere il funzionamento dello SP, è rappresentato da un insieme di relazioni che, sulla base dei segnali elettrici associati alla turbina e al drag, consente di determinare le portate che fluiscono nel condotto.

L'applicazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, applicate alle due fasi, in un contesto di modello a fasi separate, mette in evidenza che non è possibile stimare le due portate senza la misura della frazione di vuoto o senza l'adozione di un

appropriato modello di questa grandezza applicabile in un definito range, in termini di portate e pressioni, di funzionamento.

Poiché le *performance* di drag e turbina sono fortemente influenzate dal grado di vuoto e dal regime di deflusso, per sviluppare un modello adeguato, occorre in primo luogo caratterizzare il flow-pattern.

Un adeguato modello teorico dovrebbe quindi considerare i vari fenomeni che intervengono nel deflusso anulare, in modo da analizzare la portata di liquido trasportata nel *core* e il livello del film da confrontare con il diametro del bersaglio del drag, e delle palette della turbina, per definire univocamente la sensibilità dello strumento alla fase liquida in deflusso anulare.

Occorre inoltre tener conto delle instabilità del deflusso (deflusso intermittente-pulsato), instabilità che modificano il valore medio del segnale elettrico e quindi la quantità di moto ricavata da questo.

Il modello sviluppato da Aya si basa sull'analisi dei segnali elettrici di uno SP composto da 3 strumenti: turbina, drag e gamma-densitometro [10].

Il modello assume che la quantità di moto delle fase gas nella turbina sia bilanciata dalla quantità di moto della fase liquida:

$$C_{ig} \alpha \rho_g V_g - \bar{V}^2 = C_{il} (1 - \alpha) \rho_l \bar{V} - V_l^2 \quad (30)$$

è assunto un regime di flusso disperso in cui la velocità del vapore è maggiore di quella del liquido (Slip) [10].

Per la valutazione della quantità di moto della miscela, il modello ipotizza che la velocità della fase gassosa e la velocità della fase liquida siano uniformi sulla sezione.

Il coefficiente C_d viene assunto pari a quello del caso monofase .

L'equazione del modello diventa:

$$F = \frac{1}{2} C_d A_d \left[\rho_g \bar{V}^2 + (1 - \alpha) \rho_l \bar{V}^2 \right] \quad (31)$$

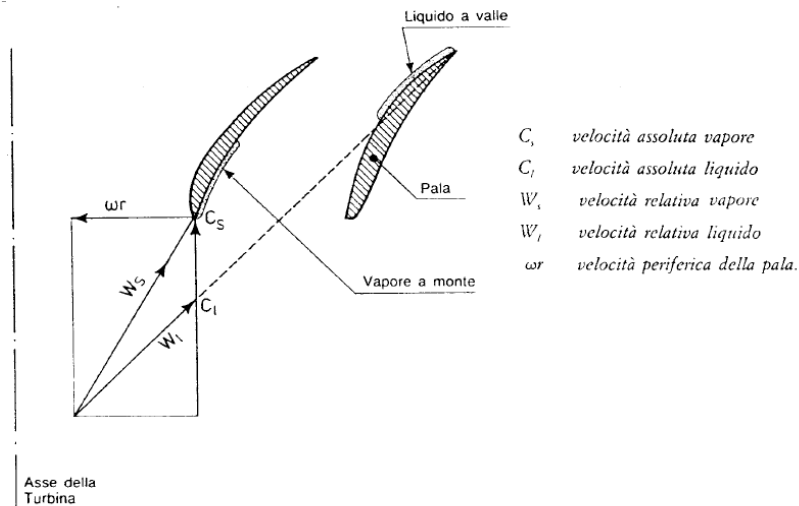


Fig. 42: Rappresentazione della velocità in ingresso della turbina

La forza motrice prodotta dalla fase gassosa è esercitata sulla porzione a monte della pala e la forza resistente è esercitata dal liquido a valle di questa

La velocità angolare della turbina corrisponde a una velocità di miscela del fluido (\bar{V}), che può essere considerata come una velocità media nella regione occupata dalla turbina..

Per quanto riguarda il drag, il deflusso viene analizzato come deflusso a fasi separate (equazione 31), introducendo la definizione di grado di vuoto e rielaborando l'equazione 31 si ottiene l'espressione esplicita dello Slip:

$$C_{dl} = \frac{1}{2} C_{d_l} A_d \quad (32)$$

$$C_{dg} = \frac{1}{2} C_{d_g} A_d \quad (33)$$

$$\bar{C}_d = \frac{C_{d_l}}{C_{d_g}} \quad (34)$$

$$S^2 = \frac{\rho_l - \rho_g \cdot F_d / C_{d_g} - \bar{\rho} - \rho_g \cdot \rho_l \cdot \bar{C}_d \cdot V_l^2}{\rho_l - \bar{\rho} \cdot \rho_g \cdot V_l^2} \quad (35)$$

Utilizzando la relazione titolo-Slip-grado di vuoto:

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = \frac{1-x}{x} \frac{S}{\rho_l / \rho_g} \quad (36)$$

Si ricava il valore del titolo della miscela.

Effettuando un bilancio di Quantità di Moto sulle palette della turbina, e rielaborando si ottiene:

$$\frac{V_l}{\bar{V}} = \frac{1 + \sqrt{\bar{C}_t Y}}{S + \sqrt{\bar{C}_t Y}} \quad (37)$$

Dove:

$$\bar{C}_t = \frac{Kt_l}{Kt_g} \quad (38)$$

$$Y = \frac{\rho_l}{\rho_g} \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) = \frac{\rho_l}{\rho_g} \left(\frac{\bar{\rho} - \rho_g}{\rho_l - \bar{\rho}} \right) \quad (39)$$

L'equazione 37 può quindi essere riscritta come:

$$V_l = \begin{cases} a + b & S \leq \bar{C}_d \sqrt{Y/\bar{C}_t} \\ a - b & S > \bar{C}_d \sqrt{Y/\bar{C}_t} \end{cases} \quad (40)$$

Con

$$a = \sqrt{\frac{\bar{C}_t}{Y}} \left(\frac{1 + \sqrt{\bar{C}_t Y}}{\bar{C}_d + \bar{C}_t} \right) \cdot \bar{V} \quad (41)$$

$$b = \frac{1}{\bar{C}_d + \bar{C}_t} \left[\bar{C}_d + \bar{C}_t \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho - \rho_g} \right) \frac{F_d}{\rho_l C_{Dgas}} - \frac{\bar{C}_d}{Y} \left(1 + \sqrt{\bar{C}_t Y} \right)^2 \bar{V}^2 \right]^{1/2} \quad (42)$$

Nota: i coefficienti C_{dliq} , C_{dgas} , K_{tliq} e K_{tgas} sono i coefficienti di calibrazione monofase dei due strumenti con acqua e aria rispettivamente

Il modello proposto da Aya, richiede come input la densità della miscela bifase. Nel caso in esame lo SP non è provvisto di uno strumento atto a misurare direttamente questa grandezza.

Poiché la conoscenza della pressione e quindi delle densità dei fluidi consentono di valutare, in base a precedenti analisi teorico sperimentali [10], il valore di Slip (Fig. 43), si procede effettuando un'analisi parametrica del modello di Aya con lo scopo di valutare gli scostamenti tra le portate misurate e quelle stimate dal modello.

Il rapporto tra la densità del liquido e la densità dell'aria, nelle condizioni sperimentate è compreso tra 480 e 780, a cui corrisponde secondo la curva di Fig. 43, un valore di Slip compreso tra 3 e 5.

Utilizzando questi valori si ottengono le stime delle portate di aria e acqua riportate in Fig. 45.

L'analisi parametrica evidenzia che il modello di AYA consente, noto il grado di vuoto della miscela, di stimare le portate delle due fasi con un'incertezza del 15%.

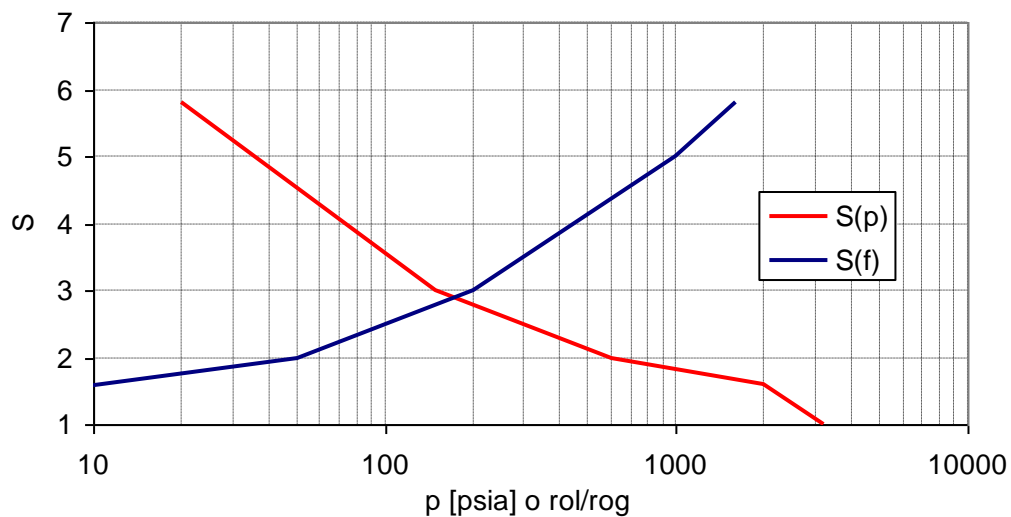


Fig. 43: Slip in funzione di p e ρ_l / ρ_g

La Fig. 45 (a), evidenzia la variazione del valore di Slip al crescere della portata di aria; la riduzione del valore di Slip da 5 a 3 è dovuta probabilmente al fatto che al crescere della portata di aria la frazione di liquido viene accelerata e trascinata nel *core* gassoso.

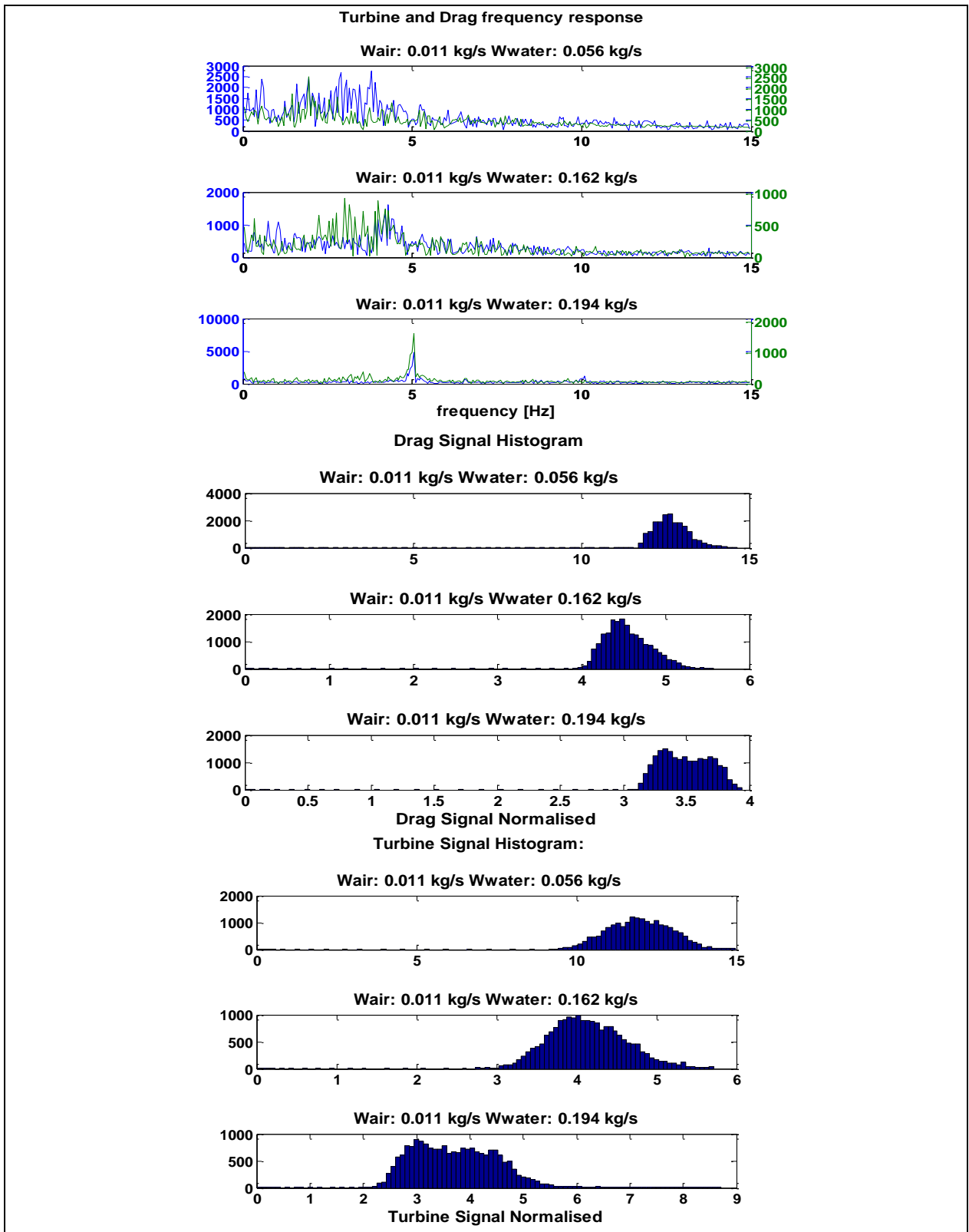


Fig. 44: Andamento temporale dei segnali elettrici degli strumenti in deflusso bifase

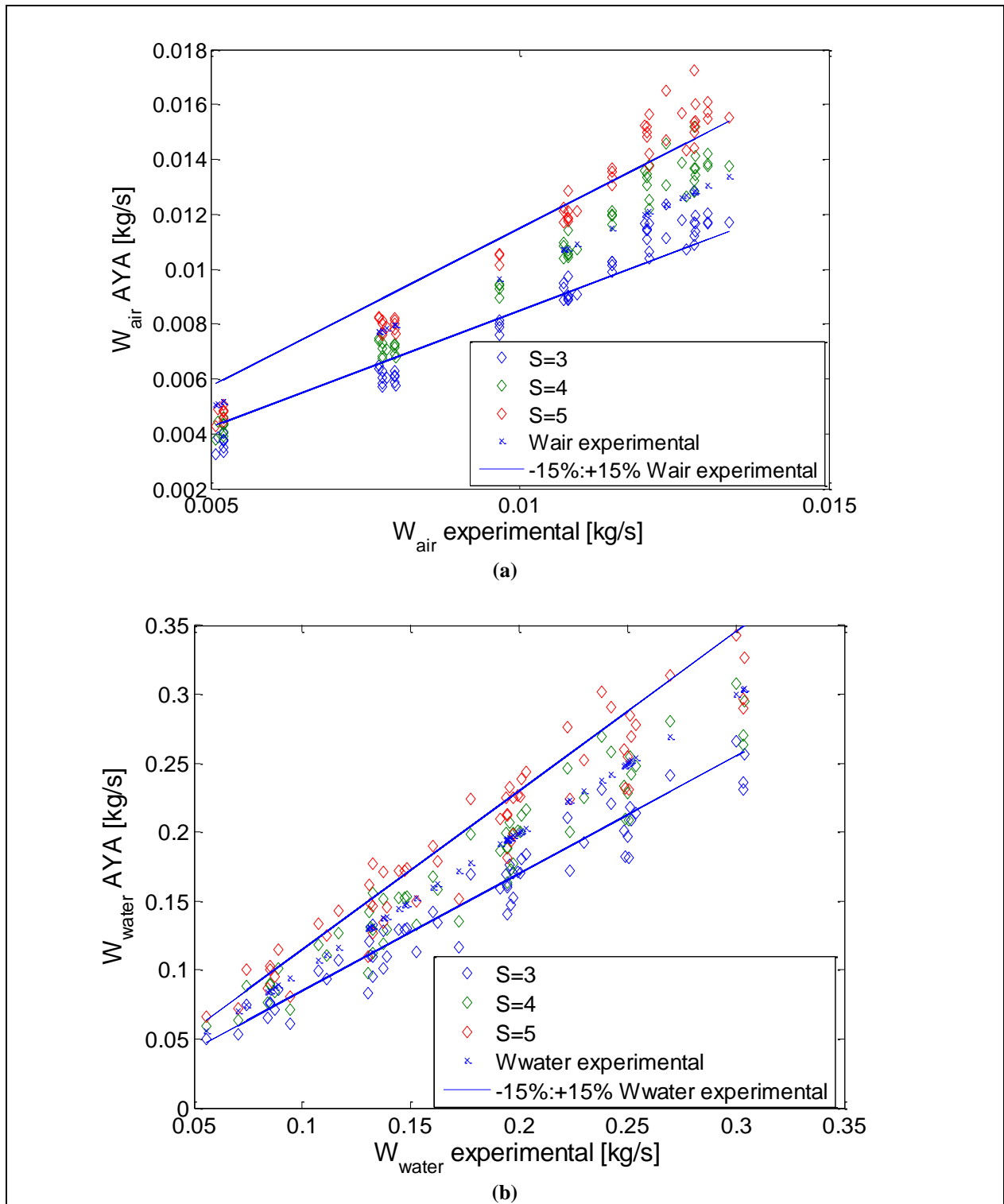


Fig. 45: W_{air} e W_{water} stimate con il modello di AYA

L'analisi del deflusso può quindi essere suddivisa in 3 campi di funzionamento dello SP:

- basse portate di aria e di acqua,
- basse portate di aria e alte portate di acqua,
- alte portate di aria e di acqua.

Osservando l'andamento temporale del segnale del drag e analizzando il deflusso che si instaura con le diverse portate si conclude che, quando le portate d'acqua e di aria sono basse, il drag non è sensibile al sottile film liquido ma solo alla portata d'aria (in questo caso lo spessore del film è probabilmente minore del diametro del bersaglio e le gocce trasportate sono trascurabili); mentre al crescere della portata d'acqua lo spessore del film aumenta e incide sul bersaglio del drag. Inoltre aumentando parametricamente la portata d'aria, le gocce strappate dal film e trasportate nel *core* gassoso aumentano; queste gocce vanno a incidere sul bersaglio, che diventa quindi più sensibile alla portata di liquido.

9. CONCLUSIONI

L'analisi dei segnali elettrici, relativi agli strumenti dello spool piece installato nel circuito di prova, ha permesso di caratterizzare il deflusso bifase in termini di flow pattern e portate delle singole fasi. Sebbene lo SP sia sprovvisto di un misuratore del grado di vuoto, la procedura utilizzata consente di stimare le portate di aria e acqua nella miscela bifase con un incertezza del 15%.

Considerando le incertezze degli strumenti utilizzati per la misura sperimentale delle portate, e la difficoltà di associare un valore medio del segnale elettrico a un deflusso di tipo anulare/pulsato, i risultati possono essere considerati accettabili.

Poiché non è previsto l'utilizzo di uno strumento per la misura del grado di vuoto (gammadensitometro, wire-mesh, ECT) le informazioni che lo spool piece fornisce sono da considerarsi complete solo nella misura in cui le condizioni di prova (pressione, temperatura e range di portate) sono quelle realizzate. Lo studio parametrico effettuato con il modello di Aya, permette di concludere che, in limitati range di funzionamento, la conoscenza del tipo di flow pattern consente di evitare l'utilizzo del 3° strumento costituente lo SP, altrimenti indispensabile per ricavare le grandezze caratteristiche di un deflusso bifase.

Ulteriori approfondimenti sono necessari nello sviluppo del modello analitico e nell'analisi dei segnali elettrici degli strumenti.

Lo studio proposto, consentendo di verificare l'utilizzo di strumentazione convenzionale monofase in deflusso bifase caratterizzato da elevati gradi di vuoto, ha comunque una notevole rilevanza scientifica.

Nel proseguo dello studio il circuito è stato modificato al fine di inserire il misuratore di grado di vuoto. Lo Spool Piece costituito da drag, turbina e sonda a impedenza è stato analizzato; la turbina utilizzata, HOFFER modello HO1X1-4-60-C-IMX3/0-MS-CE, è caratterizzata da un funzionamento digitale, mentre la turbina utilizzata nel presente studio ha un funzionamento analogico. La differenza elettronica dei due strumenti offre interessanti spunti di analisi, utili a definire il comportamento degli strumenti e il loro utilizzo ottimale in applicazioni bifase.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Turbine Flowmeters: User's Manual*, (2009) HOFFER
- [2] *Ramapo Mark-V, Instruction book*
- [3] *Misuratori a turbina e a bersaglio in deflusso bifase bicomponente*. De Salve, Panella, Polsinelli, Valfrè (1984), Dipartimento di Energetica - Politecnico di Torino
- [4] *Behavior of a drag disc turbine transducers in steady-state two phase flow*. Solbrig, Reimann (1980), *IEEE Transactions on Nuclear Science*
- [5] *Strumentazione per deflussi bifase: specifiche e matrice sperimentale per la calibrazione con il circuito LV-400*. De Salve, Del Tin, Demaria, Miletto, Panella, Raviolo, Vacca (1986) Dipartimento di Energetica - Politecnico di Torino
- [6] *Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow*. P. B. Whalley
- [7] *Flow Regimes*. Hewitt (1982) *Handbook of multiphase systems*
- [8] *A turbine-meter evaluation model for two phase transient*, (1980) Kamath and Lahey, *Journal of Heat Transfer*
- [9] *Strumentazione, metodi e analisi impiegati per la misura della portata in massa in regime bifase* (1986) M. Furrer, ENEA
- [10] *Model to calculate mass flow rate and other quantities of two phase flow in a pipe with a densitometer, a drag disk, and a turbine meter* (1975), Aya, ORNL
- [11] *Measurement of two phase mass flow rate: A comparison of different techniques* (1981), Reimann et al.
- [12] *The liquid film and the core region velocity profiles in annular two-phase flow* (1985), M. K. Jensen
- [13] *A void fraction model for annular flow in horizontal tubes* (2003), Todd M. Harms et al.
- [14] *Prediction of wall shear for horizontal annular air-flow* (2008), D. Schubring, T.A. Shedd
- [15] *Algebraic turbulence modelling in adiabatic gas-liquid annular two-phase flow* (2008), A. Cioncolini, J.Thome, C. Lombardi
- [16] *Film Thickness prediction in a horizontal annular two-phase flow* (1988), C.P. Tso
- [17] *Two-Phase Flow Measurement with Orifices*, J. W. Murdock, *Trans. ASME, J. Basic Eng.* 84, 419-33 (1962).

- [18] *Measurement of Steam Quality in Two-Phase Upflow with Venturimeters and Orifice Plates*, D. B. Collins and M. Gacesa, *Trans. ASME, J. Basic Eng.* 3, 11-21 (1971).
- [19] *Application of the Turbine Type Flowmeters in Measurement of Steam Quality and Void*, S.Z. Rouhani, RPL-683, AB Atomenergi, Studvik (September 1963).
- [20] *Application of the Turbine Type Flowmeters in the Measurements of Steam Quality and Void*, S. Z. Rouhani, *Symposium on In-Core Instrumentation, OSLO*, June 1974.
- [21] *Mass flow measurements under PWR reflood conditions in downcomer and at a core barrel vent valve location*, Hardy (1982), NUREG/CR-2710
- [22] *Experimental Study of Horizontal air-water Two-Phase Flow with a Spool Piece*, M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *REPORT ENEA*, Settembre 2011



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

**Politecnico di Torino
Dipartimento di Energetica**



**Relazione tecnica sulle prove a freddo delle sonde per la misurazione
del grado di vuoto e sulla verifica sperimentale della catena di
misurazione, costituita da una turbina, un drag disk e della sonda
sviluppata**

Parte quarta

***Caratterizzazione di un deflusso bifase orizzontale aria-acqua mediante
Wire Mesh Sensor***

Autori

M. De Salve

G. Monni

B. Panella

CERSE-POLITO RL 1260-IV/2011

TORINO, LUGLIO 2011

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2- A3

AdP MSE-ENEA “Ricerca di Sistema Elettrico” - PAR2008-09

Progetto 1.3 – “Nuovo Nucleare da Fissione”.

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	3
INDICE DELLE TABELLE.....	3
1. INTRODUZIONE	4
2. LA FRAZIONE DI VUOTO NEI DEFLUSSI BIFASE.....	5
3. WIRE MESH SENSOR.....	6
4. SEZIONE DI PROVA, CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE.....	14
5. MATRICE SPERIMENTALE	17
6. ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI E ANALISI RISULTATI.....	18
6.1 Calcolo della frazione di vuoto puntuale, lineare, areica, e volumetrica	22
6.2 Analisi degli andamenti temporali.....	24
6.3 Persistenza della fase gas	25
6.4 Frazioni di vuoto locali e dipendenza dalle velocità superficiali	27
6.5 Grado di vuoto lineare: profili del segnale lungo alcune corde	30
6.6 Analisi dei profili cordali.....	31
6.7 Andamenti temporali dei profili mediati sulla sezione	35
7. CONCLUSIONI.....	38
BIBLIOGRAFIA.....	40
APPENDICE I.....	41
APPENDICE II	57
APPENDICE III.....	79

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Sensore 16x16 WMS200.....	7
Fig. 2: Modulo Trasmettitore (a) e Modulo ricevitore (b)	8
Fig. 3: WMS200 Modulo elettronico di base.....	8
Fig. 4: Schema di funzionamento dello strumento. Prasser et all. (1998).....	10
Fig. 5: Diagramma di trasmissione e ricezione del segnale	10
Fig. 6: Impulso di eccitazione degli elettrodi.....	11
Fig. 7: Schema <i>Test Section</i>	15
Fig. 8: Sistema per l'alimentazione e la misura della portata del liquido	16
Fig. 9: Interfaccia grafica del WMS-Data-Converter, versione 4.8.0.0	19
Fig. 10: Frame di riferimento con condotto pieno d'acqua.....	20
Fig. 11: Profilo del segnale nel condotto pieno d'acqua ($j=8$, elettrodo trasmittente)	21
Fig. 12: Esempi di mappe di stratificazione determinate sulla base dei dati sperimentali non normalizzati.	21
Fig. 13: Calcolo dei pesi geometrici utilizzati per ricavare la frazione media di ogni fase sulla sezione	23
Fig. 14: Andamento temporale del segnale per RUN 5	25
Fig. 15: Media mobile temporale del segnale normalizzato per RUN 5.....	25
Fig. 16: Istogrammi dei tempi locali di permanenza delle fasi sull'asse verticale del condotto	26
Fig. 17: Valori medi locali del grado di vuoto nel punto $i = 14, j= 8$	28
Fig. 18: Valori medi locali di grado di vuoto nel punto $i = 8, j= 8$	29
Fig. 19: Valori istantanei di grado di vuoto nel punto $i=3, j= 8$	29
Fig. 20: Schema dei punti della griglia utilizzati per ricostruire i profili del grado di vuoto sulle corde.....	30
Fig. 21: Profili cordali per il RUN3	31
Fig. 22: Profili cordali per il RUN4	32
Fig. 23: Profili cordali per il RUN5	32
Fig. 24: Profili cordali per il RUN7	33
Fig. 25: Profili cordali per il RUN8	33
Fig. 26: Esempio di Profilo medio cordale in un piano orizzontale per $i=8$	34
Fig. 27: Esempio di Profilo medio cordale ($j=8$) della frazione di vuoto relativa ad un piano verticale	35
Fig. 28: Andamento temporale della frazione di vuoto mediata sulla sezione. $T = 20$ s	36
Fig. 29: Andamento temporale della frazione di vuoto mediata sulla sezione. $T = 10$ s	37
Fig. 30: Andamento temporale della frazione di vuoto mediata sulla sezione. $T = 5$ s	37

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1: Specifiche tecniche del modulo elettronico di Base del Politecnico di Torino.....	9
Tab. 2: Caratteristiche Modulo trasmettitore	9
Tab. 3: Tempi caratteristici impulso.	12
Tab. 4: Caratteristiche Modulo ricevitore	12
Tab. 5: Matrice prove sperimentali	17
Tab. 6: Velocità superficiali per le prove di Fig. 26	34

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi del Piano Annuale di Realizzazione (PAR)2008-09 dell'Accordo di Programma MSE-ENEA", con riferimento ai reattori di piccola e media taglia, il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, ha svolto un'attività di ricerca sperimentale atta a studiare la distribuzione delle fasi in un condotto percorso da un deflusso bifase aria-acqua con l'utilizzo della strumentazione speciale "Wire Mesh Sensor".

Si tratta di una strumentazione (sensore di misura ed elettronica) sviluppata da Prasser et al. [1] per lo studio della frazione di vuoto e della distribuzione delle fasi dei deflussi bifase gas – liquido in condizioni sia stazionarie che transitorie. La distribuzione delle fasi gas e liquido è determinata sulla base della misura della conduttività elettrica locale .

Si tratta di una strumentazione bifase "speciale" nel senso che il sensore ha bisogno di una elettronica che richiede l'acquisizione di un numero notevole di dati ed anche un modello di analisi ed interpretazione dei segnali dipendente dal deflusso e dalla geometria del sensore.

Infatti per strumentazione "speciale" intendiamo un insieme di sensori fisici (in questo caso il wire-mesh con elettrodi metallici sottili disposti su diversi piani a diverse distanze) investiti da un deflusso bifase. In presenza di una fase conduttiva, dall'analisi dei segnali elettrici generati dall'elettronica e proporzionali alla conducibilità elettrica del fluido che connette due elettrodi, e con l'ausilio di un modello interpretativo, è possibile ricostruire le quantità termofluidodinamiche di interesse (frazione di vuoto, distribuzione delle fasi, velocità delle fasi).

Il principio del "wire mesh sensor" è stato impiegato nel 1987 da Johnson [2] per la misura della frazione di acqua nel petrolio grezzo. In questo primo sensore i fili del sensore erano disposti su due piani e perpendicolari tra di loro. Un'altra versione di sensore è stata impiegata nel 1996 da Reineck et al. [3] con gli elettrodi disposti su tre piani ed inclinati tra di loro di 60°. La logica di base del processo di misura è relativa alla misura, in modo sequenziale, dell'impedenza elettrica tra due elettrodi del sensore e per tutte le coppie degli elettrodi presenti tra i diversi piani e l'analisi e sintesi di queste informazioni. Prasser, nel 1998 ha considerato un sensore simile a quello proposto da Johnson, ha migliorato l'elettronica in termini di segnale trasmesso agli elettrodi, segnale ricevuto e di unità di acquisizione dati.

La tecnologia del "Wire mesh sensor system" è stata brevettata dal Forschungszentrum Dresden-Rossendorf con il Dr. Uwe Hampel inventore, ed è prodotta su licenza dalla GWT-TUD GmbH di Dresden (Germania). L'elettronica è realizzata dalla "Teletronic Rossendorf GmbH".

Il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino ha acquisito il sistema denominato WMS200BD.

Il problema fondamentale di questa tecnologia è che essa richiede:

- a) il progetto del sensore, dal punto di vista geometrico e della resistenza termomeccanica, specifico per ogni applicazione;
- b) una messa a punto dei metodi di elaborazione delle informazioni generate dal processo di misura;
- c) un'attenta progettazione della metodologia di prova per i limiti nella capacità di registrazione della durata dei test (massimo 30 minuti).

Numerosi studi sperimentali, sono stati svolti, a partire dal 2000, per migliorare la tecnologia ed il processo di elaborazione dei dati. Si cita lo studio di Richter et al. [4] del 2002 finalizzato allo studio del moto a bolle in regime transitorio; lo studio di Manera ed al. [5] del 2006 che ha caratterizzato la distribuzione delle bolle ed il flow pattern durante processi di flashing; lo studio di Zheng et al. [6] illustra come si studiano sperimentalmente i deflussi bifase con l'ausilio di un misuratore a turbina e un sensore di conduttanza elettrica. Infine lo studio di da Silva et al. [7] mette in evidenza come ricostruire i deflussi bifase con l'ausilio dei wire-mesh sensor. Si osserva anche che l'impiego di due sensori installati ad una distanza relativamente vicina (34 mm) consente di studiare la velocità delle bolle oltre che ricostruire i processi di coalescenza come dimostrato da Prasser et al. [8].

2. LA FRAZIONE DI VUOTO NEI DEFLUSSI BIFASE

Una delle grandezze fondamentali per la caratterizzazione di una miscela bifase è la frazione volumetrica della fase aeriforme (frazione di vuoto) espressa come rapporto tra il volume occupato dalla fase aeriforme V_g e il volume totale di riferimento ($V_l + V_g$):

$$\alpha_v = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (1)$$

Questa grandezza può anche intendersi riferita ad un'area e quindi essere definita come:

$$\alpha_a = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (2)$$

dove A_g ed A_l sono rispettivamente le sezioni occupate dalle fasi gas e liquida nella sezione del condotto.

La frazione di vuoto può essere riferita a una linea quando è riferita a una corda del condotto e si ha:

$$\alpha_l = \frac{l_g}{l_g + l_l} \quad (3)$$

dove l_g ed l_l sono rispettivamente le lunghezze occupate dalla fase gas e dalla fase liquida lungo una corda.

Infine si considera la frazione di vuoto in un punto come rapporto tra il tempo di permanenza della fase aeriforme t_g ed il totale tempo di osservazione $t_{osservazione}$:

$$\alpha_t = \frac{t_g}{t_{osservazione}} \quad (4)$$

Le principali tecniche di misura di questa grandezza prevedono l'utilizzo di: sonde ottiche (basate sulla variazione dell'indice di rifrazione), sonde a impedenza elettrica ecc. sono state discusse nel documento sullo stato dell'arte [9] preparato nell'ambito del PAR 2007-08.

Dalla misura dell'impedenza elettrica vista tra elettrodi e con l'ausilio di adeguati modelli interpretativi si può stimare il valore istantaneo della frazione di vuoto nella regione osservata dagli elettrodi.

Il più importante requisito per l'utilizzo di una sonda a impedenza elettrica è che le due fasi presentino proprietà elettriche sensibilmente diverse l'una dall'altra; in questo modo a una variazione della distribuzione delle fasi genera una variazione dell'impedenza elettrica. L'elettronica del processo di misura genera dei segnali funzioni della resistenza e capacità elettrica del deflusso visto dagli elettrodi la cui analisi permette di stimare la frazione di vuoto.

In questo studio si presenta l'attività sperimentale svolta per caratterizzare il comportamento del "Wire Mesh Sensor System" in un condotto orizzontale di diametro interno 19 mm strumentato con un sensore con 16 x 16 elettrodi in cui fluisce una miscela aria-acqua a temperatura ambiente.

Si presenta la strumentazione utilizzata, la metodologia di prova seguita, i dati sperimentali acquisiti e l'elaborazione svolta con la discussione dei diversi profili della "frazione di vuoto" nello spazio e nel tempo.

3. WIRE MESH SENSOR

Il Wire Mesh Sensor (WMS) è uno strumento composto da un sensore (griglia di elettrodi interni al condotto) e da un'elettronica complessa che consente di misurare un segnale elettrico proporzionale al valore di conduttività locale. Il sensore sperimentato (WMS o Wire Mesh Sensor) è riportato in Fig. 1.

Lo strumento utilizzato (WMS200) è stato sviluppato da Prasser (1998) e prodotto presso la Teletronic Rossendorf GmbH, Dresden, per il circuito di prova del Politecnico di Torino. Questo strumento consente di studiare fluidi la cui conduttività elettrica è compresa tra 0.5 e 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Il sensore (Fig. 1) è stato progettato per coprire interamente la sezione del condotto ($D_i = 19 \text{ mm}$). È composto da due file di elettrodi, equidistanti tra loro, che individuano due piani paralleli posti a una distanza di 1.5 mm . Il primo piano funge da trasmettitore mentre il secondo da ricevitore. su ogni piano sono presenti 16 elettrodi paralleli ($D_{\text{wire}} = 70 \text{ }\mu\text{m}$ e passo pari a 1.31 mm). Gli elettrodi sono perpendicolari tra di loro. Per ogni coppia di elettrodi è generato un segnale proporzionale alla conduttività elettrica tra gli elettrodi.

Nel caso di deflusso aria-acqua, quando la fase conduttiva (acqua) è presente tra i due piani degli elettrodi si avrà un segnale proporzionale all'inverso della resistenza elettrica del fluido al passaggio della corrente, mentre in presenza di solo aria non si ha passaggio di corrente tra gli elettrodi.

Con un diametro dei fili pari a $70 \text{ }\mu\text{m}$ circa il 5.4% della sezione è occupato dal sensore, mentre il restante 95% è superficie libera.

Sebbene il sensore sia parzialmente intrusivo, questo svantaggio è compensato dall'alta risoluzione temporale e spaziale e dalla semplicità di analisi, che consente di effettuare misure dirette senza la necessità di algoritmi di ricostruzione dell'immagine come richiesto dalle tomografie classiche.

Il sensore è montato tra due flange in PVC adeguate all'installazione nel circuito di prova.

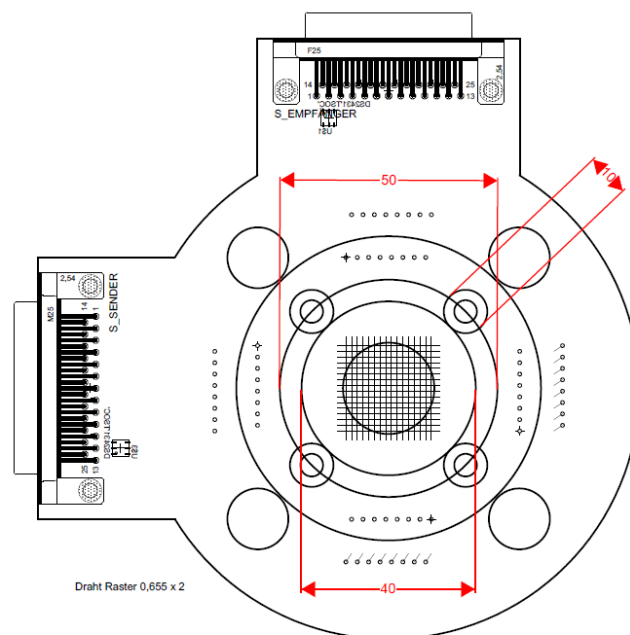


Fig. 1: Sensore 16x16 WMS200

Gli elettrodi del primo piano sono connessi ad un modulo elettronico detto trasmettitore (Fig. 2a), mentre gli elettrodi del secondo piano sono connessi ad un modulo detto ricevitore (Fig. 2b).

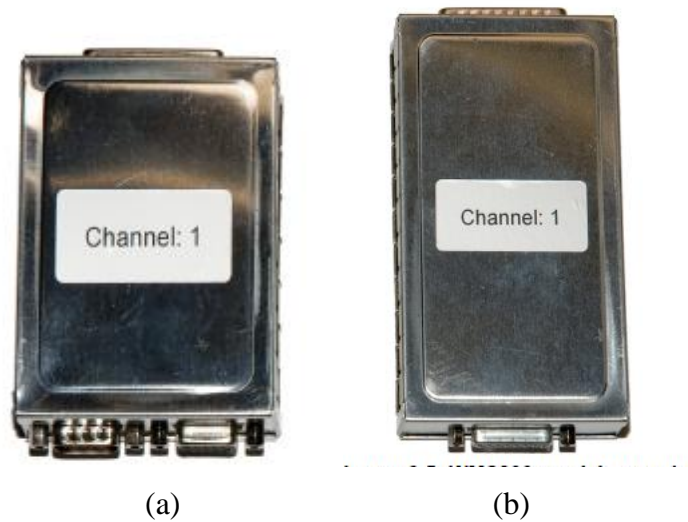


Fig. 2: Modulo Trasmettitore (a) e Modulo ricevitore (b)

I due moduli connettono il sensore (Fig. 1) e il modulo che costituisce l'elettronica di base (Fig. 3).



Fig. 3: WMS200 Modulo elettronico di base

L'elettronica del WMS200 [10] è composta dal modulo di base (*basic device*), le cui caratteristiche sono riportate in Tab. 1, e dai moduli per la trasmissione (Tab. 2) e per la ricezione del segnale (Tab. 4).

Il modulo di base è composto da una scheda principale (master card), da tre schede per l'alimentazione di potenza, da un modulo di input/output e da una scheda asservita (slave card).

Numero degli elettrodi in trasmissione	16
Numero degli elettrodi in ricezione	16
Massima frequenza nel processo di misura con 16 elettrodi in trasmissione	10 kHz
Memoria interna per i dati	8 GBytes
Massimo tempo di registrazione	30 minuti
Interfaccia con personal computer (PC)	USB 2.0
input per un trigger esterno (protocollo)	RS 485 3V isolato
output trigger esterno (protocollo)	RS 485 3V

Tab. 1: Specifiche tecniche del modulo elettronico di Base del Politecnico di Torino

Il modulo elettronico di base è estendibile sino a 8 moduli in ricezione e trasmissione con 8 schede asservite e due schede per le operazioni di input-output.

Il modulo di trasmissione consente di alimentare al massimo 16 elettrodi con un impulso di tensione di ± 3 volt.

La scheda principale ha la funzione di gestire la comunicazione con il PC (via USB) e con le altre schede. Ha inoltre la funzione di gestire il processo di misura tramite un connettore a 15 pin che alimenta il modulo trasmettitore (canale 1), il master infatti attiva il modulo inviando il rispettivo indirizzo al serial bus. Le specifiche tecniche del modulo trasmettitore sono riportate in Tab. 2.

Specification:

max. connectable transmitting electrodes:	16
per Jumper selectable address range:	1-8
transmit pulse voltage:	± 3 V
max. transmit pulse current (± 3 V):	$\sim \pm 70$ mA
max. cable length from basic devise to the 1. module	3.0 Meters
max. cable length between the modules	1.5 Meters
size:	90 x 68 x 27 mm
weight:	150 g

Tab. 2: Caratteristiche Modulo trasmettitore

La Fig. 4 riporta uno schema semplificato del funzionamento del sistema. Le schede di potenza con una alimentazione in tensione continua tra -3V e +3V sono connesse al modulo trasmettitore tramite lo switch a due posizioni SP (Fig. 4). Il processo di commutazione di SP è rappresentato in Fig. 5. In un ciclo completo di commutazione si genera l'impulso di tensione trasmesso U_{T2} . La durata totale dell'impulso di tensione è pari alla durata della fase di chiusura di uno degli interruttori S1 – S4 che alimentano gli amplificatori operazionali connessi agli elettrodi trasmittenti. Un multiplexer

gestisce il processo di apertura e chiusura di questi interruttori. In questa fase si genera nell'elettrodo di ricezione un impulso di corrente I_{R3} che alimenta un amplificatore operazionale la cui uscita alimenta un circuito "Sample and Hold" la cui uscita è digitalizzata con un convertitore analogico-digitale ADC.

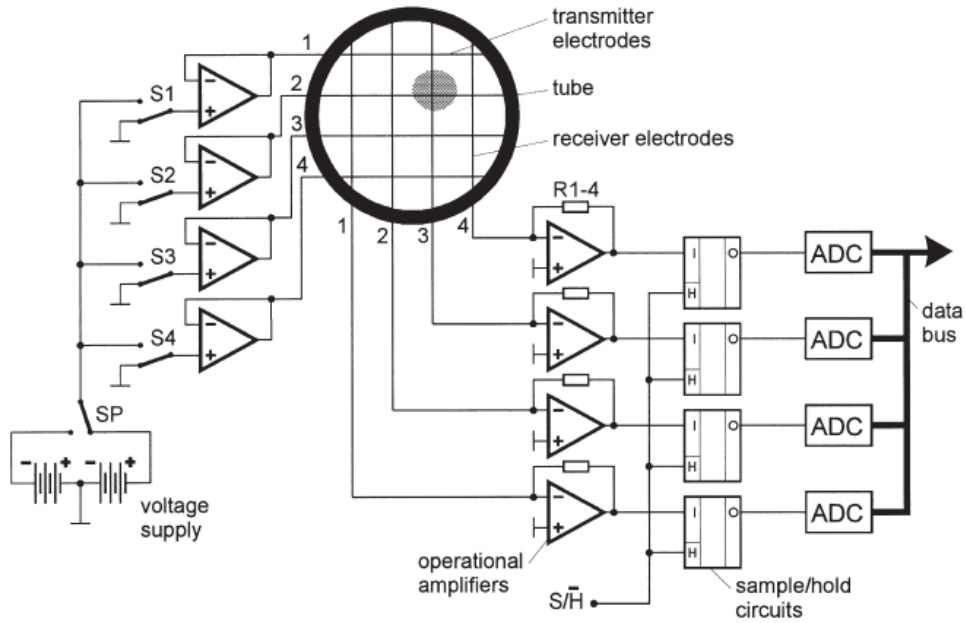


Fig. 1. Simplified scheme of the electrode-mesh device.

Fig. 4: Schema di funzionamento dello strumento. Prasser et al. (1998)

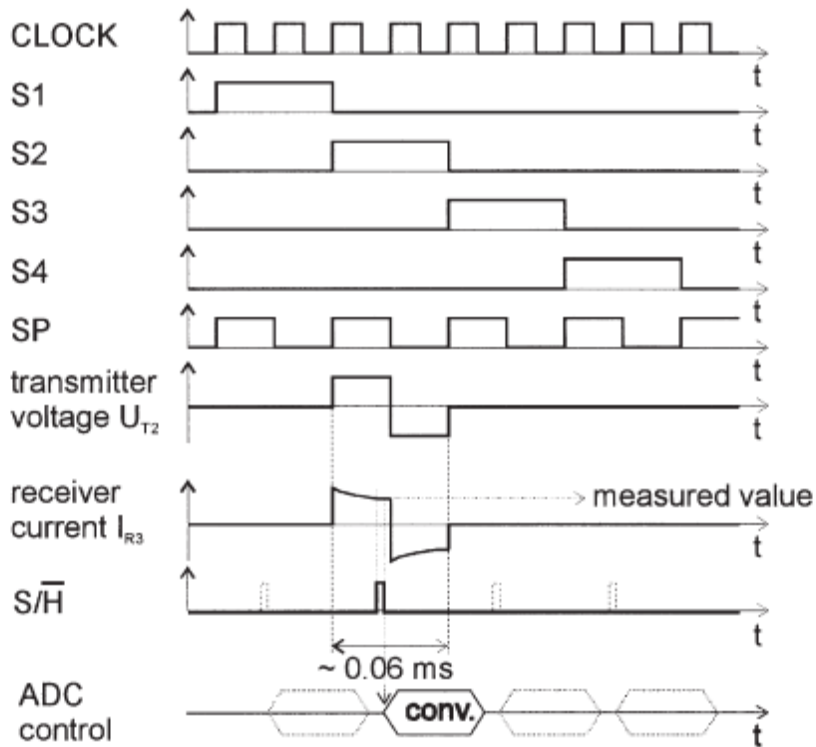


Fig. 5: Diagramma di trasmissione e ricezione del segnale

In sintesi si ha che in modo seriale la scheda master gestisce il commutatore SP trasmettendo un impulso di ampiezza $\pm 3V$ (Fig. 6); quando a un elettrodo è inviato il segnale di eccitazione, tutti gli altri elettrodi del piano trasmettitore vengono mantenuti al potenziale di terra.

L'eccitazione degli elettrodi viene effettuata utilizzando un impulso di forma circa rettangolare composto da un semi-periodo positivo e da un semi-periodo negativo di uguale ampiezza e lunghezza; in questo modo, si evita il problema relativo all'idrolisi. La Fig. 6 illustra chiaramente la lunghezza temporale delle fasi di tensione positiva e negativa ed anche gli intervalli di tempo all'interno dei quali si effettua la conversione analogico-digitale dei segnali.

Il segno dell'impulso è invertito precisamente nel mezzo del periodo attivo dei fili.

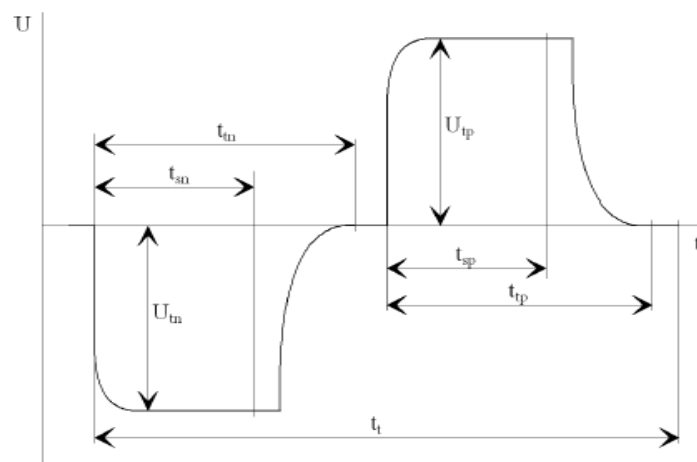


Image 5: transmit pulse timing parameters

- U_{tp} = Transmitting voltage of the positive half wave
- U_{tn} = Transmitting voltage of the negative half wave
- t_{tp} = Transmitting pulse length of the positive half wave
- t_{tn} = Transmitting pulse length of the negative half wave
- t_t = Transmitting pulse length
- t_{sp} = ADC sample point for the positive value
- t_{sn} = ADC sample point for the negative value

Long or short transmitting pulse length is selectable

Fig. 6: Impulso di eccitazione degli elettrodi

I tempi e le ampiezze caratteristiche del segnale di eccitazione sono riportati in Tab. 3.

Il processo di misura vero e proprio con acquisizione dei dati si ha nelle fasi di durata t_{sp} e t_{sn} .

	Pulse length short	Pulse length long	Unit
t_{tp}	~2,2	~4,5	μs
t_{tn}	~2,2	~4,5	μs
t_t	~6,0	~12,0	μs
t_{sp}	~2,2	~4,1	μs
t_{sn}	~2,2	~4,1	μs

Table 1: WMS200 transmitting pulse timing

	Transmitting voltage	Unit
U_{tp}	+3,0 (+0.5 to +4.0 changeable by the manufacturer)	V
U_{tn}	-3,0 (-0.5 to -4.0 changeable by the manufacturer)	V

Tab. 3: Tempi caratteristici impulso.

Il modulo trasmettitore è connesso al sensore con un connettore a 25 pin che alimenta in serie i 16 elettrodi (pin: 3-10; pin: 16-23). La frequenza del segnale trasmesso dipende dalla durata dell'impulso; per impulsi brevi (6 μs) la frequenza è di circa 166 kHz; la massima corrente erogata durante l'impulso è pari a ± 70 mA.

La scheda di I/O è connessa al modulo di ricezione del segnale, e comprende un pre-amplificatore, un amplificatore (main) per l'ADC e una unità di controllo. Il connettore è a 25 pin (pin:4-11 e pin:16-23). Il modulo di ricezione è a sua volta connesso a una scheda asservita (slave card) che immagazzina le misure effettuate in una scheda di memoria (CF card). Le specifiche tecniche del modulo di ricezione sono riportate in Tab. 4.

Specification:

max. connectable transmitting electrodes:	16
pre gain steps:	255
main gain steps: (gain range independent for each module)	255
max. input current: by min. gain: by max. gain:	1mA 300nA
ADC resolution:	12 Bit ADC count 0..4079 4080..4095 reserved
max. cable length from basic device to module	3 Meters
size:	130 x 68 x 27 mm
weight:	250 g

Tab. 4: Caratteristiche Modulo ricevitore

Il guadagno relativo al pre-amplificatore e all'amplificatore principale, può essere modificato, attraverso un potenziometro digitale con 255 steps, questo valore deve essere regolato in modo tale che il massimo valore della risoluzione ADC non superi il 90% del valore massimo (4079). La risoluzione di un convertitore analogico digitale ADC indica il numero di valori discreti che può rappresentare in forma binaria ed è usualmente espressa in Bit. Nel caso in esame, il convertitore codifica un segnale analogico in un formato a 12 bit e quindi si possono rappresentare solo 4096 livelli discreti ($2^{12} = 4096$).

La corrente che fluisce nell'elettrodo ricevente è trasformata in segnale di tensione mediante un amplificatore operazionale e questo è campionato tramite circuiti individuali sample/hold.

Segue la conversione analogico/digitale ed i dati vengono memorizzati nella scheda CFC (compact flash card) separatamente per ogni elettrodo ricevitore.

Questa procedura è ripetuta per tutti gli elettrodi del trasmettitore (16), di modo che la distribuzione della conducibilità elettrica del fluido nella sezione è ottenuta riga per riga. Alla fine, si ottiene una matrice 2D (16 x 16) di valori proporzionali ai valori di conducibilità elettrica riferita alla distanza minima tra l'elettrodo trasmettitore e gli elettrodi ricevitori.

Per evitare fenomeni di cross-talk tra gli elettrodi adiacenti a quelli attivi, e quindi la presenza di correnti parassite che falsificherebbero i segnali misurati diminuendo la risoluzione, sia le uscite del trasmettitore che gli ingressi del ricevitore sono stati progettati con un valore di impedenza molto inferiore a quella del fluido.

Questo garantisce che la differenza di potenziale di tutti gli elettrodi (riceventi e trasmettenti) eccetto che l'elettrodo trasmettitore attivato, non si possa discostare da zero per qualsiasi valore di corrente.

È possibile operare, durante la sperimentazione, secondo due differenti configurazioni: **online e off-line**. Per campionare ad alta frequenza (frequenza massima di 10000 frames/s per un periodo massimo di misura di 1966 s) è necessario impostare la misura in modalità off-line.

Nella modalità on-line, il numero di immagini per secondo che possono essere visualizzate è di fatto limitato dalla capacità dell'interfaccia tra l'unità di acquisizione del sensore e il PC. L'impiego "on line" dello strumento è di scarso interesse in quanto consente di avere delle indicazioni sulla distribuzione delle fasi in una forma che si ritiene qualitativa. Nell'impiego off-line la registrazione ad elevata frequenza della matrice 2D della conducibilità elettrica consente di effettuare un post-processamento dei dati con la ricostruzione dei deflussi in termini di distribuzione delle fasi e quindi di frazione di vuoto in un contesto di definiti modelli interpretativi.

Un tipico file di acquisizione (estensione .mes), memorizzato in forma binaria, è elaborato dal programma di conversione dati WMS-Data-Converter, consente di estrarre le seguenti informazioni:

- versione del software di acquisizione
- data e ora del processo di misura
- frequenza di campionamento utilizzata (frames/s)
- numero di frames acquisiti (ad ogni frame corrisponde per il sensore utilizzato una matrice 16x16 di valori)
- tipo di impulso inviato (short o long)
- guadagno dell'amplificatore e del pre-amplificatore.

Le prove sono state effettuate utilizzando una frequenza di campionamento di 1250 frames/s (256 punti/s) per un periodo di 30 s, in modalità off-line. Il programma WMS-Data-Converter genera un file con estensione “.dat” di tipo binario in cui i dati sono memorizzati in sequenza con parole a 16 bit seguendo l'ordine prima colonna, prima riga, primo frame sino alla sedicesima colonna/sedicesima riga, primo frame per seguire con la stessa logica per il secondo frame e così via. Definito il numero di frame totale N_{Fi} ed il numero degli elettrodi del sensore N_{el} per piano, il numero totale dei dati memorizzati N_t è pari a:

$$N_t = N_{Fi} * N_{el} * N_{el}$$

Ogni parola rappresenta un numero intero compreso tra 0 e 4079.

4. SEZIONE DI PROVA, CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE

Il condotto in cui fluisce il deflusso bifase (Fig. 7) è composto da un condotto con sviluppo prevalentemente orizzontale di circa 5 m di lunghezza totale; la regione in cui è montato la sezione di prova vera e propria è posta a valle di un gomito a 90° a circa 3500 mm dall'ingresso del condotto. Il Wire Mesh Sensor è installato tra due condotti in plexiglas di lunghezza 600 mm ciascuno e diametro interno 19 mm.

La prima parte del condotto orizzontale è composta da due tratti in plexiglas aventi ognuno una lunghezza pari a 1200 mm e un diametro interno di 19 mm ($D_e = 25$ mm), e da uno Spool Piece, interposto tra questi, composto da una turbina (Hoffer), un drag disk (Ramapo MARK V) e da una sonda concava a impedenza composta da due piastre di rame, montata esternamente al condotto.

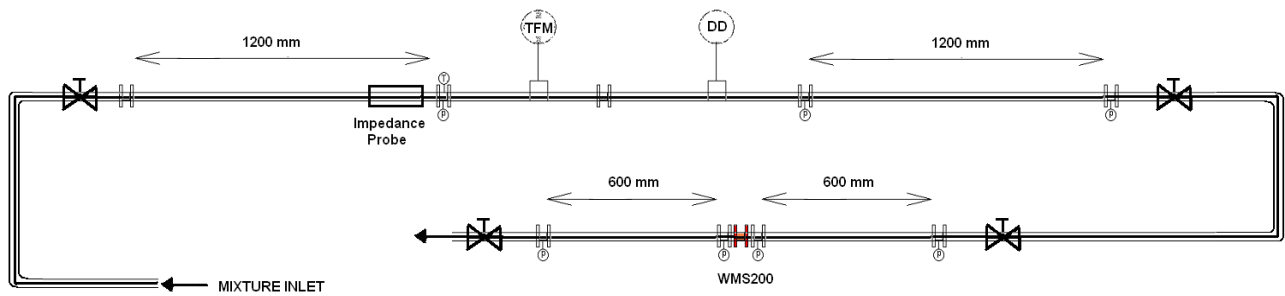


Fig. 7: Schema Test Section

Viene misurata la pressione nel circuito attraverso con un trasduttore di pressione assoluta Rosemount 3051/1 nel range 0.5-10 bar. Il circuito opera a una pressione compresa tra la pressione atmosferica e una pressione massima di 2,5 bar, a seconda delle condizioni di prova.

Il deflusso bifase è scaricato in un ambiente a pressione atmosferica.

Il circuito è dotato di valvole d' intercettazione a chiusura rapida che consentono di valutare il grado di vuoto volumetrico medio relativo a una lunghezza di 1300 mm o 2600 mm e di varie prese di pressione che consentono la misura della pressione assoluta e differenziale della miscela.

L'impianto sperimentale in cui è montata la sezione di prova è composto dal circuito di alimentazione dell'acqua, dal circuito di alimentazione dell'aria, e dalla strumentazione necessaria per le misure di portata dei fluidi monofase, delle pressioni e delle temperature.

L'alimentazione dell'aria è assicurata dalla rete di servizio dell'aria compressa (pressione di circa 6 bar) e da un riduttore di pressione o attraverso un ventilatore che fornisce alte portate di fluido a bassa pressione, regolato tramite un inverter.

L'alimentazione dell'acqua è assicurata dal circuito (Fig. 8) costituito da una vasca, da due pompe esercite a numero di giri variabile, grazie all'impiego di un inverter, e da un collettore che distribuisce l'acqua ai circuiti di prova. La portata d'acqua può essere ottenuta sia utilizzando le pompe sia utilizzando il battente costante della vasca.

La portata di liquido viene misurata mediante un misuratore elettromagnetico (ASA AW6 – 2900/1/B/1/AA), la cui scala è compresa tra 0,9 e 36 m³/h, con un incertezza di $\pm 0,5$ v.l, e da un banco di rotametri aventi i seguenti range di misura:

- 0-100 l/h;
- 100-400 l/h

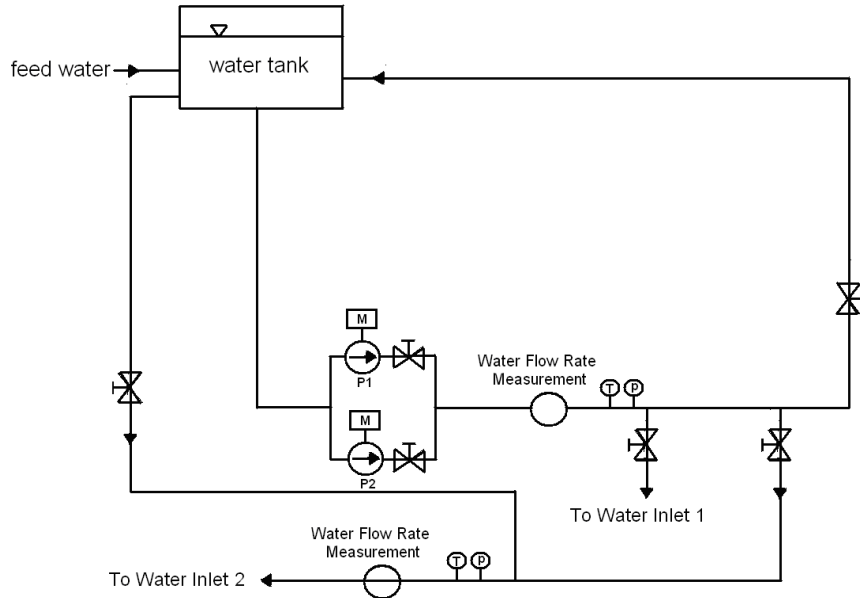


Fig. 8: Sistema per l'alimentazione e la misura della portata del liquido

La portata d'aria è misurata, prima dell'invio al miscelatore, con un banco di rotametri aventi i seguenti campi di misura:

- 50-300 l/h;
- 500-5000 l/h;
- 6300 e 63000 NI/h.

I rotametri hanno tutti la scala riferita all'aria alle condizioni standard di $p = 1.013 \text{ bar}$ e $T = 20^\circ\text{C}$.

I rotametri sono caratterizzati da un incertezza di misura pari al 2% del valore di fondo scala.

Poiché i rotametri sono eserciti alla pressione p , regolata con un riduttore di pressione, e alla temperatura T , pari alla temperatura ambiente, le portate indicate dalla scala devono essere convertite considerando le effettive condizioni termodinamiche dell'aria.

La portata volumetrica letta nel rotametro, è espressa in standard l/h tenendo conto delle effettive condizioni attraverso la seguente formula:

$$Q(p_0, T_0) = Q_{ASA}(p, T) \sqrt{\frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}} \quad (5)$$

dove $p_0 = 1.013 \text{ bar}$ e $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

La portata massica si ottiene quindi moltiplicando per la densità (calcolata in condizioni standard) la portata volumetrica.

La miscela bifase viene preparata in un miscelatore che alimenta un condotto avente lunghezza di 1800 mm e diametro interno 21 mm; nel miscelatore l'aria è introdotta in direzione radiale, mentre l'acqua può essere introdotta sia in direzione radiale che assiale in relazione alla portata che si desidera realizzare.

5. MATRICE SPERIMENTALE

Diverse prove (Tab. 5) prove sono state effettuate utilizzando una miscela bifase aria-acqua ; la portata di aria è stata variata da $8.3 \cdot 10^{-5}$ a 0.00393 kg/s, mentre la portata d'acqua è stata variata tra 0.028 e 0.51 kg/s.

RUN	W_{air} [kg/s]	W_{water} [kg/s]	p media circ. [bar]	x [-]	J_g [m/s]	J_l [m/s]
1	0.000817	0.027778	1	0.028564	1.986	0.080
2	0.002008	0.027778	1.14	0.067404	4.283	0.080
3	0.00391	0.027778	1.17	0.123394	8.128	0.080
4	8.3E-05	0.269444	1.25	0.000308	0.162	0.779
5	0.000817	0.305556	1.47	0.002666	1.351	0.883
6	0.002008	0.269444	1.66	0.007396	2.941	0.779
7	8.3E-05	0.511944	1.61	0.000162	0.125	1.479
8	0.000408	0.423611	1.62	0.000963	0.613	1.224
9	0.000817	0.369444	1.62	0.002206	1.226	1.068
10	0.002008	0.277778	1.6	0.007176	3.052	0.803
11	0.003184	0.277778	1.55	0.011334	4.100	0.803
12	0.00391	0.083333	1.32	0.044818	7.204	0.241
13	8.3E-05	0.111111	1.09	0.000747	0.185	0.321
14	0.000412	0.111111	1.13	0.003692	0.886	0.321
15	0.000817	0.111111	1.16	0.007297	1.712	0.321
16	0.002016	0.111111	1.22	0.017823	4.019	0.321
17	0.00391	0.111111	1.3	0.033994	7.315	0.321
18	8.3E-05	0.434167	1.41	0.000191	0.143	1.255
19	0.000412	0.413889	1.52	0.000994	0.659	1.196
20	0.00081	0.425	1.72	0.001902	1.145	1.228
21	0.002008	0.430556	2.13	0.004641	2.292	1.244
22	0.003928	0.425	2.58	0.009157	3.703	1.228

Tab. 5: Matrice prove sperimentali

Le prove sono state condotte mantenendo costante la portata d'acqua e variando la portata d'aria. La pressione del deflusso, misurata all'ingresso del condotto orizzontale, aumenta con la portata totale fluente nella sezione di prova. Le prove sono state caratterizzate in termini di titolo x

(variabile tra circa 0.002 e 0.12) e di velocità superficiali J_g e J_l . Il tipo di flow pattern è variato dallo stratificato allo slug.

Nella realizzazione della matrice sperimentale è importante prendere nota della orientazione dei fili del wire-mesh sensor rispetto all'asse del condotto. Nelle prove effettuate i fili del trasmettitore avevano una giacitura orizzontale mentre quelli del ricevitore avevano una giacitura verticale.

6. ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI E ANALISI RISULTATI

Il WMS è costituito da due piani su ognuno dei quali giacciono 16 elettrodi, posizionati perpendicolarmente alla direzione del deflusso. Gli elettrodi sono perpendicolari tra loro.

Il valore locale istantaneo di conducibilità elettrica è misurato direttamente tra tutte le coppie di fili. Ciò si traduce in 16×16 punti di misura, che sono equamente distribuiti sulla sezione trasversale. Il concetto di frame associato al processo di misura si riduce quindi ad una matrice bidimensionale di 256 elementi (16×16) i cui valori sono costituiti da un numero intero compreso tra zero e 4079 e proporzionale alla conducibilità elettrica del fluido osservato dalla singola coppia di elettrodi.

Il file di acquisizione dei dati sperimentali, realizzato con una frequenza di acquisizione definita dall'operatore, è quindi rappresentabile con una matrice tridimensionale $V(i,j,k)$ in cui per esempio l'indice k rappresenta il numero del frame e quindi il tempo, l'indice i rappresenta la riga ovvero l'elettrodo trasmittente mentre l'indice j rappresenta l'elettrodo ricevente.

Rappresentando in un piano gli elettrodi di trasmissione e di ricezione si hanno 256 punti di intersezione e ad ognuno di questi può essere associata una porzione della sezione del condotto.

In Fig. 9 si riporta l'interfaccia grafica del programma di visualizzazione e conversione dei dati (WMS Data-Converter), fornito dalla Teletronic Rossendorf GmbH, applicata file sperimentale Q100_1843_300.mes generato nel corso di una sessione di prova con il WMS200. La prova si riferisce alla portata d'aria di 100 NI/h indicata dalla scala del rotametro, 1843 è riferito alla portata d'acqua in litri/h misurata con il misuratore elettromagnetico, 300 è riferito alla durata della fase di acquisizione in secondi. La registrazione è stata effettuata con una frequenza di campionamento di 1250 Hz e quindi per 375000 frame acquisiti con un preguadagno di 24 e di guadagno principale 1.

Nell'interfaccia grafica le righe sono rappresentate da 0 a 15 dall'alto verso il basso mentre le colonne sono indicate da 0 a 15 da sinistra verso destra. Sono individuate 256 celle ognuna definita dalla coppia (riga,colonna) a cui è associato il valore percentuale del segnale massimo osservabile (4079) insieme ad una scala di colore. Con il cursore del mouse è possibile leggere le informazioni

sulla cella. Al valore massimo del segnale corrisponde tutta acqua, mentre al valore minimo tutta aria.

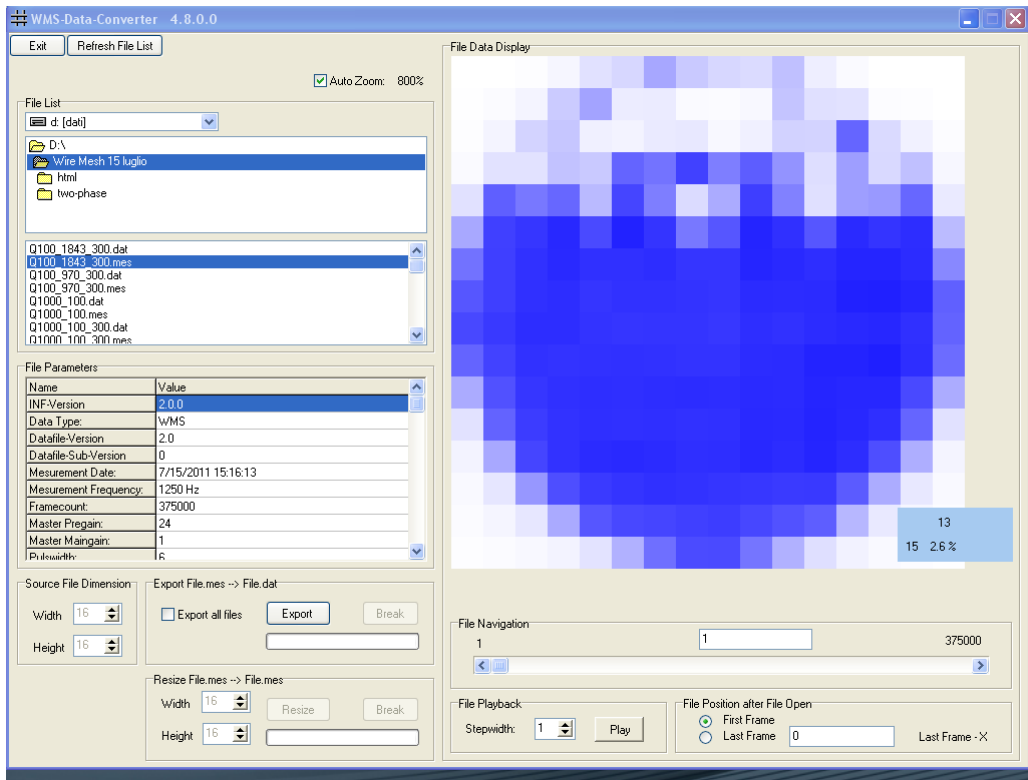


Fig. 9: Interfaccia grafica del WMS-Data-Converter, versione 4.8.0.0

Il file, esportato dal WMS-Data-Converter, può essere facilmente letto per esempio in ambiente Matlab[®] ed analizzato considerando il comportamento dei segnali rispetto al tempo e allo spazio; quindi è possibile studiare il comportamento istantaneo, in media e gli aspetti stocastici dei segnali generati dal “wire mesh sensor system”.

Per il diametro del condotto di 19 mm l’adozione di 16 x16 elettrodi si traduce in una risoluzione spaziale di circa 1.3 mm, che equivale al passo dei fili degli elettrodi. Dei 256 punti 242, sono quelli interni al condotto, in quanto alcuni punti si trovano negli angoli o al di fuori della sezione circolare.

La scelta di un sensore 16x16, in un condotto avente un diametro interno pari a 19 mm, consente di ottenere un’elevata risoluzione spaziale e consente di studiare la presenza di bolle/gocce con un diametro maggiore di 1.3 mm.

La procedura di misura utilizzata è di seguito descritta.

Il circuito di prova viene interamente riempito di acqua, viene acceso lo strumento e lanciato il software del sensore. In modalità online si regola il guadagno in modo tale che il massimo valore

non superi il 90% del valore massimo possibile (4079). Si crea quindi una maschera che consente di attivare o disattivare i punti della griglia d'interesse, e si disattiva la modalità on-line.

Scelta quindi la frequenza e il tempo di campionamento si procede con la misura.

Nella procedura di calibrazione, eseguita prima di ogni set di misure, vengono registrati un certo numero di frames con il condotto pieno d'acqua in modo da generare la matrice di riferimento dei valori di conducibilità da utilizzare nei processi di normalizzazione nell'analisi delle misure in deflusso bifase. In Fig. 10 si riporta la matrice media 2D di un certo numero di frame di una prova in tutta acqua; essa è stata rappresentata in ambiente Matlab®.

La calibrazione dello strumento con acqua consente di evidenziare il valore massimo del segnale in ogni punto della griglia. Infatti, il valore del guadagno, a causa delle tolleranze di fabbricazione può differire leggermente tra i vari elettrodi. In ambiente Matlab® gli elettrodi sono numerati da 1 a 16.

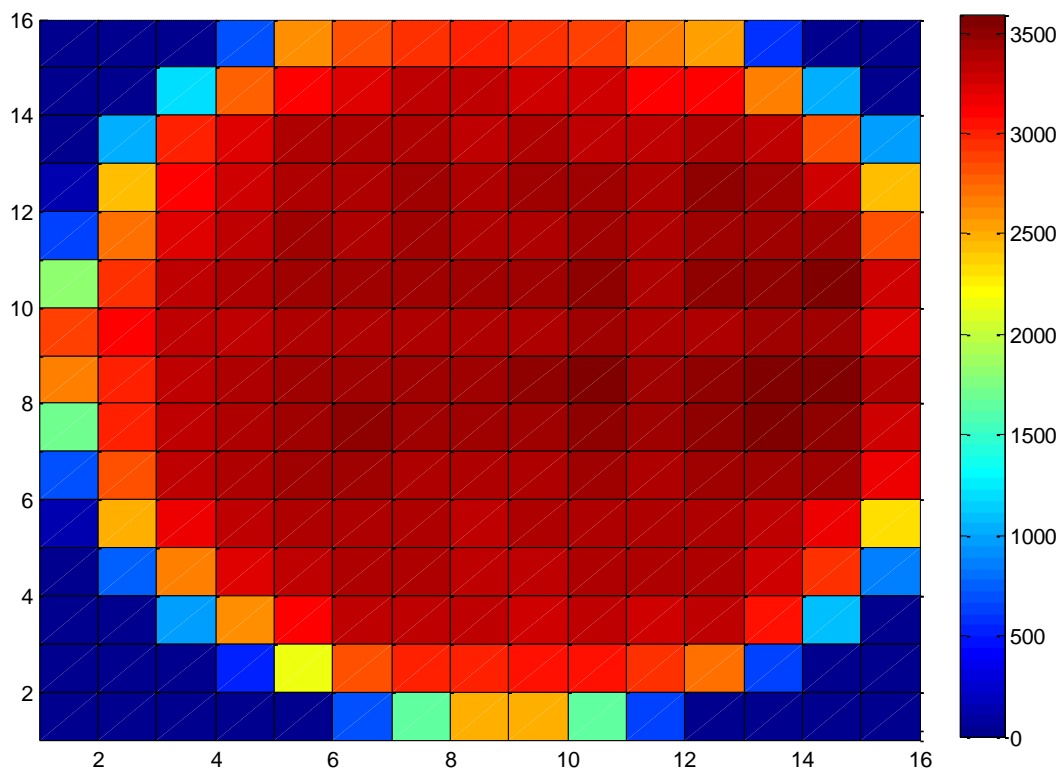


Fig. 10: Frame di riferimento con condotto pieno d'acqua

In Fig. 11 è riportato il profilo digitalizzato del segnale, durante la misura statica con condotto pieno d'acqua con riferimento all'elettrodo trasmittente ($j=8$) per tutti gli altri elettrodi riceventi; vengono evidenziati gli effetti di bordo (punti della griglia che si trovano fuori dal condotto o comunque influenzati dalla parete del tubo).

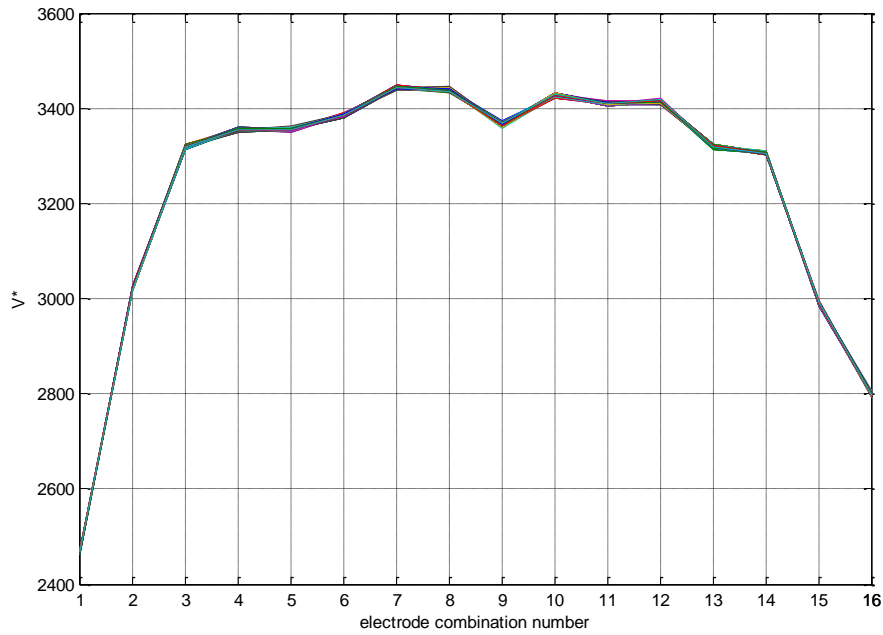


Fig. 11: Profilo del segnale nel condotto pieno d'acqua (j=8, elettrodo trasmittente)

Nelle prove svolte, vengono imposte le portate di aria e acqua e viene misurata la pressione media nel circuito.

In Fig. 12 si riporta la mappa, elaborata in ambiente Matlab[®], per i frames 100 e 2000 della prova Q100_1000_200 in cui si osserva la caratteristica stratificazione del deflusso.

I valori rappresentati sono quelli non normalizzati.

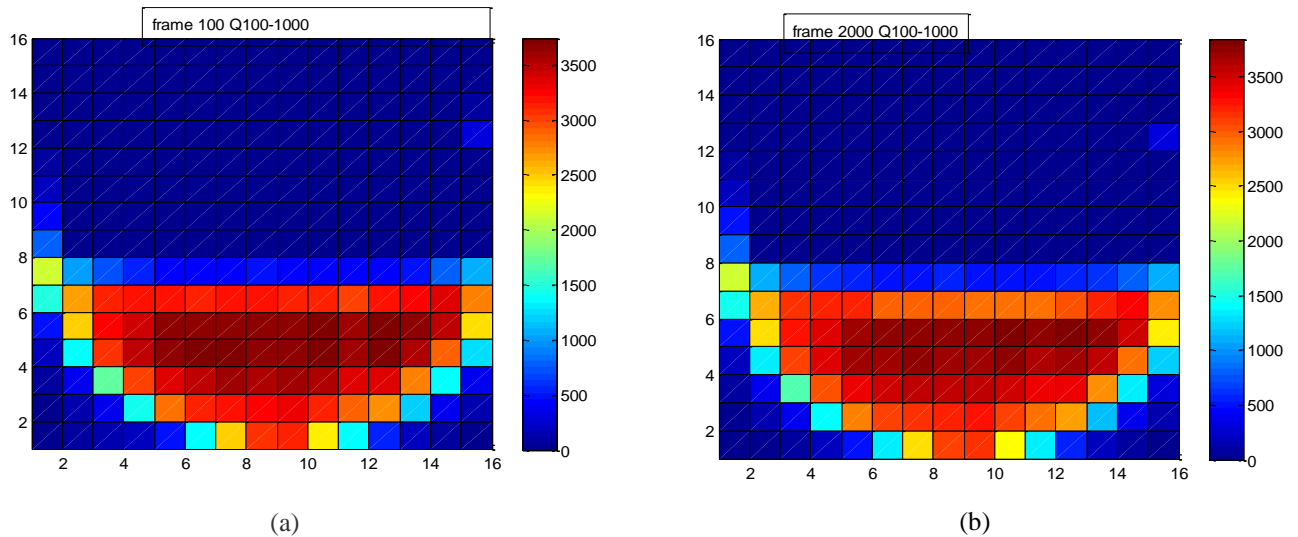


Fig. 12: Esempi di mappe di stratificazione determinate sulla base dei dati sperimentali non normalizzati.

6.1 Calcolo della frazione di vuoto puntuale, lineare, areica, e volumetrica

Le matrici tridimensionali dei segnali, contengono i valori misurati in funzione degli indici i, j e k . Per esempio i e j possono rappresentare le posizioni spaziali, mentre k è il frame ovvero un indice temporale (funzione della frequenza di acquisizione utilizzata).

Le matrici acquisite durante la misurazione del flusso bifase si possono trasformare in matrici della frazione di vuoto assumendo una proporzionalità inversa tra la frazione di vuoto locale e la conducibilità elettrica.

È possibile quindi utilizzare i valori misurati per ricostruire le frazioni istantanee di aria e acqua in ogni punto del condotto, in una linea (corda) o nella sezione, mediando opportunamente i segnali acquisiti; è inoltre possibile ricavare le frazioni temporali medie di persistenza di una fase riferite ad un punto, una corda o una superficie. Sia N_{frame} il numero totale di frame acquisiti.

Un primo tipo di analisi può riguardare l'andamento temporale del segnale normalizzato del WMS per ogni coppia di elettrodi basato su una media mobile su $2*k_{max}$ frame centrata su ogni frame a partire da k_{max} sino a $N_{frame}-k_{max}$. Si ha quindi la frazione locale mediata :

$$\bar{\alpha}_{ijk} = \frac{1}{k_{max}} \cdot \sum_{k=k-k_{max}}^{k=k+k_{max}} \alpha(i, j, k) \quad (6)$$

Per $2k_{max}=N_{frame}$ si ha un valore medio su tutti i frames.

In presenza di un deflusso con elevate conducibilità elettrica per l'acqua e in un regime di tipo stratificato è possibile introdurre due valori soglia V_1 e V_2 di conducibilità elettrica per definire uno stato di tutta acqua ($V>V_1$) ed uno stato di tutta aria ($V<V_2$) sulla base delle misure osservate con deflussi monofase ed anche uno stato bifase o di transizione per $V_2<V<V_1$. Per ogni cella associata alla coppia (i,j) si determina la frazione di tempo di persistenza della fase rispetto al tempo totale di osservazione di tutti i frames con la:

$$\bar{\alpha}_{ij} = \frac{1}{T_{max}} \cdot \sum_{k=1}^{K_{max}} \frac{1}{f_c} t_{air}(i, j, k) \quad (7)$$

dove f_c è la frequenza di campionamento dei frames. Il valore di $t_{air}(i,j,k)$ è determinato considerando il segnale associato ad ogni nodo della mesh e confrontandolo con dei valori di soglia.

Osservando che il segnale digitalizzato varia tra 0 e 4079 e che con i test con tutta aria non si è mai osservato un valore maggiore di 150, si è adottato questo valore per V_2 come soglia di riferimento. Per quanto riguarda V_1 un criterio per la scelta è legato all'osservazione che il WMS system è gestito con un guadagno variabile in modo da non superare in media il 90% del valore massimo misurabile e quindi V_1 può essere assunto pari a circa 3550. Con queste considerazioni si riesce a determinare anche la frazione di tempo di persistenza della fase liquida e la frazione di tempo in regime bifase.

Un altro modo che si può utilizzare per interpretare i risultati è di considerare la frazione areica media ottenuta sull'intera sezione su $2k_{max}$ frames come:

$$\bar{\alpha}(k) = \frac{1}{2k_{max}} \cdot \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} \sum_{l=k-k_{max}}^{l=k+k_{max}} a(i, j) \cdot \alpha(i, j, k) \quad (8)$$

Dove i e j rappresentano il numero di elettrodi, e $a(i, j)$ indicano i pesi geometrici dei punti della griglia ricavati come riportato nella Fig. 13 in accordo alle procedure proposte da Prasser et al. [11]

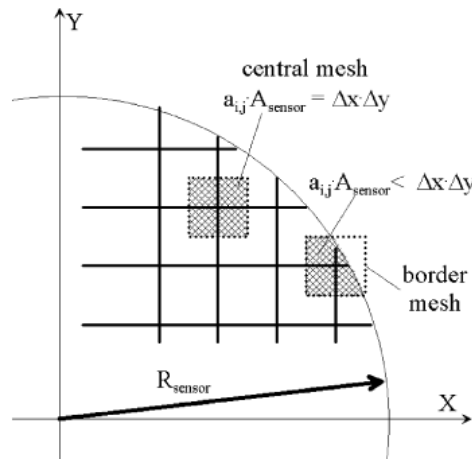


Fig. 13: Calcolo dei pesi geometrici utilizzati per ricavare la frazione media di ogni fase sulla sezione

Per i punti della griglia interni al condotto $a = 1$, per i punti esterni $a = 0$ e per i punti a cavallo della periferia a assume un valore proporzionale all'area relativa all'interno del condotto.

Nel caso di deflussi mediamente stazionari, in accordo alla metodologia proposta da Prasser [10], i risultati possono essere rappresentati dai valori medi associati a k_{max} frames; indicando con α la frazione di vuoto, si hanno le relazioni:

$$\bar{\alpha}_{i,j} = \frac{1}{k_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} \alpha_{i,j,k} \quad (9)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{k_{\max}} \sum_{i=1}^{k_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} a_{i,j} \alpha_{i,j,k} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} a_{i,j} \alpha_{i,j} \quad (10)$$

$$a_{i,j} = \frac{\Delta x \Delta y}{A_{\text{sensore}}} \quad (11)$$

Quest'ultima relazione vale solo nella regione centrale.

Prasser in [10] fornisce anche una metodologia per la costruzione dei profili cordali nel condotto introducendo un fattore peso che dipende dall'anulo considerato. Si tratta di una metodologia che è applicabile solo nel caso di deflussi verticali assialsimmetrici.

6.2 Analisi degli andamenti temporali

Una prima analisi dei dati è stata effettuata al fine di definire la sensibilità dello strumento, la variabilità e la ripetibilità dei segnali di output.

Le prove sono state eseguite imponendo un valore di pre-gain compreso tra 22 e 24 e un valore di main-gain unitario, in modo da avere un valore massimo in uscita pari all'87% del valore massimo (4079). La frequenza di campionamento dei frames adottata è stata pari a 1250 Hz, quindi tra due frames successivi si ha un intervallo di tempo di 0.8 ms.

La Fig. 14 riporta per il RUN5 di Tab. 5 gli andamenti del segnale in funzione del numero di frames per 3 punti della griglia posti sull'asse della mezzeria: centrale ($i=8, j=8$), inferiore ($i=14, j=8$) e superiore ($i=4, j=8$). La prova è caratterizzata da una portata d'aria di circa 0.817 g/s ed una portata di acqua di 0.306 kg/s. Le velocità superficiali per l'aria e per l'acqua sono rispettivamente di circa 1.35 m/s e 0.883 m/s.

La regione detta inferiore ($i=14, j=8$) è caratterizzata da valori elevati del segnale e repentine variazioni in ampiezza ed una frequenza di oscillazione inferiore a quella di campionamento.

La regione centrale ($i=8, j=8$) mostra che il WMS è interessato da uno slug di liquido e gas che interessa anche la zona superiore ($i=4, j=8$). Il deflusso è di tipo pulsato.

La Fig. 15 riporta, sempre per il RUN5, le stesse informazioni in termini di valore normalizzato e di media pesata con $2k_{\max}=200$. L'ascissa del diagramma è rappresentata dal tempo di osservazione dei fenomeni. Tra due slug si ha un ritardo di circa 5 s e la durata del fenomeno è di circa 1.5 s.

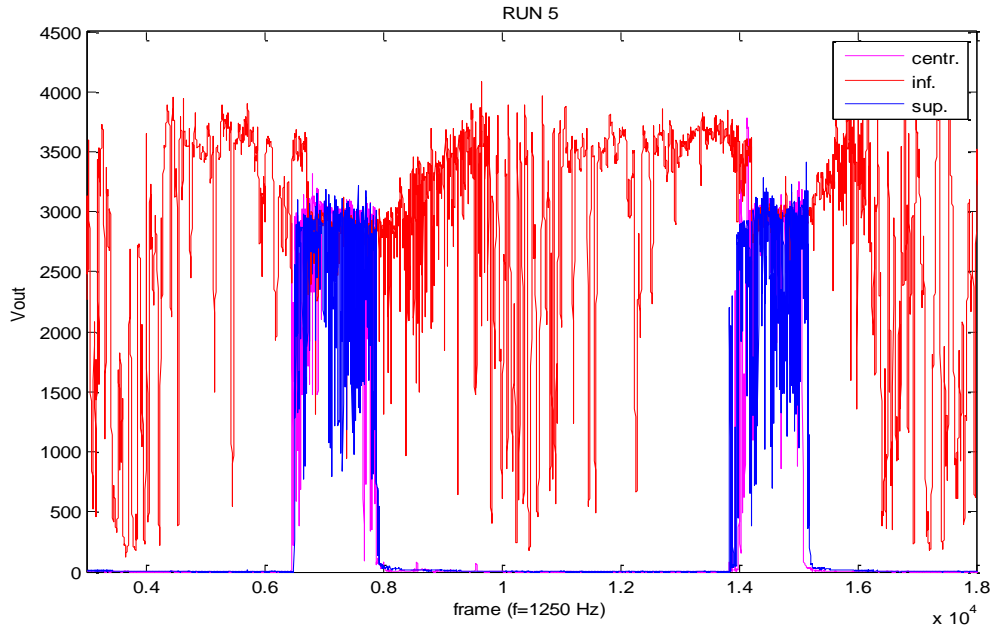


Fig. 14: Andamento temporale del segnale per RUN 5

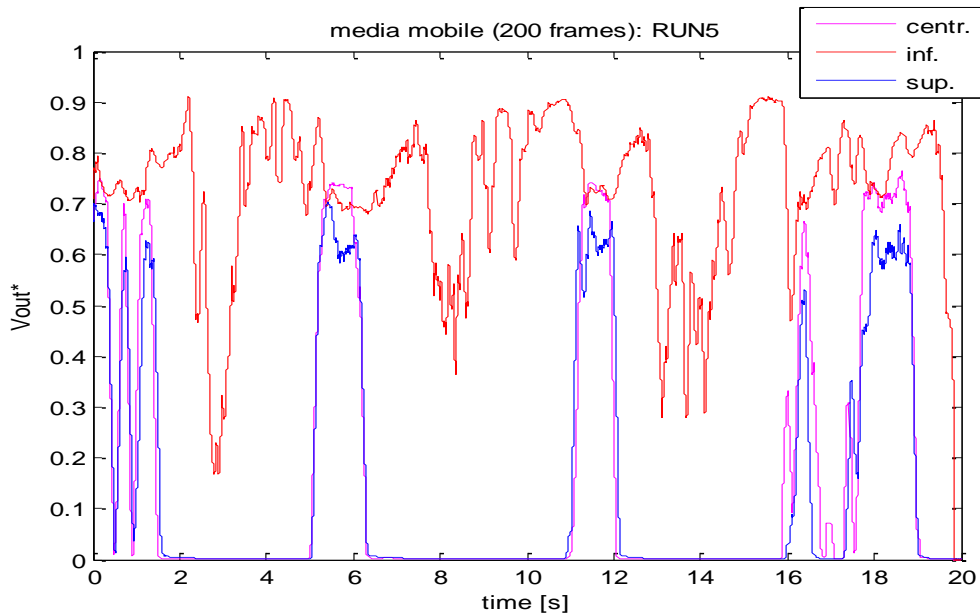


Fig. 15: Media mobile temporale del segnale normalizzato per RUN 5

6.3 Persistenza della fase gas

L'andamento puntuale, mediato sul tempo di acquisizione, del grado di vuoto è calcolato come:

$$\alpha_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^{Nframe_{max}} t_{air}(i, j, k) \right) / f_c}{T_{max}} \quad (12)$$

Con

$$t_{air}(i, j, k) = \begin{cases} t(i, j, k-1) = 1, V(i, j, k) < 150 \\ t(i, j, k-1) = 0, V(i, j, k) > 150 \end{cases} \quad (13)$$

Dove il valore di output limite di 150 è stato ricavato analizzando i valori dei segnali con sola aria. In Fig. 16 vengono riportati gli istogrammi relativi ai valori istantanei per 3 punti della griglia posti sull'asse della mezzeria: centrale ($i=8, j=8$), inferiore ($i=14, j=8$) e superiore ($i=4, j=8$), per alcuni RUN caratteristici.

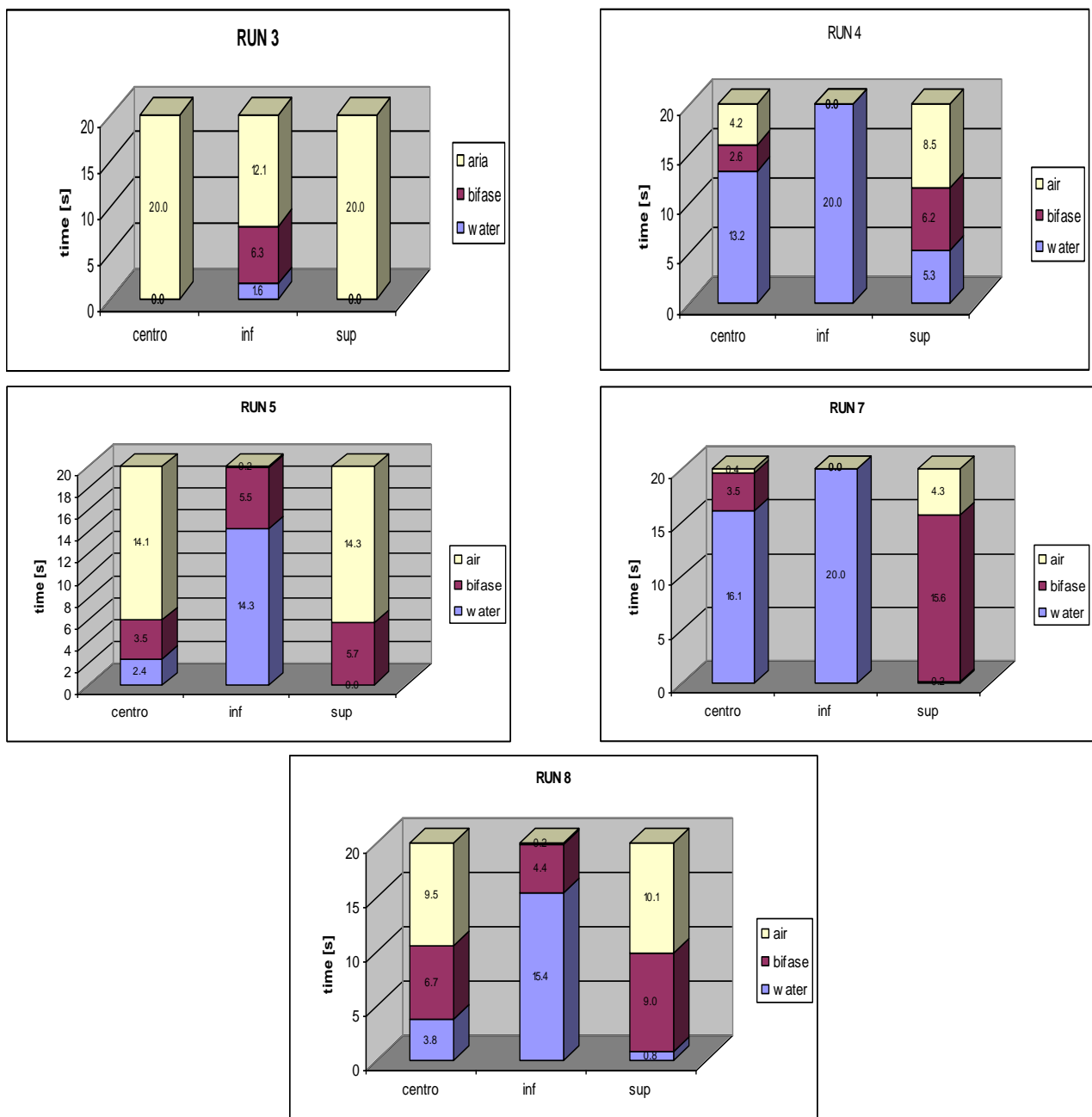


Fig. 16: Istogrammi dei tempi locali di permanenza delle fasi sull'asse verticale del condotto

Il RUN3 è caratterizzato da una velocità superficiale per la fase gas di circa 8.13 m/s mentre per la fase liquida è di circa 0.08 m/s. Si tratta di un deflusso prevalentemente gassoso con una stratificazione del liquido in un segmento circolare, nella parte bassa della sezione di prova, di altezza circa 2,5 mm come si può osservare dal profilo riportato in *APPENDICE I*.

Il RUN4 (portata per l'aria 0.083 g/s e portata d'acqua 0.269 kg/s) è caratterizzato da una velocità superficiale per l'aria molto bassa (0.16 m/s) e 0.779 m/s per l'acqua. Un segmento circolare di altezza circa 7.5 mm è sempre interessato dall'acqua (frazione di vuoto circa zero), l'asse del condotto per oltre 66% del tempo di osservazione è interessato dalla fase liquida. Si tratta di un deflusso stratificato con non trascurabili oscillazioni dell'interfaccia.

Il RUN5 (portata aria 0.82 g/s , porta d'acqua 0.306 kg/s) è caratterizzata da una relativamente elevata velocità superficiale per l'aria (1.35 m/s) mentre quella dell'acqua è di circa 0.88 m/s.

Il deflusso è stratificato con il liquido che occupa un segmento circolare di altezza circa 4.5 mm e con una interfaccia che oscilla. L'asse del condotto è interessato per il 70.5 % del tempo di osservazione dall'aria.

Il RUN7 (portata dell'aria 0.08 g/s e portata d'acqua 0.512 kg/s) ha una velocità superficiale per l'acqua elevata (1.5 m/s), quella dell'aria 0.13 m/s. La frazione di vuoto è relativamente piccola e si ha un regime stratificato in cui l'aria occupa un segmento circolare in alto di altezza inferiore a 3 mm e fortemente oscillante. Infine il RUN8 (portata dell'aria 0.4 g/s ed acqua 0.424 kg/s) presenta delle velocità superficiali per l'aria di 0.61 m/s e per l'acqua di 1.22 m/s. La frazione di vuoto è relativamente elevata con la fase liquida che occupa in modo prevalente un segmento circolare di altezza inferiore a 2.5 mm anche se fortemente oscillante.

6.4 Frazioni di vuoto locali e dipendenza dalle velocità superficiali

L'analisi dei valori puntuali del grado di vuoto in alcuni punti caratteristici del condotto, consente di ricavare importanti informazioni sul tipo di flow pattern, utilizzando una quantità di dati relativamente piccola.

Nei grafici di Fig. 17, Fig. 18 e Fig. 19 sono riportati i valori di grado di vuoto locale e medio sull'intero intervallo di tempo di osservazione nei punti della mezzeria ($j=8$) superiore ($i=4$), centrale ($i=8$) e inferiore ($i=14$), in funzione della velocità superficiale dell'aria e dell'acqua nella miscela.

La Fig. 17, che mostra il valore medio su 20 secondi di acquisizione nel punto inferiore della griglia (14,8), evidenzia che la parte inferiore del condotto è sempre interessata da deflusso monofase di liquido quando la velocità superficiale dell'aria è inferiore a 5 m/s.

La Fig. 18, relativa al punto centrale della griglia (8,8), mostra che il grado di vuoto aumenta al crescere del valore della velocità superficiale della fase gassosa. Si osserva un andamento crescente con J_g sino a 4 m/s. Al di sopra la frazione di vuoto locale è circa unitaria e quindi sicuramente siamo in una situazione in cui la frazione di vuoto volumica è maggiore del 50%. L'effetto della velocità superficiale del liquido non è evidente probabilmente a causa del carattere pulsante del deflusso.

La Fig. 19 riporta la frazione di vuoto media locale in (3,8), cioè nel punto superiore della griglia. Il comportamento è molto simile a quello del punto centrale (8,8).

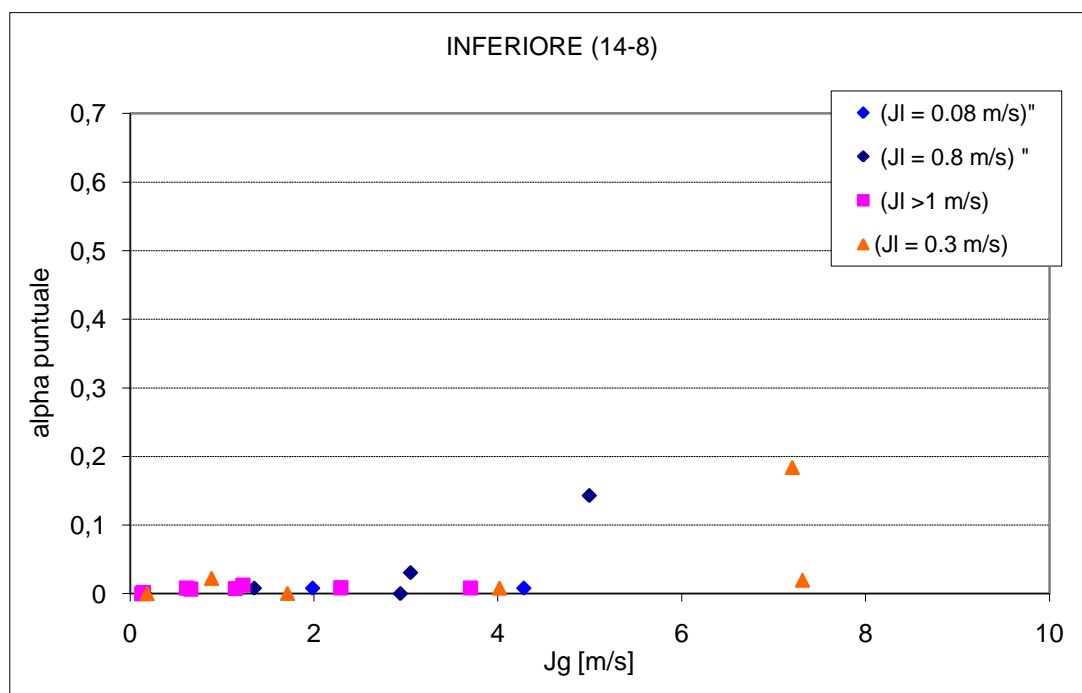


Fig. 17: Valori medi locali del grado di vuoto nel punto $i = 14, j = 8$

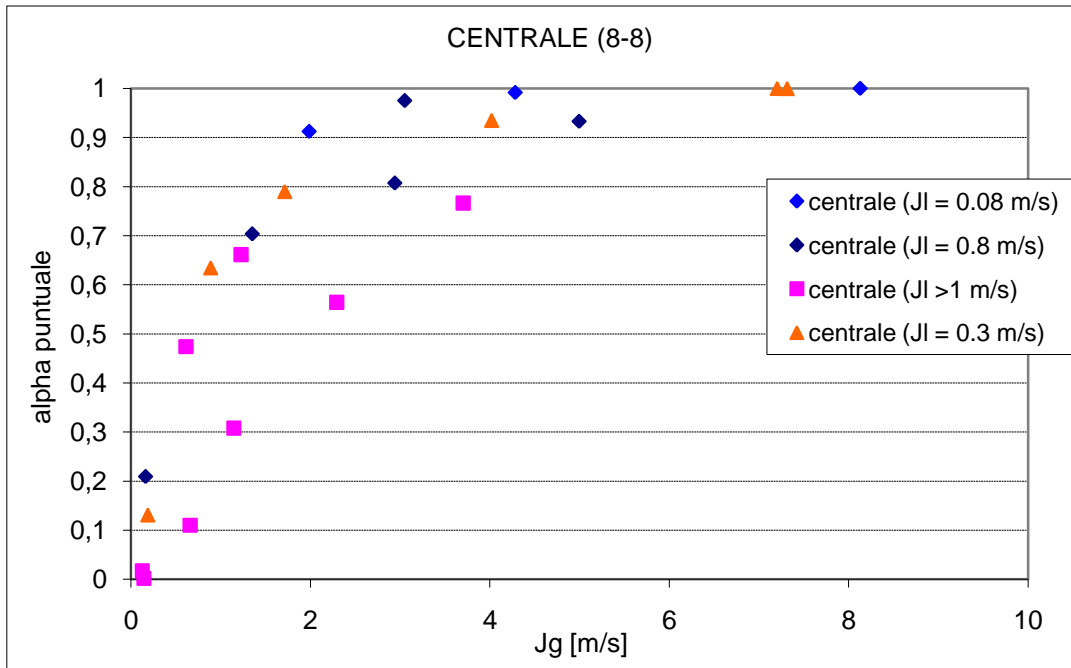


Fig. 18: Valori medi locali di grado di vuoto nel punto $i = 8, j = 8$

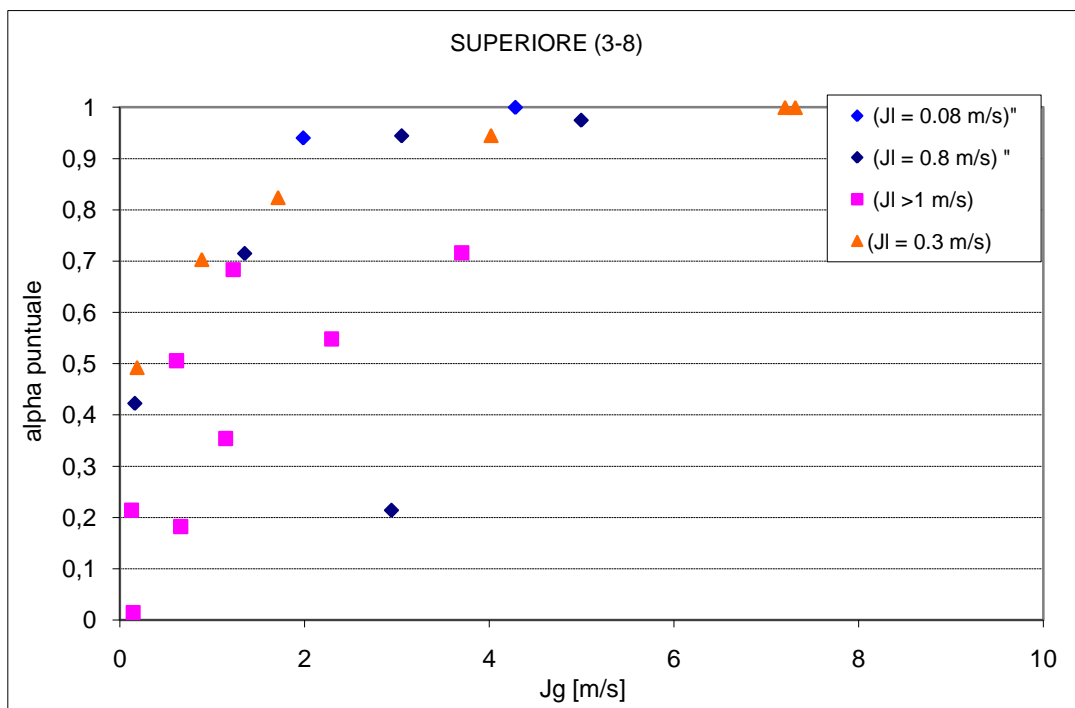


Fig. 19: Valori istantanei di grado di vuoto nel punto $i = 3, j = 8$

Incrociando le informazioni dei tre punti si può concludere che per velocità superficiali dell'aria inferiori a 5 m/s il deflusso è di tipo stratificato, con altezza del livello inferiore al raggio del condotto, con strappamenti e deposizioni di gocce di liquido verso la parte superiore del condotto, la cui portata è funzione della portata della fase gassosa.

Per velocità dell'aria superiori ai 5 m/s il flow pattern sembrerebbe assumere la configurazione del deflusso anulare e anulare-misto, come confermato dalle osservazioni visive.

6.5 Grado di vuoto lineare: profili del segnale lungo alcune corde

Sono stati quindi ricavati i profili del segnale normalizzato lungo alcune corde sia in termini istantanei che medi su un definito numero di frame. Il segnale associato alla frazione di vuoto è definito con la:

$$V_{air}^* = 1 - V^* = 1 - \frac{V}{V_{max}} \quad (14)$$

Poiché il segnale di output è basso in presenza di aria ed elevato in presenza di acqua, il valore di V_{air}^* è direttamente proporzionale al grado di vuoto della miscela.

In Fig. 20 è schematizzata la griglia del WMS200 e sono indicate le corde orizzontali e verticali considerate nello studio dei profili della frazione di vuoto.

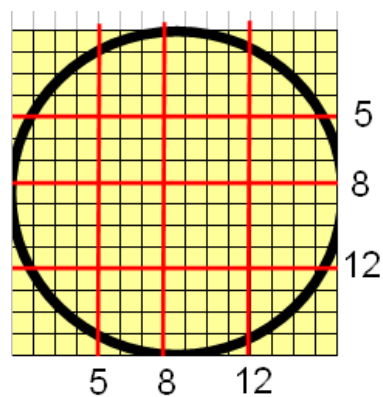


Fig. 20: Schema dei punti della griglia utilizzati per ricostruire i profili del grado di vuoto sulle corde

Nell'analisi dei profili in corrispondenza di queste corde occorre osservare che la lunghezza è una funzione dell'indice di riga e/o colonna così come il numero dei punti di misura che permettono di ricostruire il profilo.

In *APPENDICE I* sono riportati, per alcuni RUN, i profili della frazione di vuoto relativi ad alcune corde ed associati a definiti istantanei temporali (frame).

I profili medi sempre relativi alle precedenti corde ed associati all'intero intervallo di osservazione del deflusso sono riportati in *APPENDICE II*.

6.6 Analisi dei profili cordali

L'analisi dei profili consente di definire la distribuzione del grado di vuoto medio nel condotto, lo spessore del film liquido per deflussi stratificati e anulari e l'uniformità del profilo sulla sezione. Infatti i profili sono relativi a più corde della sezione del condotto e concettualmente è possibile interpolarli per effettuare una ricostruzione spazio-temporale dei fenomeni osservati dal WMS.

L'analisi degli andamenti istantanei consente di ricavare importanti informazioni sulla dinamica del deflusso, quali ad esempio oscillazioni e instabilità dell'interfaccia, frequenze caratteristiche dei deflussi intermittenti, caratteristiche dei moti ondosi, presenza, geometria e caratteristiche di bolle e gocce disperse nella fase continua.

In Fig. 21 (a) e Fig. 21 (b) sono riportati i profili medi cordali per il RUN3, rispettivamente riferiti alla direzione verticale ed orizzontale. La regione compresa tra -9.5 mm ed -7.5 mm e +7.5 e 9.5 mm risente degli effetti bordo connessi all'interazione degli elettrodi con le pareti del condotto con le strutture di sostegno del wire mesh sensor.

Per i profili relativi alla direzione verticale (Fig. 21 (a)) si osserva che la frazione di vuoto varia in modo significativo tra -7.7 mm e -2.5 mm per assumere un profilo appiattito tra -2.5 mm ed 8.5 mm.

Nella regione compresa tra $j=5$ ed $j=12$ le disuniformità sulle medie sembrano modeste e quindi non si osservano significative variazioni del grado di vuoto in questa regione.

La Fig. 21 (b) riporta i profili cordali nei piani orizzontali. Le corde associate ad $i=5$ ed $i=8$ sono interessate ad un deflusso prevalentemente in fase gassosa e quindi si osserva una frazione di vuoto unitaria. In $i=12$ si ha un profilo caratteristico relativamente appiattito, ad elevata frazione di vuoto (circa 0.96).

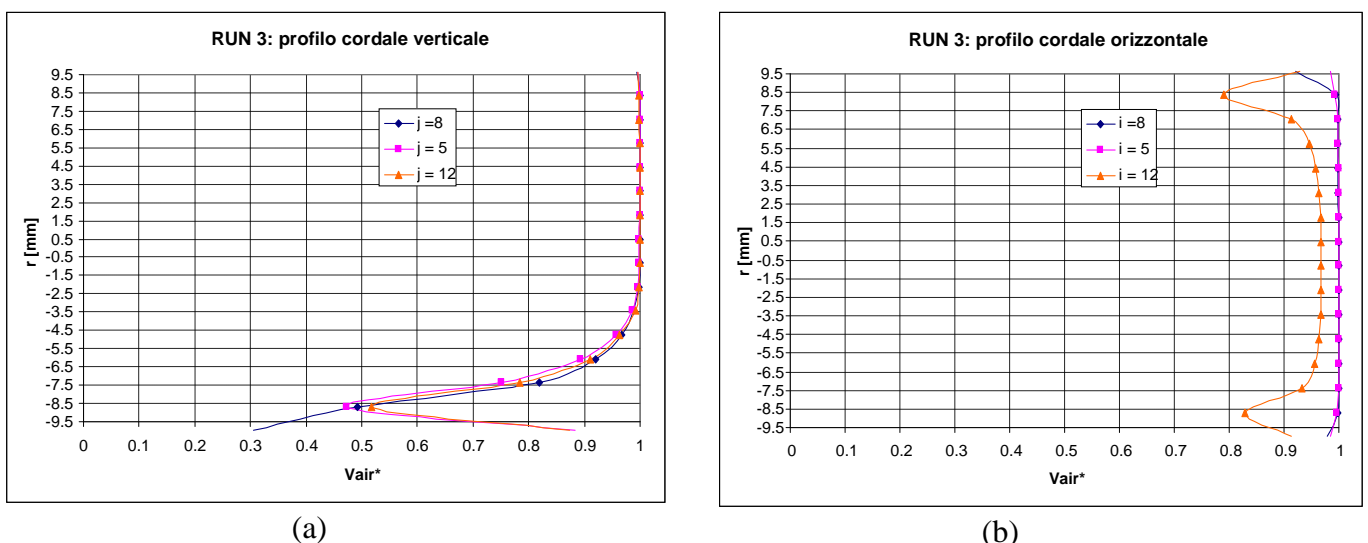


Fig. 21: Profili cordali per il RUN3

La Fig. 22 (a) e (b) riporta i profili cordali medi per il RUN4. Rispetto alla precedente prova, la frazione di vuoto media volumica è più bassa; nei profili verticali la frazione di vuoto varia tra 0.1 e 0.7 nella regione compresa tra -5.5 mm e + 8.5 mm. Per quanto riguarda i profili cordali orizzontali, la frazione di vuoto si riduce da 0.5 a 0.1 passando da $i=5$ ad $i=12$. Caratteristico il profilo per $i=5$ che mette in evidenza come il contenuto di liquido si riduce sull'asse del condotto.

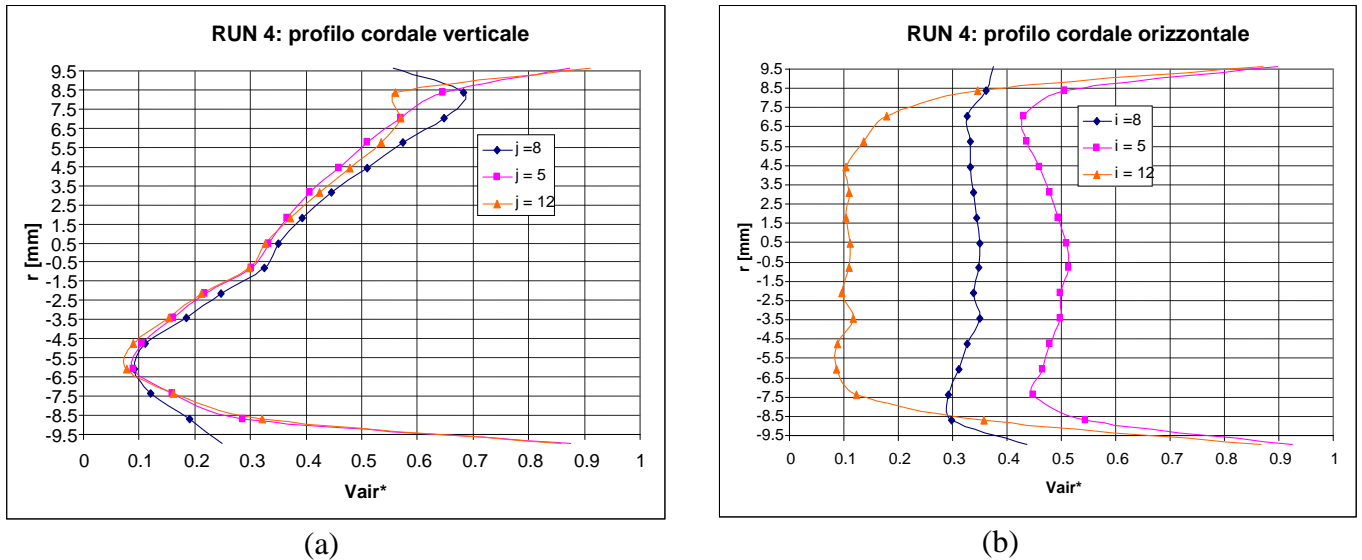


Fig. 22: Profili cordali per il RUN4

La Fig. 23 relativa al RUN5 mette in evidenza dei profili cordali verticali ed orizzontali simili a quelle precedenti, in cui i valori medi dei diversi profili denunciano l'effetto delle condizioni di prova (velocità superficiali e pressione).

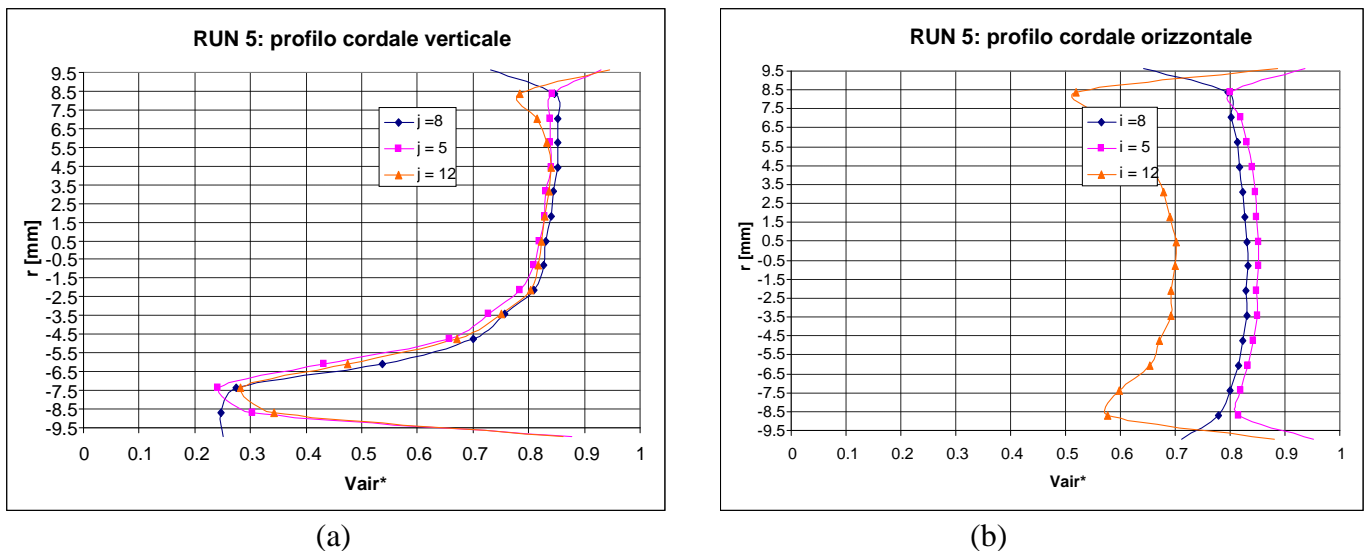
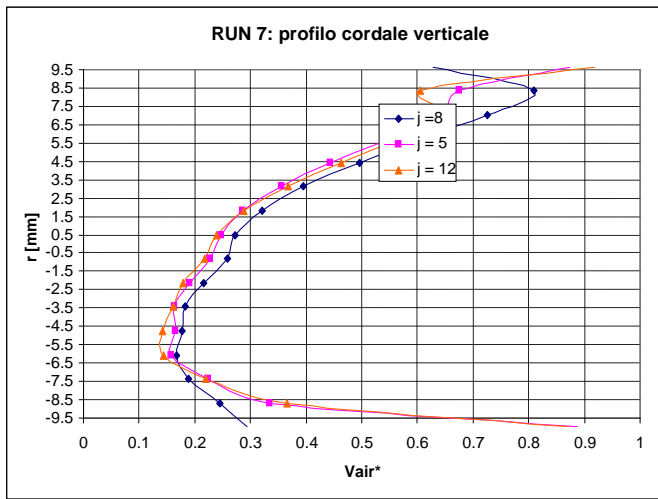
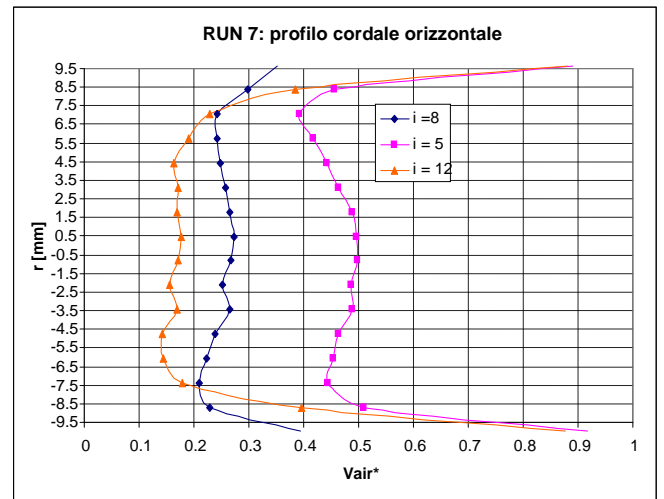


Fig. 23: Profili cordali per il RUN5

Anche le Fig. 24 e Fig. 25 confermano le precedenti considerazioni con l'osservazione che la forma dei profili è lievemente influenzata dalle condizioni di prova.

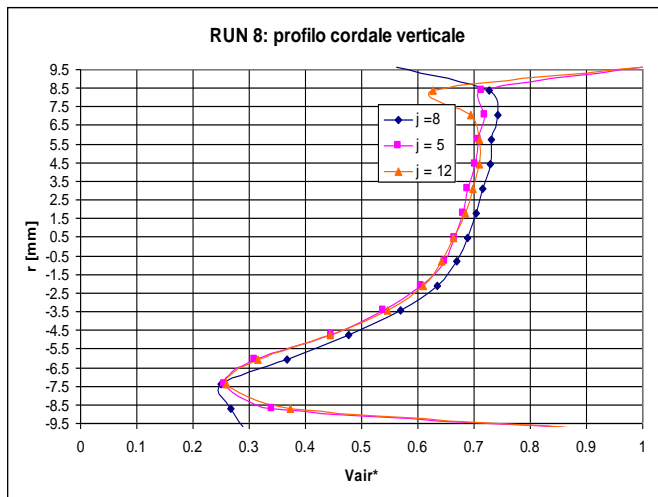


(a)

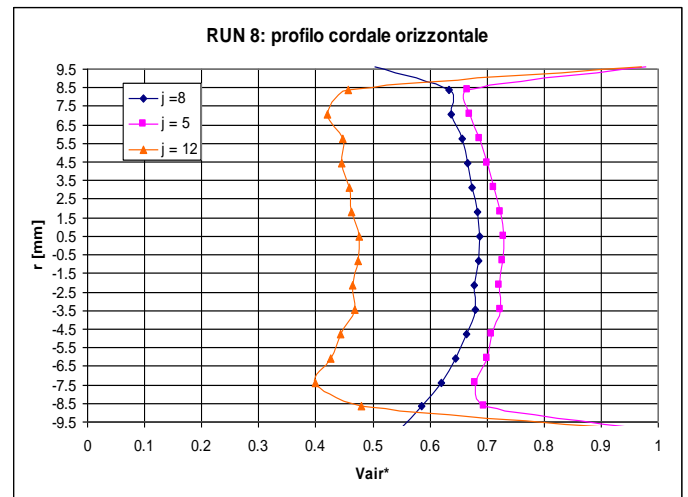


(b)

Fig. 24: Profili cordali per il RUN7



(a)



(b)

Fig. 25: Profili cordali per il RUN8

In Fig. 26 e Fig. 27 si riportano i profili medi relativi alla corda orizzontale $i=8$ per alcune delle prove. Il confronto, note le condizioni al contorno (pressione e portata delle fasi), consente di visualizzare come si modifica il profilo medio della frazione di vuoto al variare delle portate delle due fasi in accordo con i dati di Tab. 5.

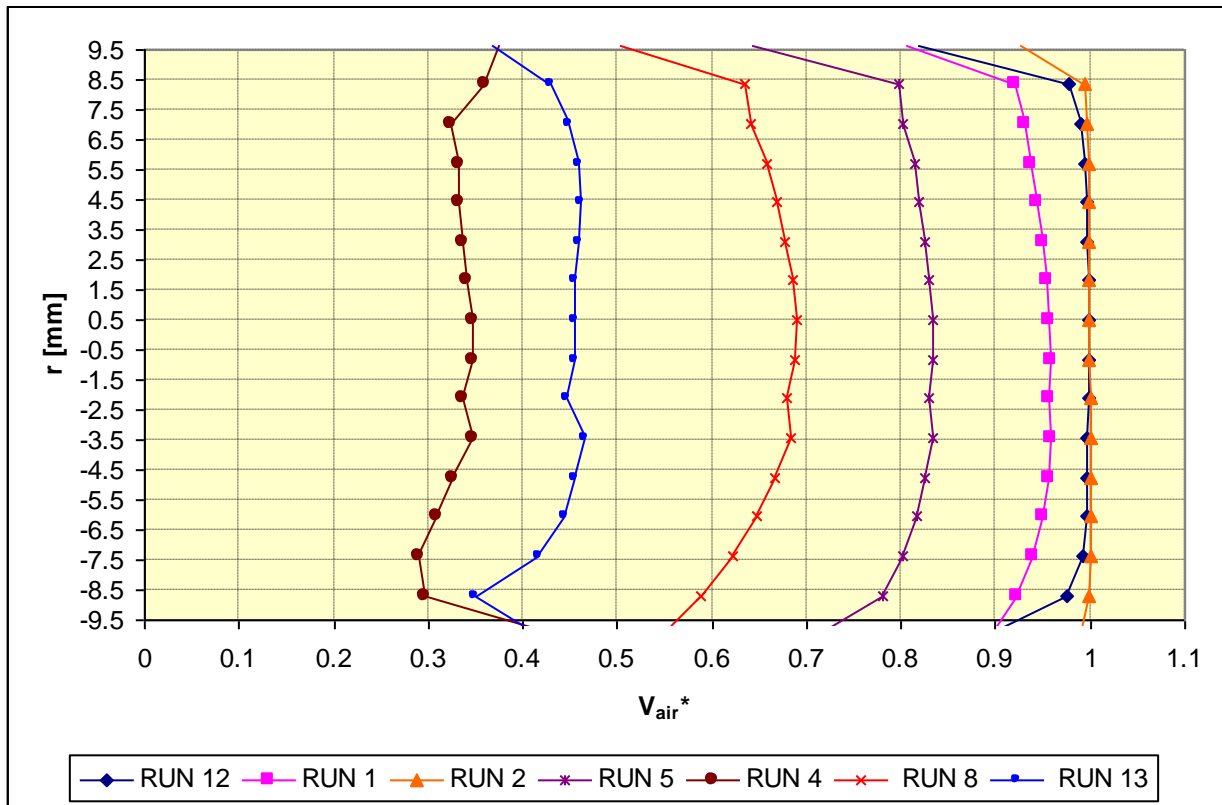


Fig. 26: Esempio di Profilo medio cordale in un piano orizzontale per $i=8$.

In Tab. 6, per le prove riportate in Fig. 26, si riportano le velocità superficiali. Si osserva come i valori della frazione di vuoto si riducono in modo significativo con il diminuire della velocità superficiale della fase gas ed anche che il profilo diviene meno piatto con il ridursi di J_g .

RUN	J_g [m/s]	J_l [m/s]
12	7.2	0.24
2	4.28	0.08
1	1.98	0.08
5	1.35	0.88
8	0.61	1.22
13	0.19	0.32
4	0.16	0.78

Tab. 6: Velocità superficiali per le prove di Fig. 26

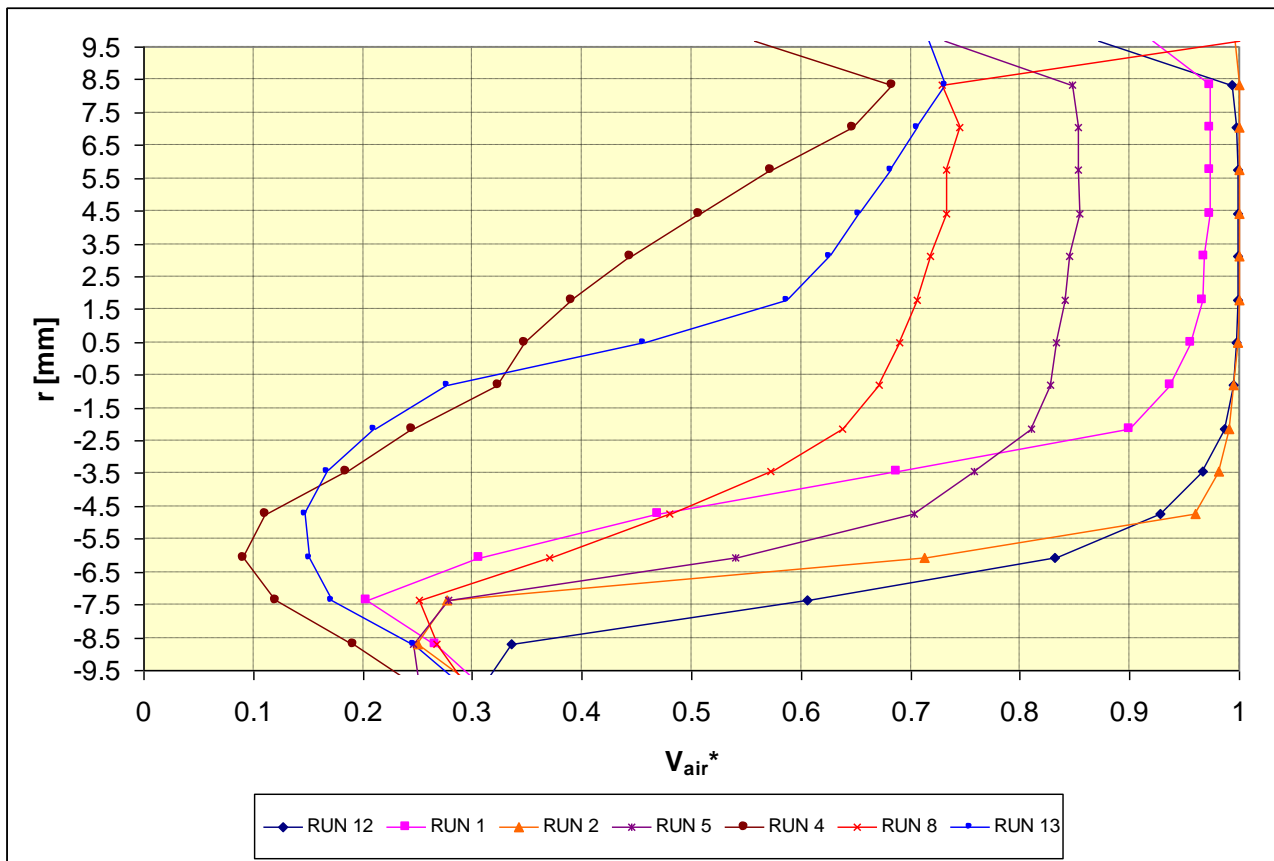


Fig. 27: Esempio di Profilo medio cordale ($j=8$) della frazione di vuoto relativa ad un piano verticale

Il comportamento di Fig. 27 è tipico di un deflusso stratificato con un segmento circolare a basso grado di vuoto nella parte bassa della sezione di prova e di altezza crescente dal RUN2, al RUN12, RUN1, RUN5, RUN8, RUN13 e RUN14. Trattandosi di valori medi sull'intero intervallo di tempo di acquisizione sono importanti gli scarti quadratici medi associati a questi profili.

6.7 Andamenti temporali dei profili mediati sulla sezione

L'analisi degli andamenti spazio-temporali consente di definire il tipo di flow pattern, e di ricavare i tempi caratteristici, quali per esempio i periodo degli slugs, l'ampiezza di questi e la loro posizione spaziale.

In Fig. 28, Fig. 29 e Fig. 30 si riportano gli andamenti del valore del segnale normalizzato e mediato sulla sezione del condotto per $T = 20$ s, $T = 10$ s e $T = 5$ s, per alcuni RUN: 3, 4,5, 7,8.

Per la totalità delle prove effettuate APPENDICE III si riportano gli andamenti temporali della frazione di vuoto media nella sezione.

Il segnale medio sulla sezione è stato ricavato, utilizzando i pesi geometrici e escludendo i punti di misura della griglia esterni al condotto.

Trattandosi di un segnale medio spaziale e nella misura in cui i fattori peso utilizzati siano significativi, ai segnali di Fig. 28, Fig. 29 e Fig. 30 si può dare il significato di frazione di vuoto areica nella sezione del condotto ed il suo andamento nel tempo caratterizza le fluttuazioni del grado di vuoto. Si osserva per esempio che per il run3 le differenze tra i valori massimo e minimo sono modesti (tra 0.8 e 0.99) e che il deflusso è molto prossimo ad un anulare con moto disperso. Le altre prove caratterizzano dei moti stratificati assimilati a dei tappi di una miscela bifase a basso grado di vuoto (inferiore a 0.4) di durata più o meno variabile (2 – 3 secondi) seguite da una fase ad elevata frazione di vuoto (maggiore di 0.4 e rapidamente crescente a valori maggiori di 0.7 sino a 0.85).

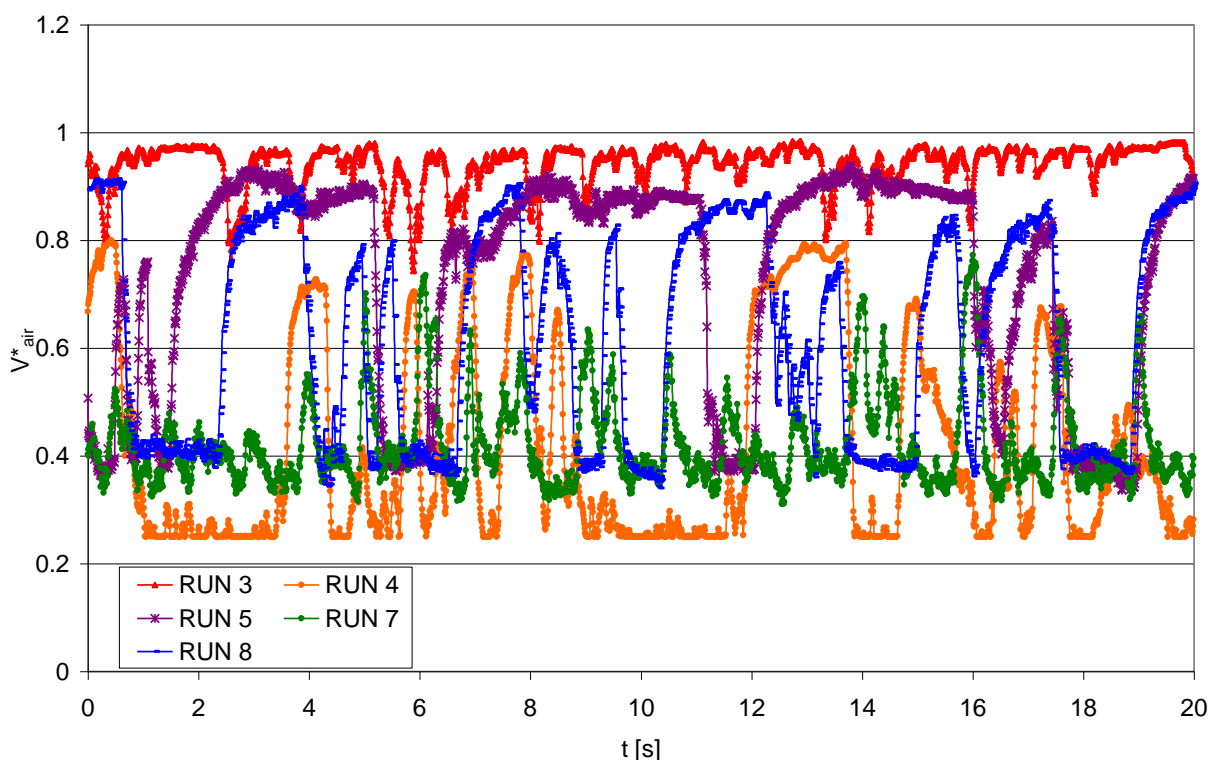


Fig. 28: Andamento temporale della frazione di vuoto mediata sulla sezione. T = 20 s

Le Fig. 29 e Fig. 30 rispetto alla Fig. 28 permettono di apprezzare meglio, in termini di valori medi associati alla sezione di prova, il comportamento pulsante del deflusso visto dal WMS.

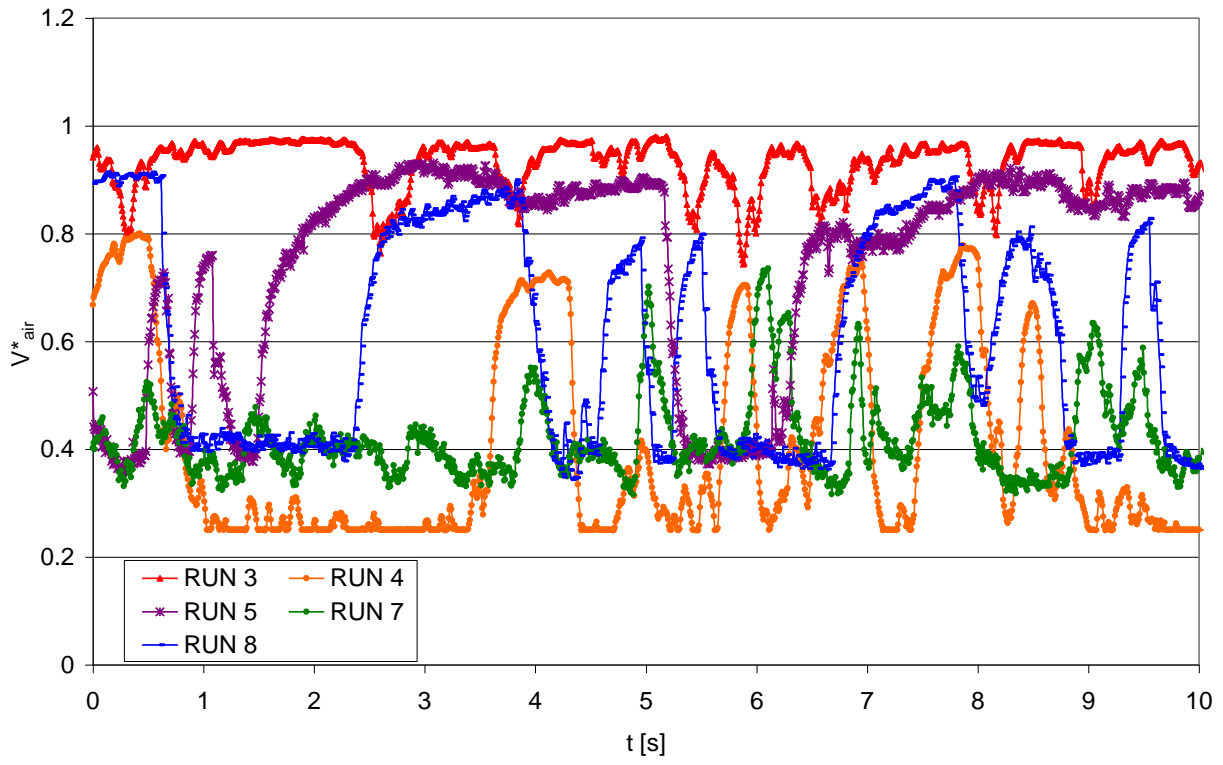


Fig. 29: Andamento temporale della frazione di vuoto mediata sulla sezione. $T = 10$ s

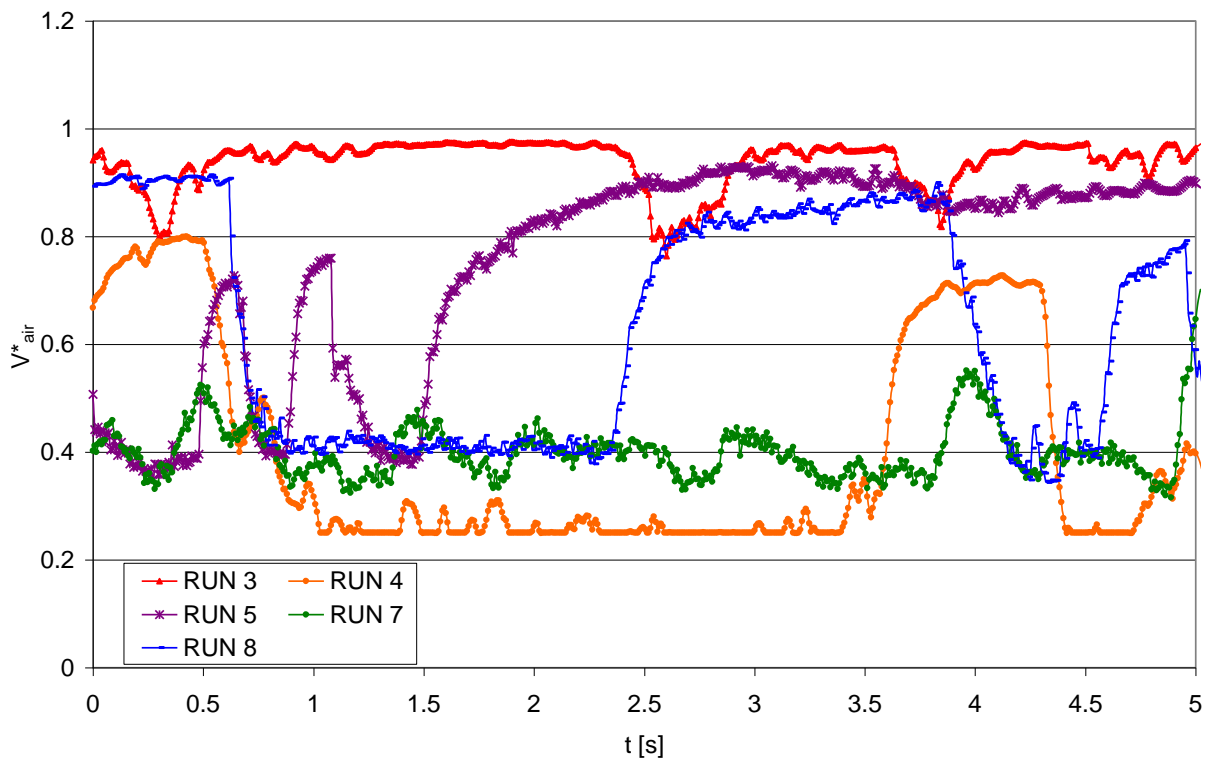


Fig. 30: Andamento temporale della frazione di vuoto mediata sulla sezione. $T = 5$ s

7. CONCLUSIONI

Lo strumento utilizzato (WMS200) è stato prodotto presso la Teletronic Rossendorf GmbH, Dresden, con un sensore di diametro nominale 19 mm. Questo strumento consente di studiare fluidi la cui conduttività elettrica è compresa tra 0.5 e 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Il sensore è composto da due file di elettrodi, equidistanti tra loro, che individuano due piani paralleli posti a una distanza di 1.5 mm. Il primo piano funge da trasmettitore mentre il secondo da ricevitore.

Le due file di 16 elettrodi sono perpendicolari tra loro ($D_{\text{wire}} = 70 \mu\text{m}$ e passo pari a 1.31 mm), così che la conduttività misurata è il valore integrale della grandezza in una regione di minima distanza tra gli elettrodi (distanza tra i piani).

Con un diametro dei fili pari a 70 μm circa il 5.4% della sezione è occupato dal sensore, mentre il restante 95% è superficie libera.

Sebbene il sensore sia parzialmente intrusivo, questo svantaggio è compensato dall'alta risoluzione temporale e spaziale e dalla semplicità di analisi, che consente di effettuare misure dirette senza la necessità di algoritmi di ricostruzione dell'immagine come richiesto dalle tomografie classiche.

La scelta di un sensore 16x16 in un condotto avente un diametro interno pari a 19 mm, consente di ottenere una elevata risoluzione spaziale e consente di essere sensibile alla presenza di bolle/gocce aventi un diametro maggiore di 1.3 mm.

Dei 256 punti che caratterizzano il sensore 16 x 16, 242 sono all'interno del condotto e quindi significativi ai fini del processo di misura.

Le prove effettuate presso il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, hanno permesso di studiare il comportamento della catena di misura e il sistema di acquisizione dati nel caso di un condotto orizzontale interessato da un deflusso aria- acqua nel campo delle portate d'aria 0.083 g/s – 3.9 g/s e portate d'acqua 0.083 kg/s - 0.51 kg/s. I deflussi considerati sono stati sia a basso grado di vuoto e sia ad alto grado di vuoto. La disposizione orizzontale della sezione di prova ha comportato la formazioni di deflussi stratificati e pulsati. Le prove sono state effettuate a bassa pressione (tra 1 e 2.54 bar) e a temperatura ambiente. L'acqua utilizzata è stata acqua di rete ad elevata conducibilità elettrica.

I dati sperimentali acquisiti sono stati elaborati considerando:

- a) un'analisi atta a caratterizzare i tempi di persistenza delle fasi (liquida, gas e di miscela) nei punti di misura della sezione di prova;
- b) un'analisi atta a ricostruire i profili cordali dei segnali in termini medi temporali ed istantanei;

- c) un'analisi che seguendo la metodologia proposta da Prasser in [10] determina la frazione di vuoto media della sezione di prova e si è discusso come questo dato evolve nel tempo nel caso delle prove realizzate.

In futuro è prevista un'intensa attività sperimentale finalizzata a caratterizzare i profili della frazione di vuoto definita dal sensore in termini deterministi e stocastici all'interno di definiti modelli di deflusso bifase controllati dalla giacitura della sezione di prova, dalle velocità superficiali e dalla pressione e dalle lunghezze dei tratti di calma a monte e a valle del sensore.

BIBLIOGRAFIA

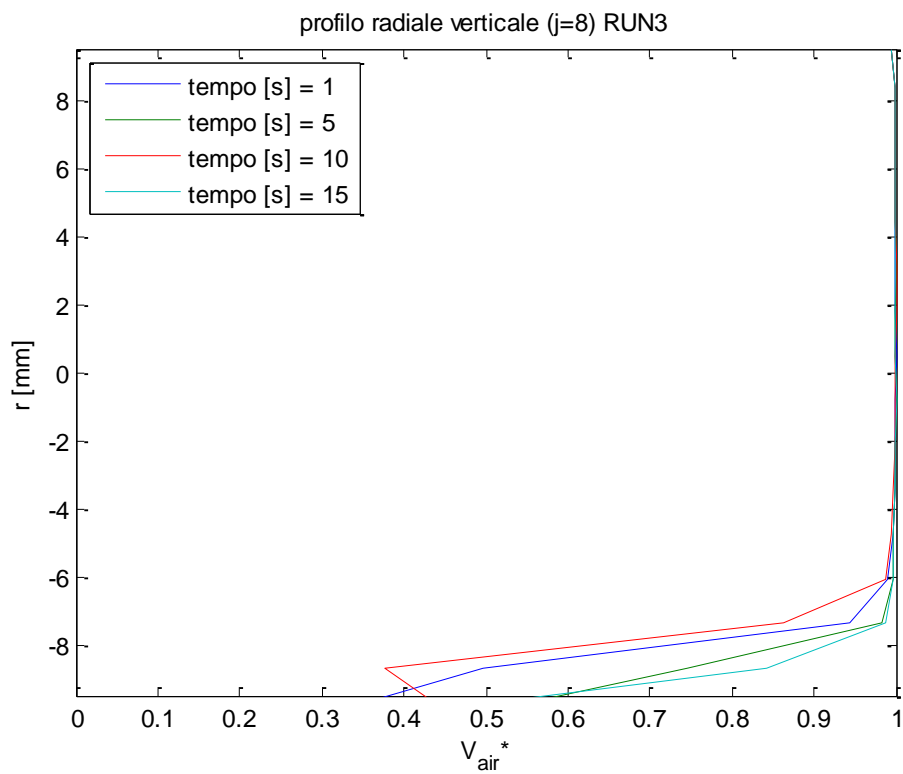
- [1] H.M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau, A new electrode-mesh tomography for gas –liquid flows, *Flow Measurement and Instrumentation* 9 (1998) 111-119
- [2] Jonson I.D., Method and apparatus for measuring water in crude Oil, United States Patent, No. 4644263, 17 February 1897.
- [3] Reinecke N., Bodden M., Petritsch G., Mewes D., Tomographisches Messen der relativen Phasenanteile in zweiphasigen Stromungen fluider Phasen. *Chem. Ing. Tech.* 1996, 68(11):1404-1412
- [4] S. Richter, M. Aritomi, H.-M. Prasser, R. Hampel, Approach towards spatial phase reconstruction in transient bubble flow using a wire-mesh sensor, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 1063-1075
- [5] A. Manera, H. Prasser, D. Lucas, T.H.J.J. van der Hagen, Three-dimensional flow pattern visualization and bubble size distributions in stationary and transient upward flashing flow, *International Journal of Multiphase Flow* 32 (2006) 996-1016
- [6] Gui-Bo Zheng et al., Gas-liquid two phase flow measurement method based on combination instrument of turbine flowmeter and conductance sensor, *International Journal of Multiphase Flow* 34 (2008) 1031-1047
- [7] M. J. da Silva, E. Schleicher, U. Hampel, Advanced wire-mesh sensor technology for fast flow imaging, *IST 2009-International Workshop on Imaging System and Techniques*, Shenzhen, China, May 11-12, 2009.
- [8] H-M Prasser, D. Scholtz, C. Zippe, Bubble size measurement using wire-mesh sensors, *Flow Measurement and Instrumentation* 12 (2001) 299–312
- [9] C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, G. Monni, B. Panella, State of art and selection of techniques in multiphase flow measurements, *Ricerca di sistema elettrico, CERSE-POLITO RL 1255/2010, Report RdS/2010/67*
- [10] Wire Mesh Sensor System, WMS200 Manual, Version 1.2, December 9, 2010, teletronic Rossendorf GmbH
- [11] H.-M. Prasser, E. Krepper, D. Lucas, Evolution of the two-phase flow in a vertical tube-decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors-, *Int. J. Therm. Sci.* 41 (2002) 17–28

APPENDICE I

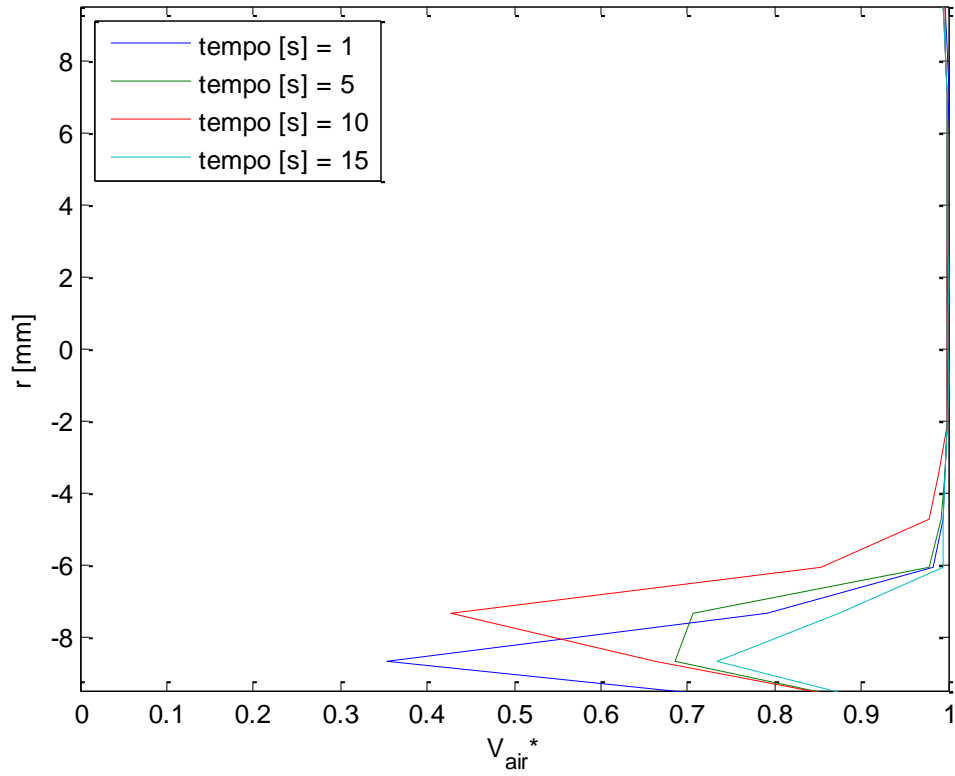
Profili cordali istantanei della frazione di vuoto (di frame) osservati nel corso delle prove.

La frazione di vuoto è definita con la: $V_{air}^* = I - V^* = I - V/V_{max}$ dove $V_{max}=4079$;

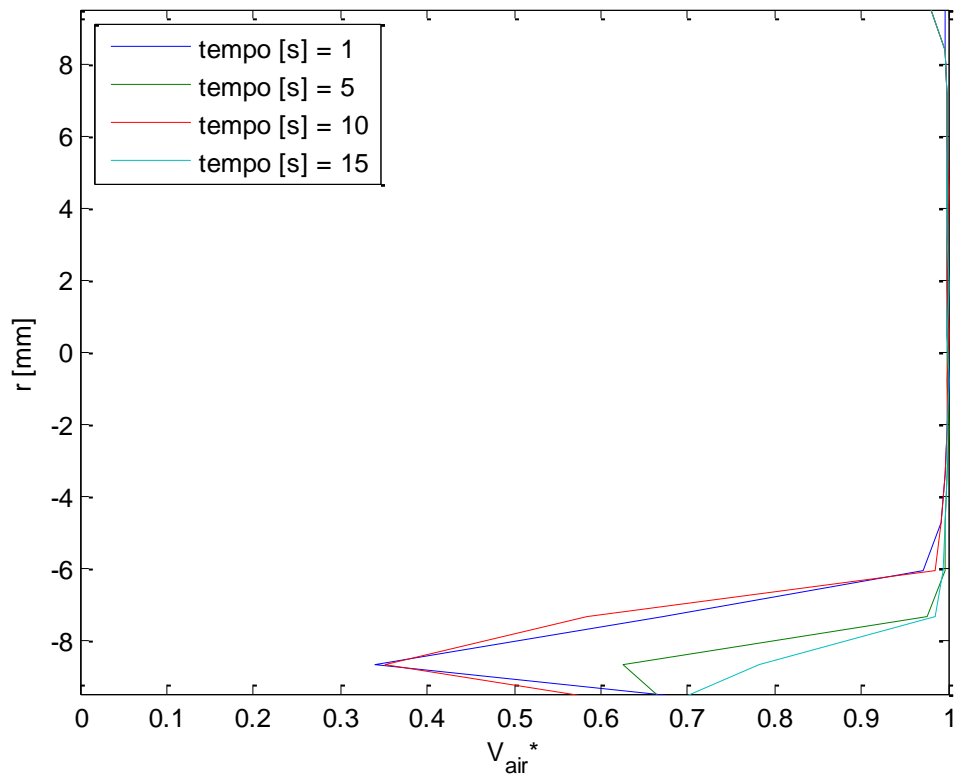
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
3	0.00391	0.027778	1.17	0.123394	8.127861	0.080279293

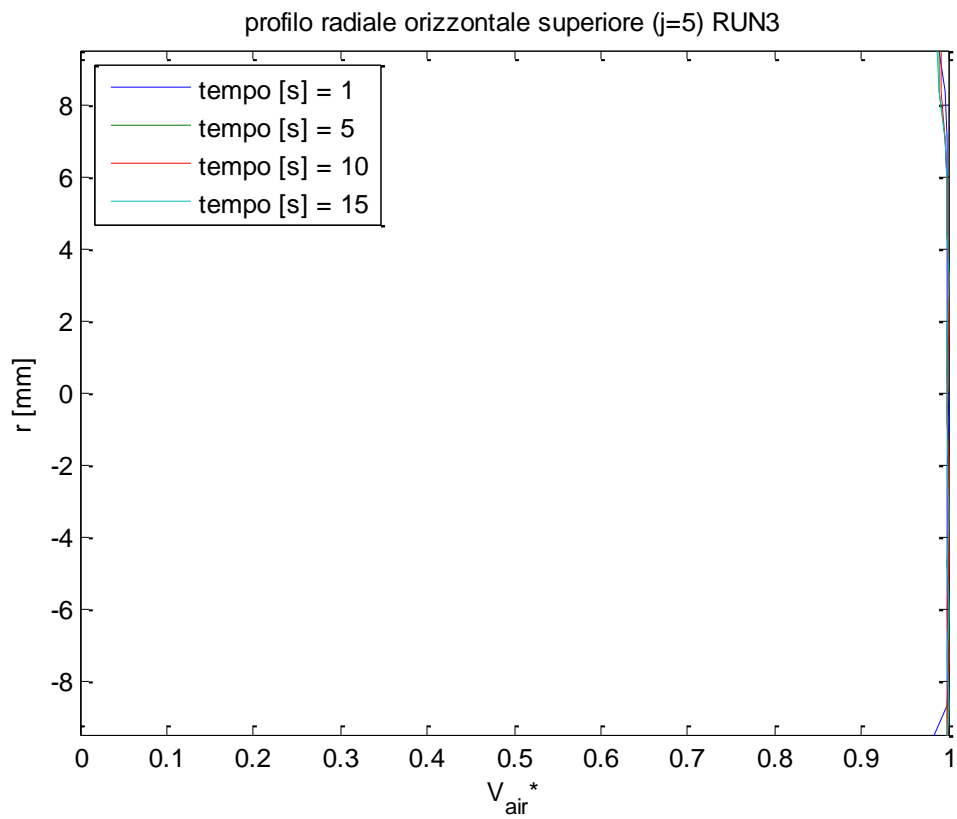
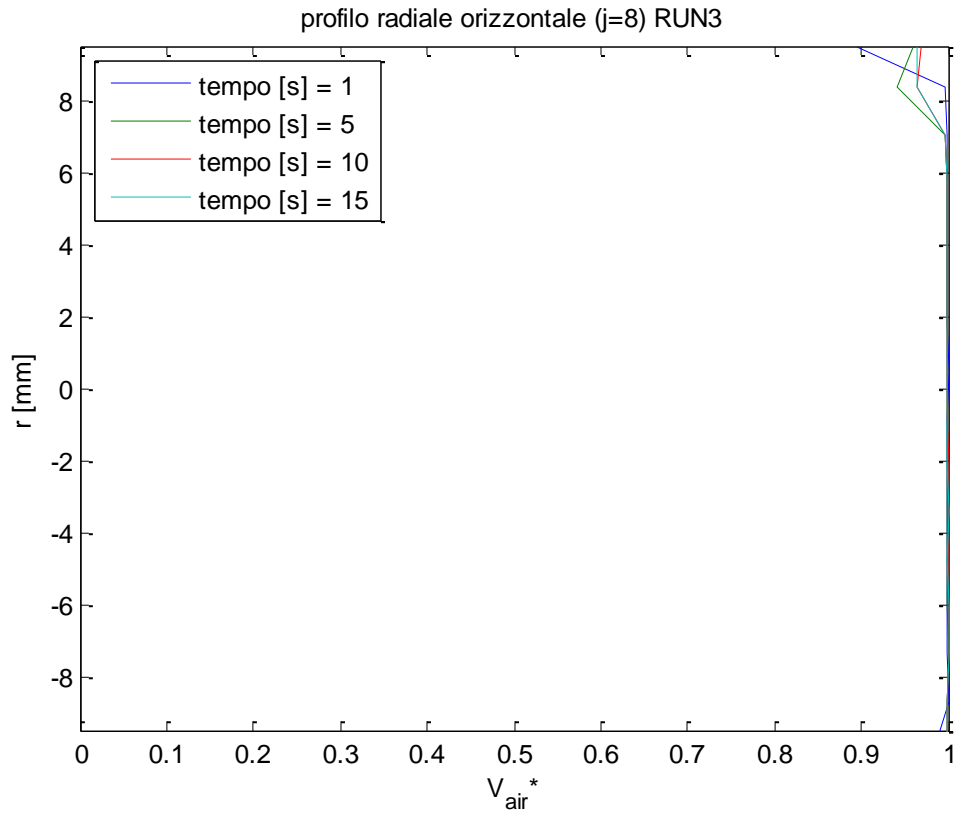


profilo radiale verticale (j=5) RUN3

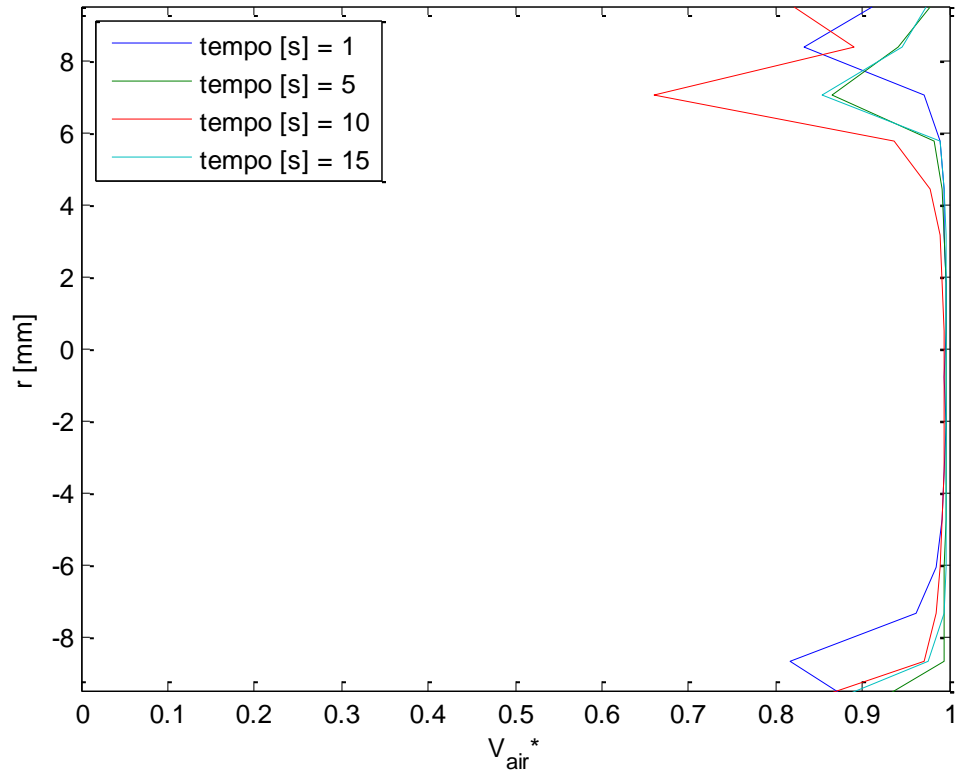


profilo radiale verticale (j=12) RUN3

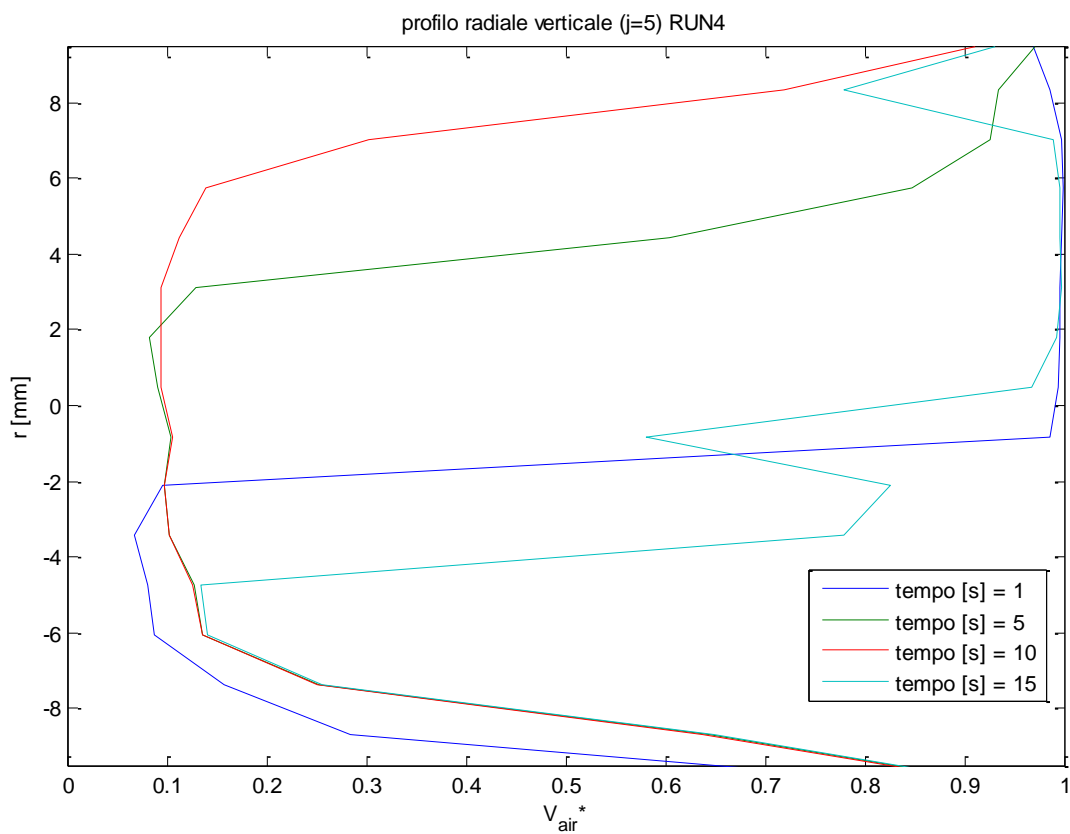
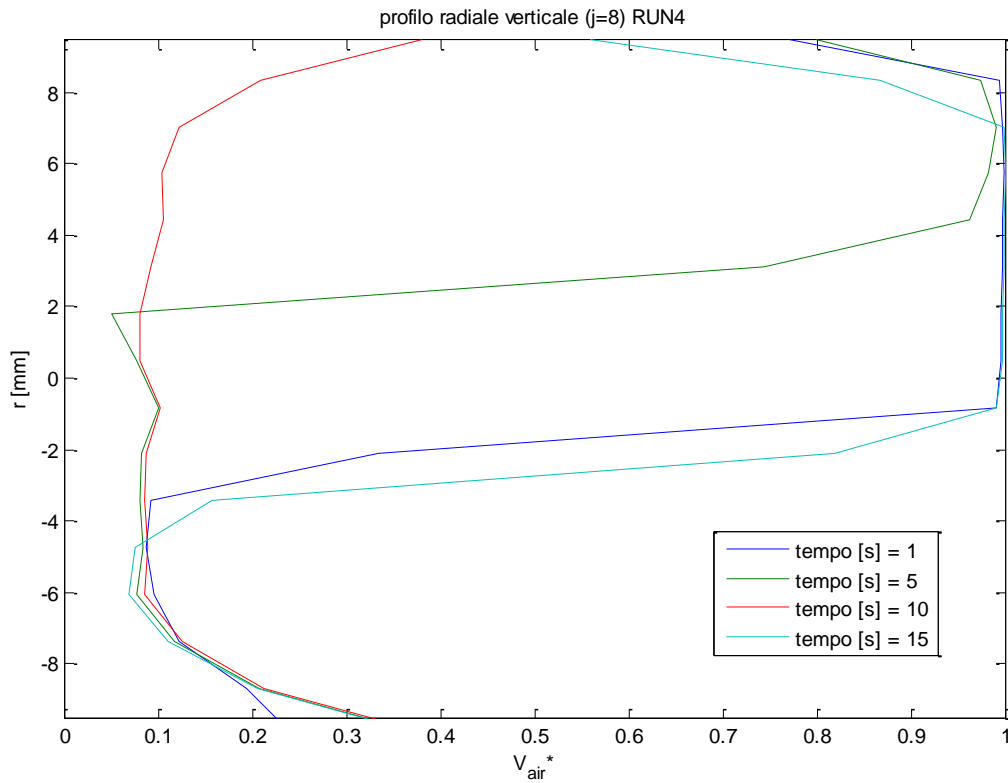


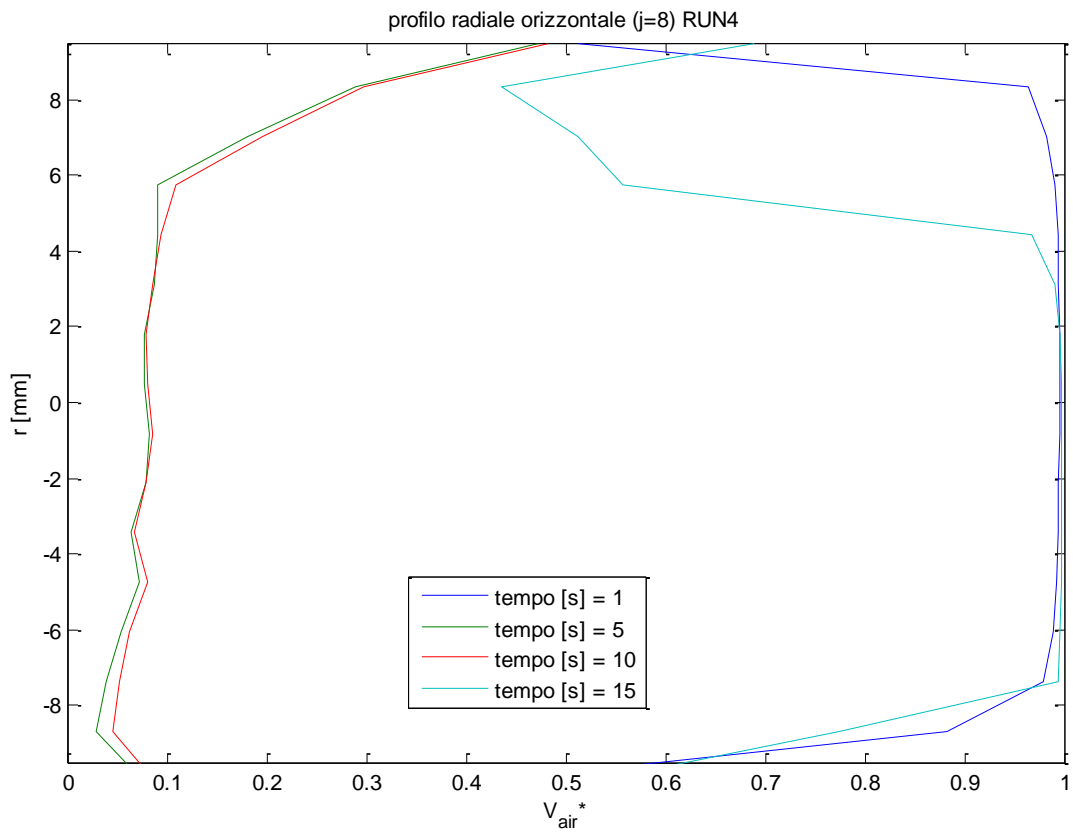
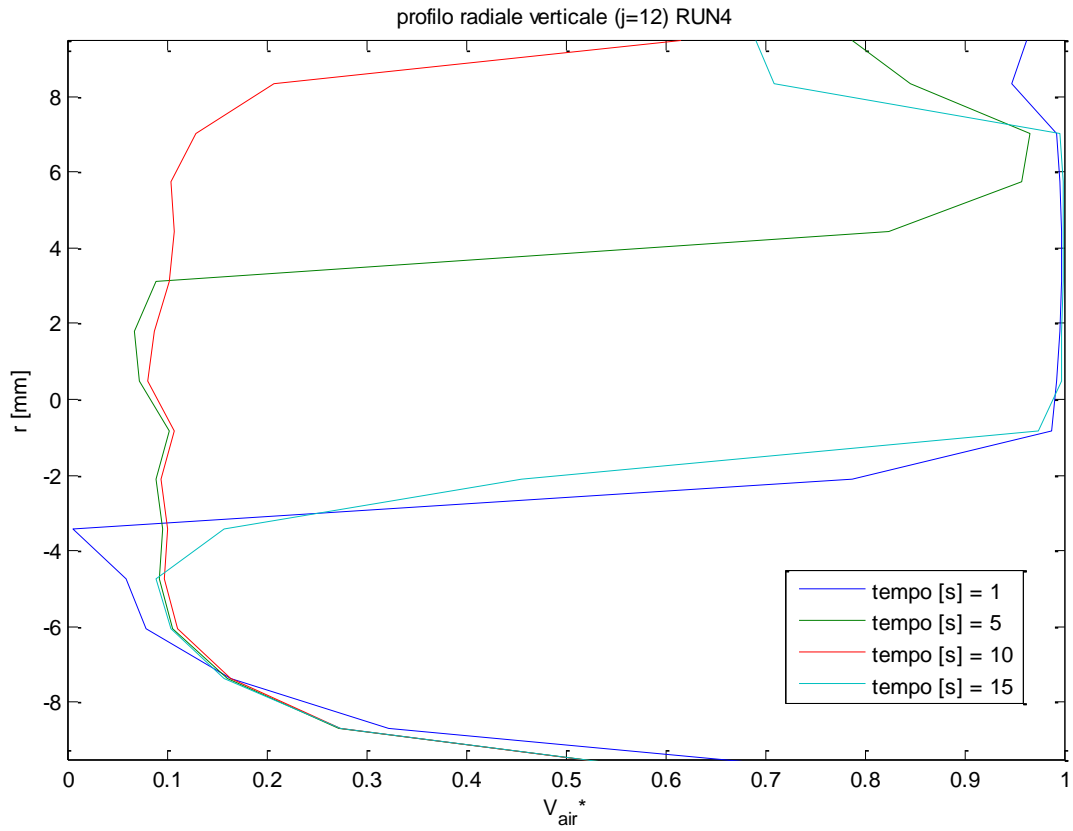


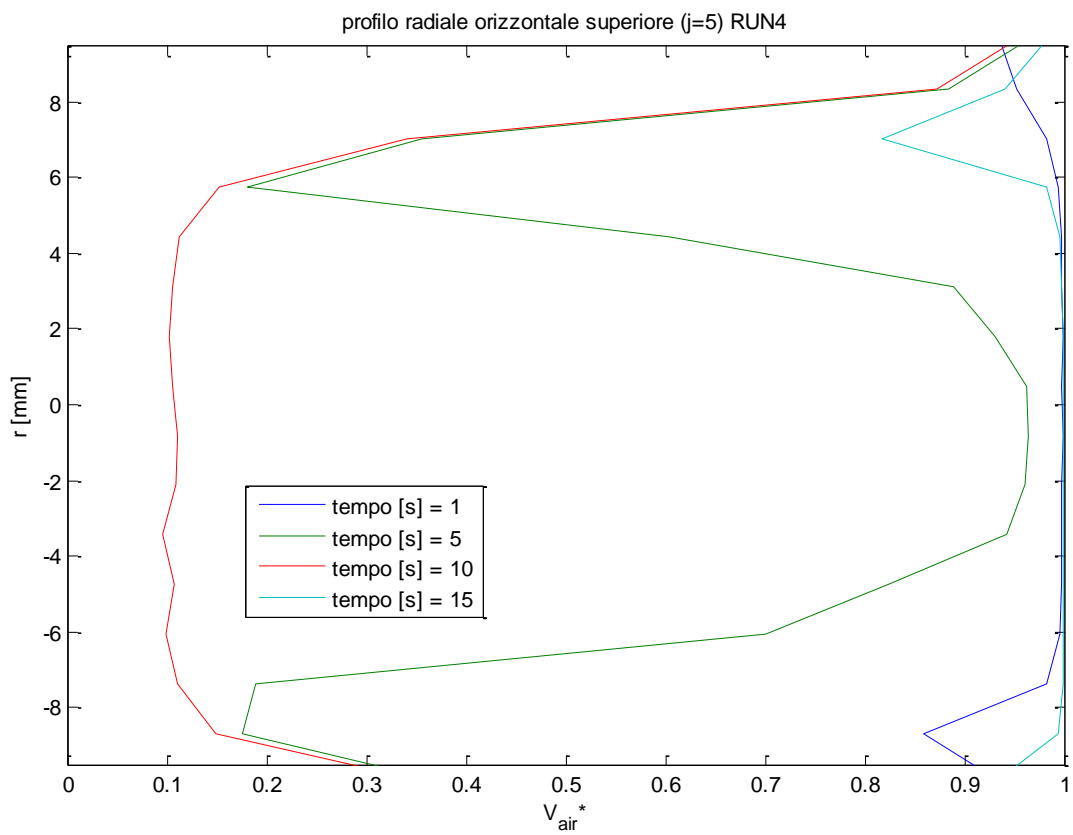
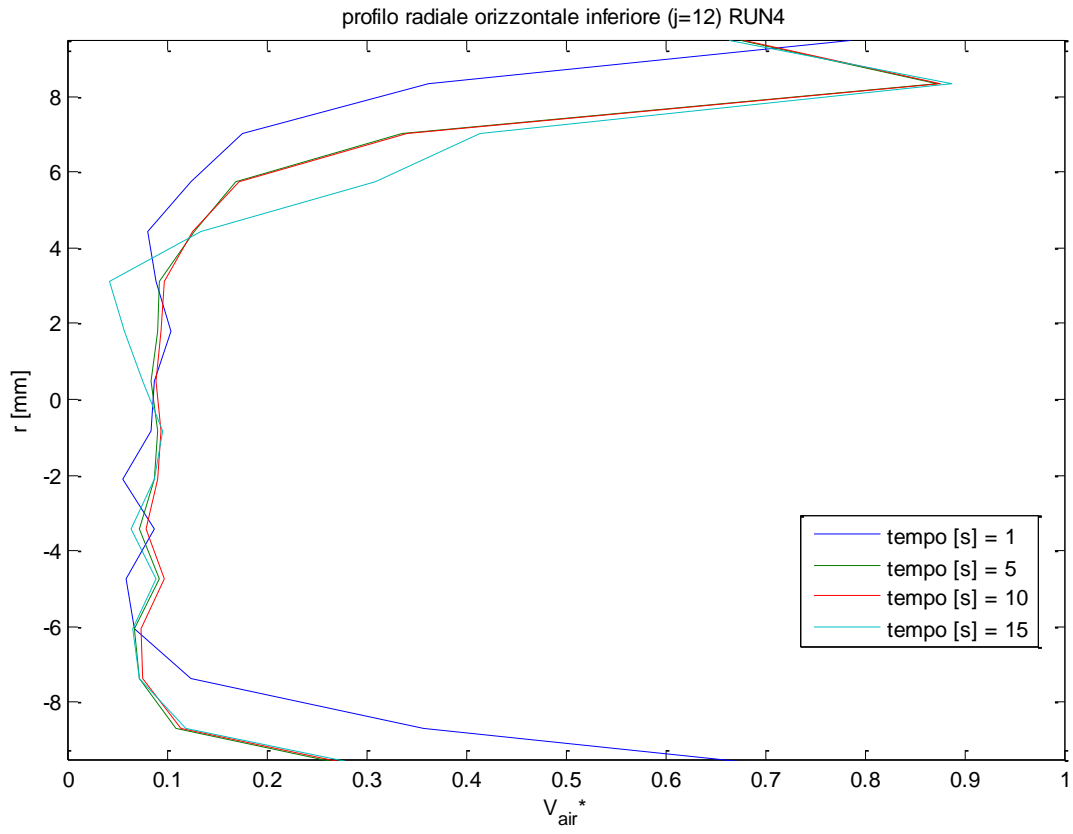
profilo radiale orizzontale inferiore (j=12) RUN3



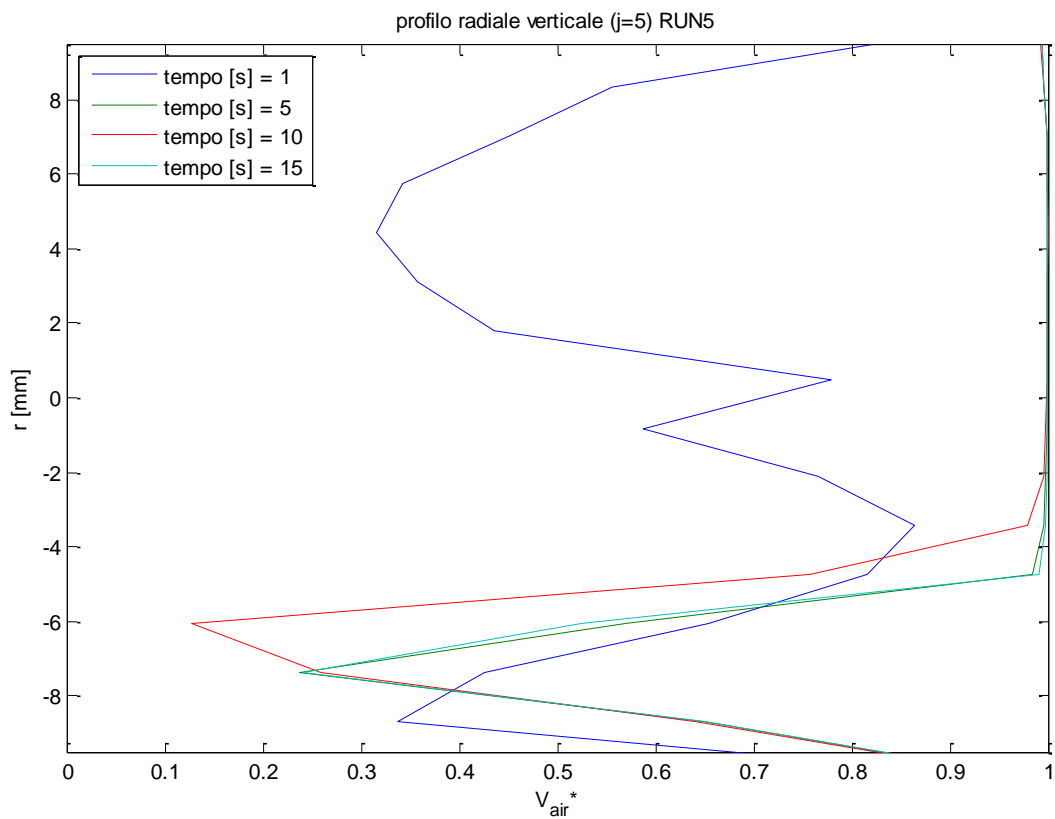
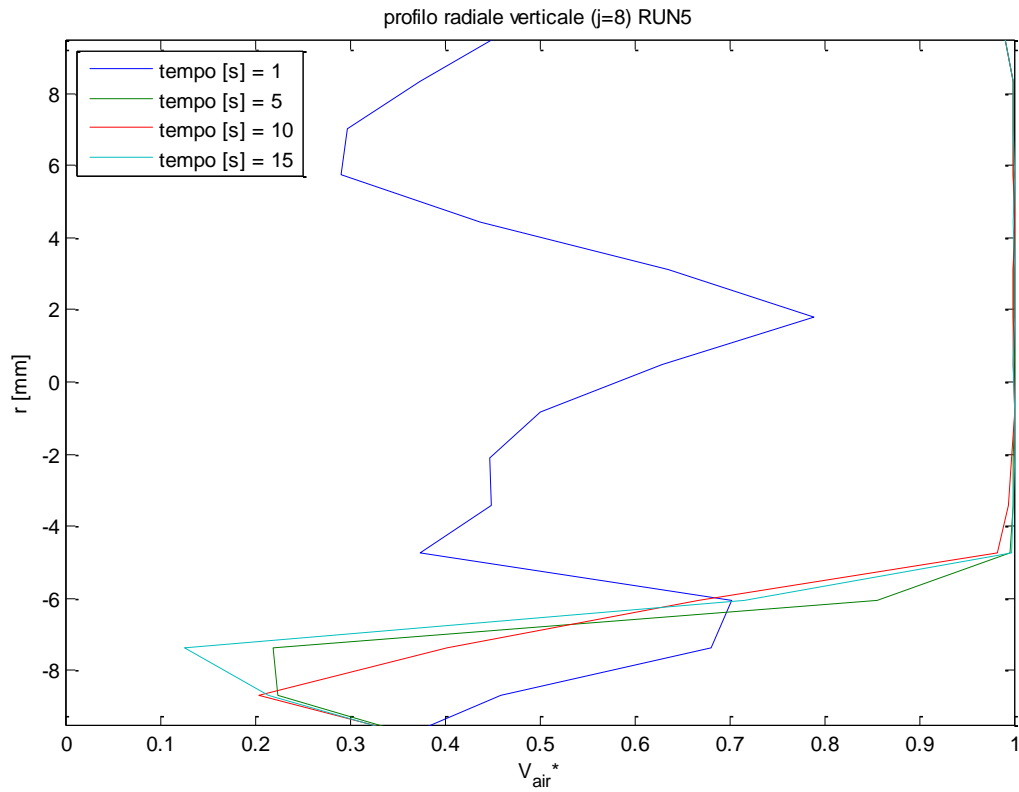
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
4	8.3E-05	0.269444	1.25	0.000308	0.161546	0.778709144

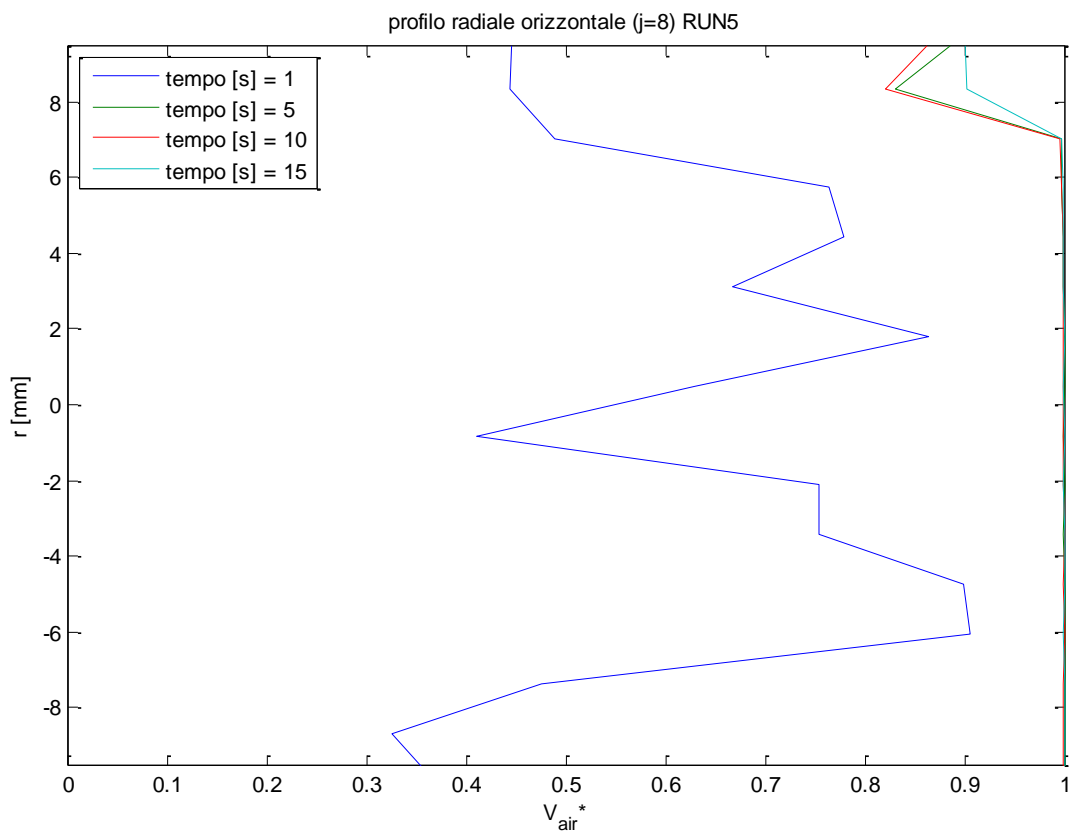
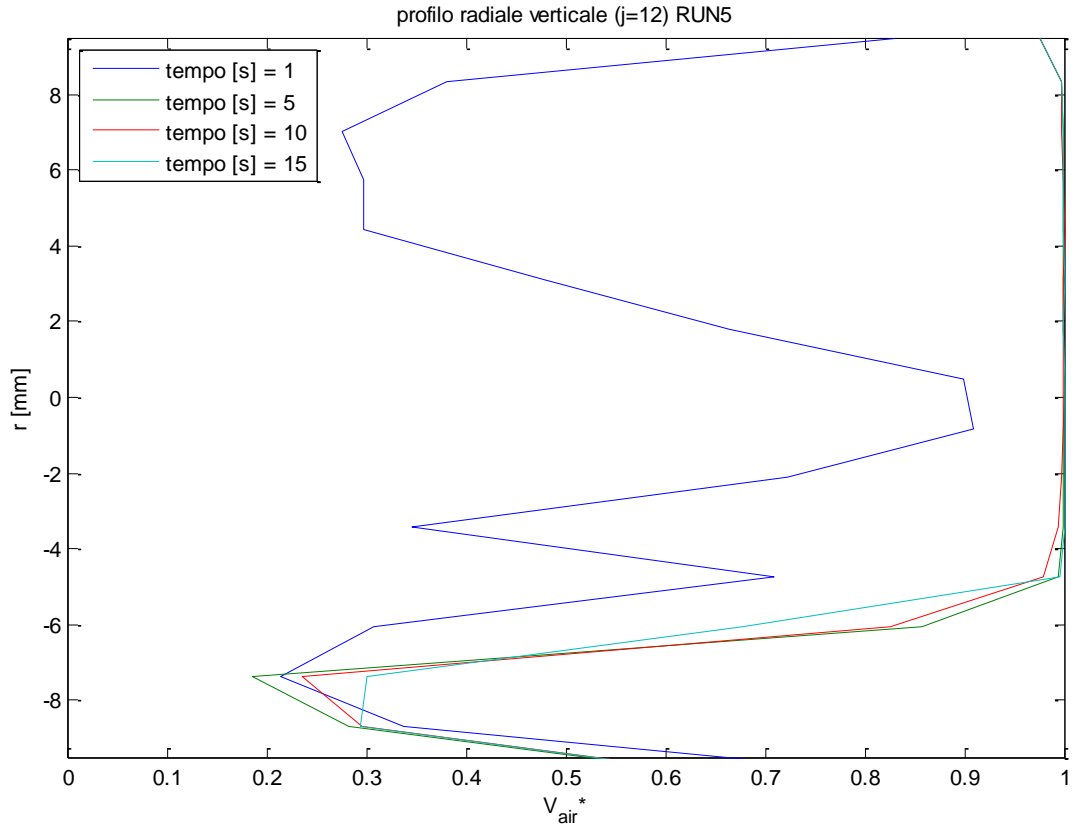


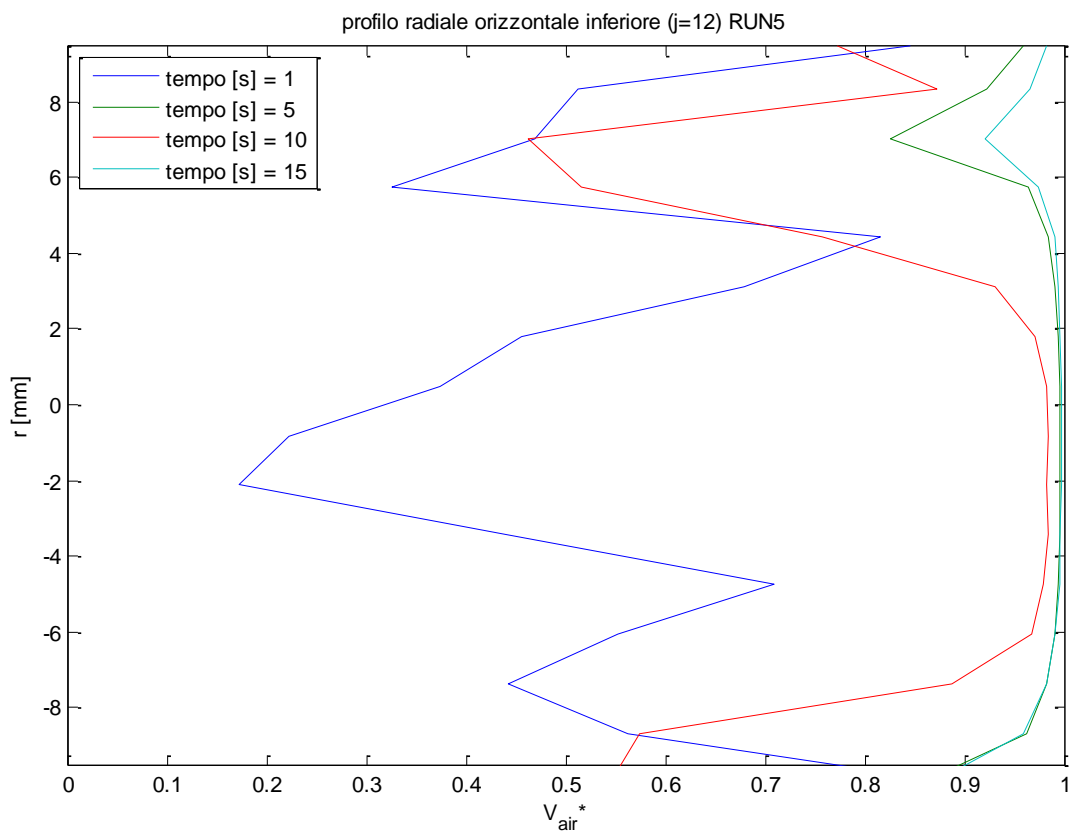
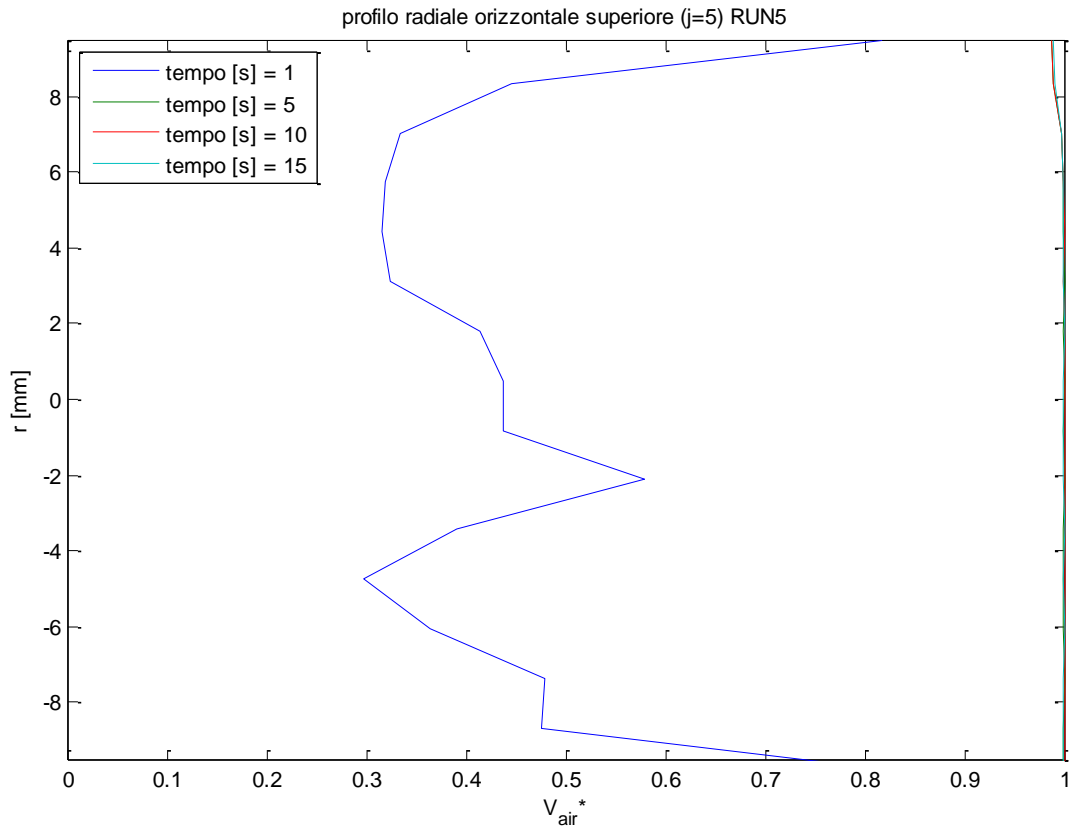




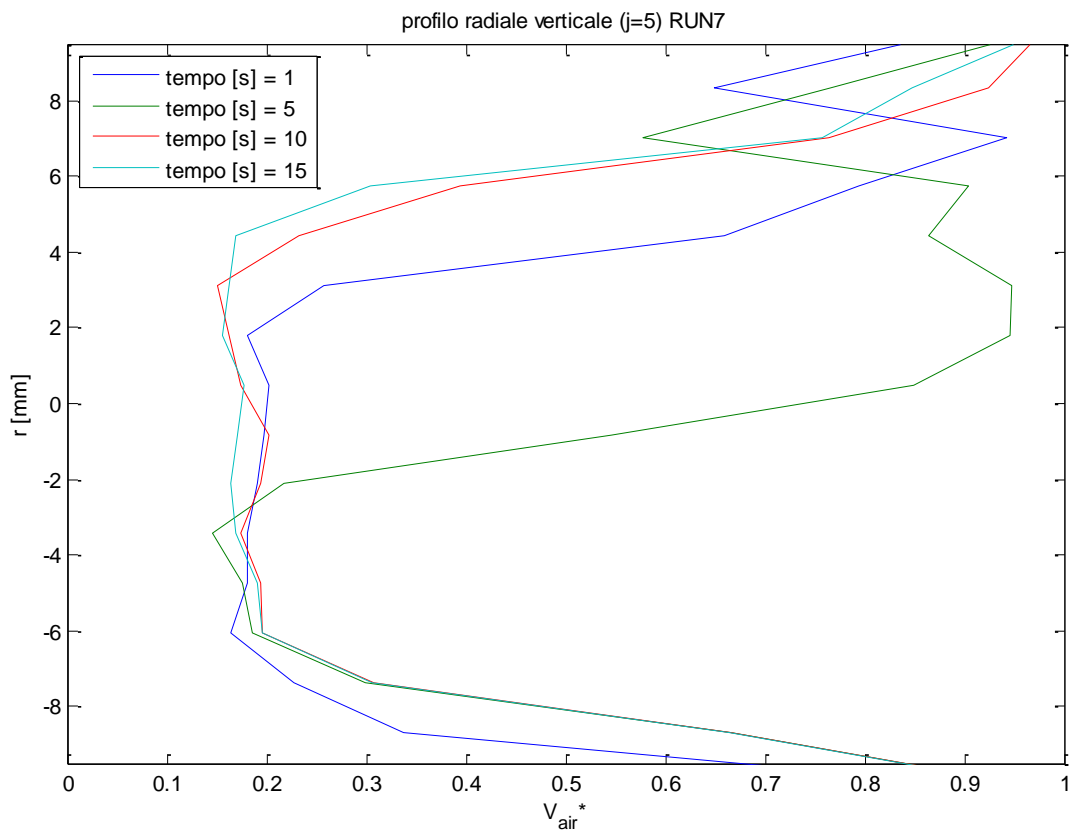
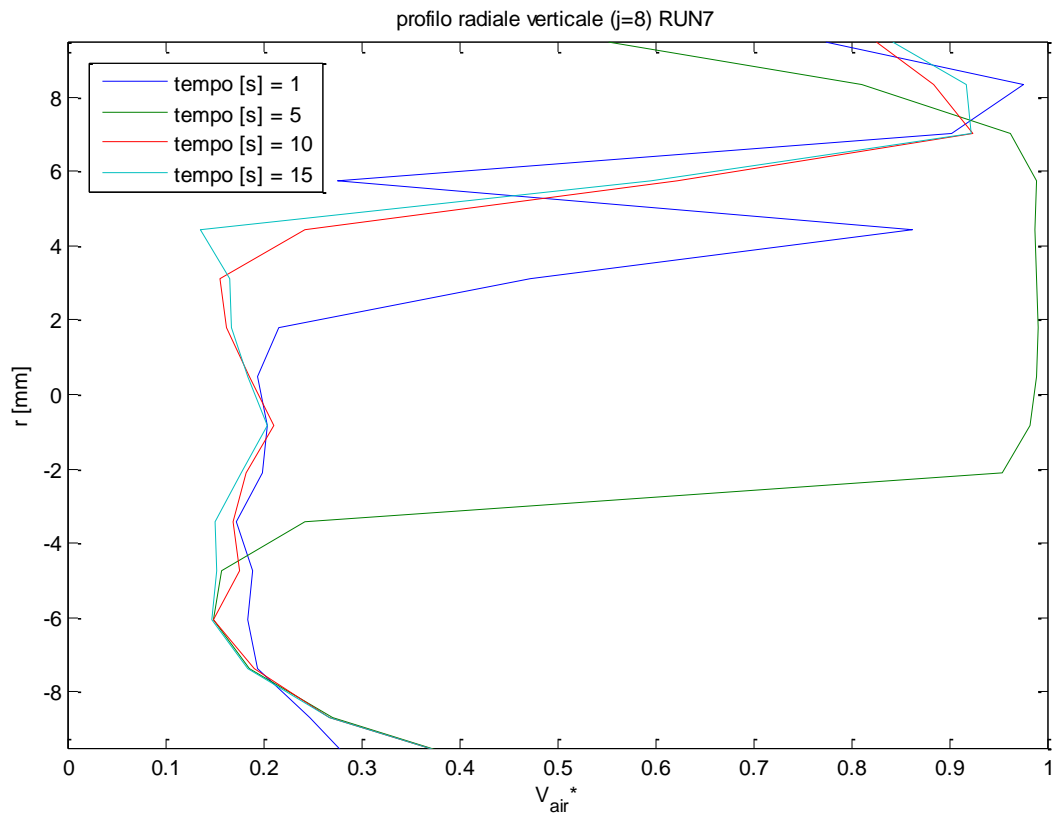
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
5	0.000817	0.305556	1.47	0.002666	1.351354	0.883072225

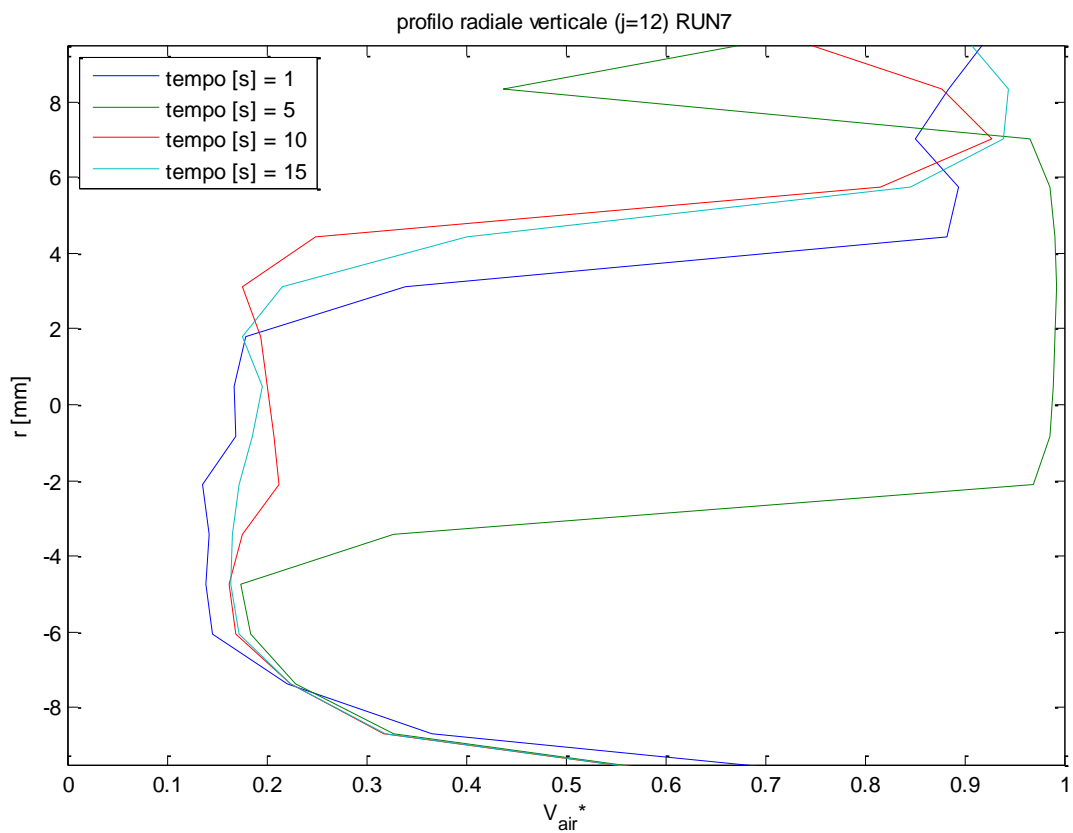
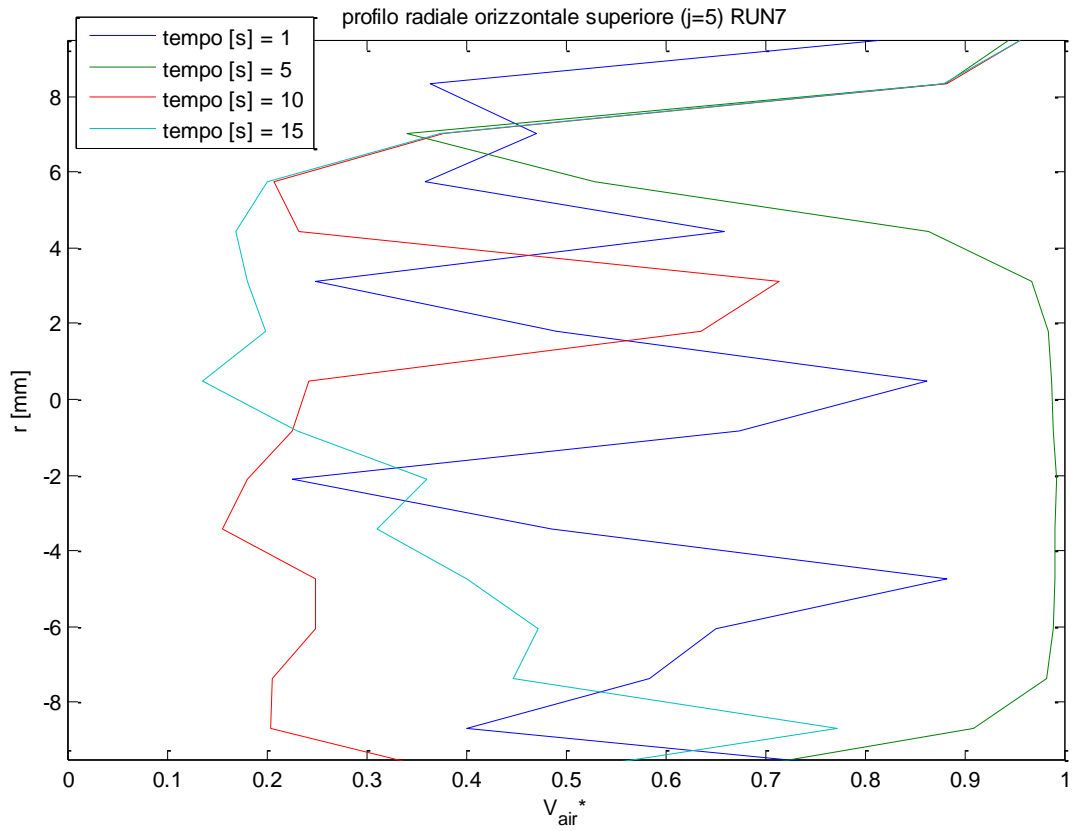


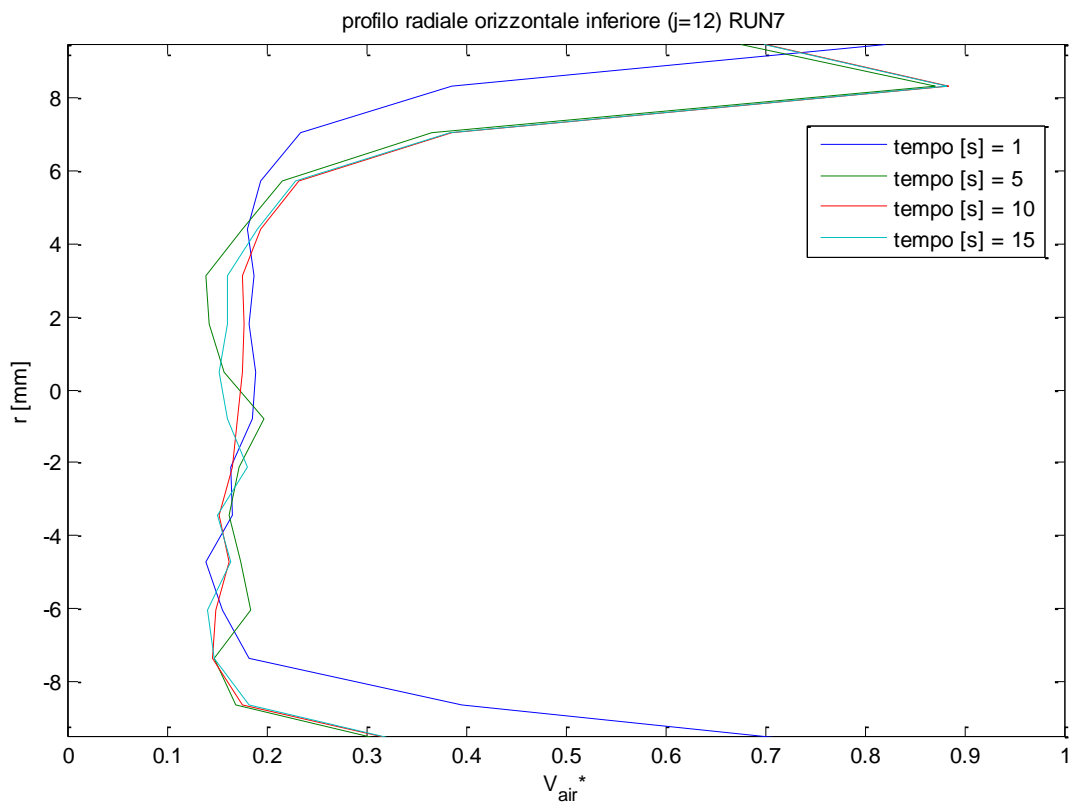
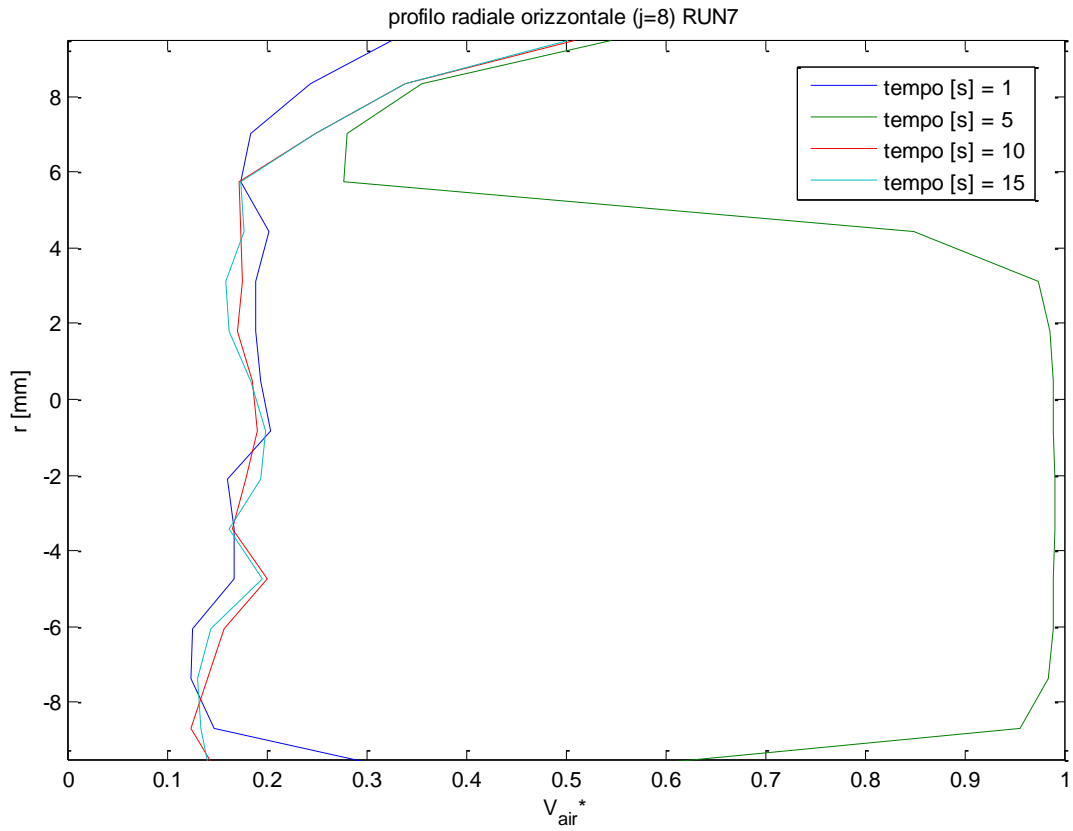




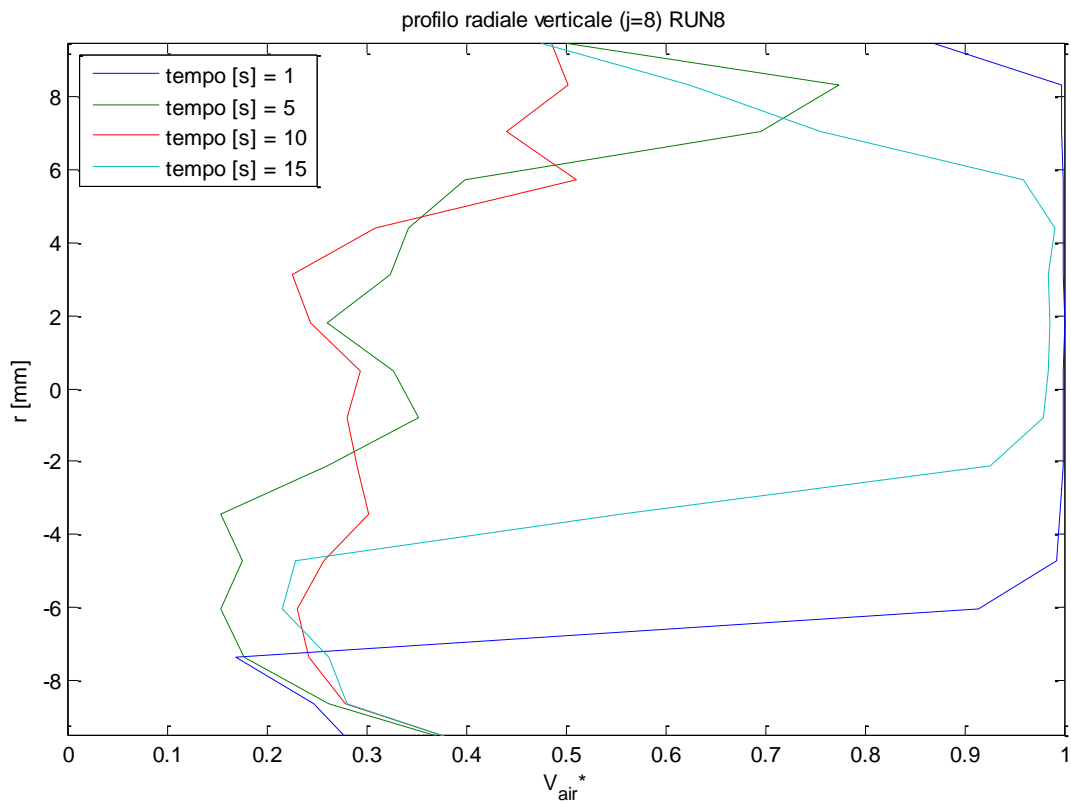
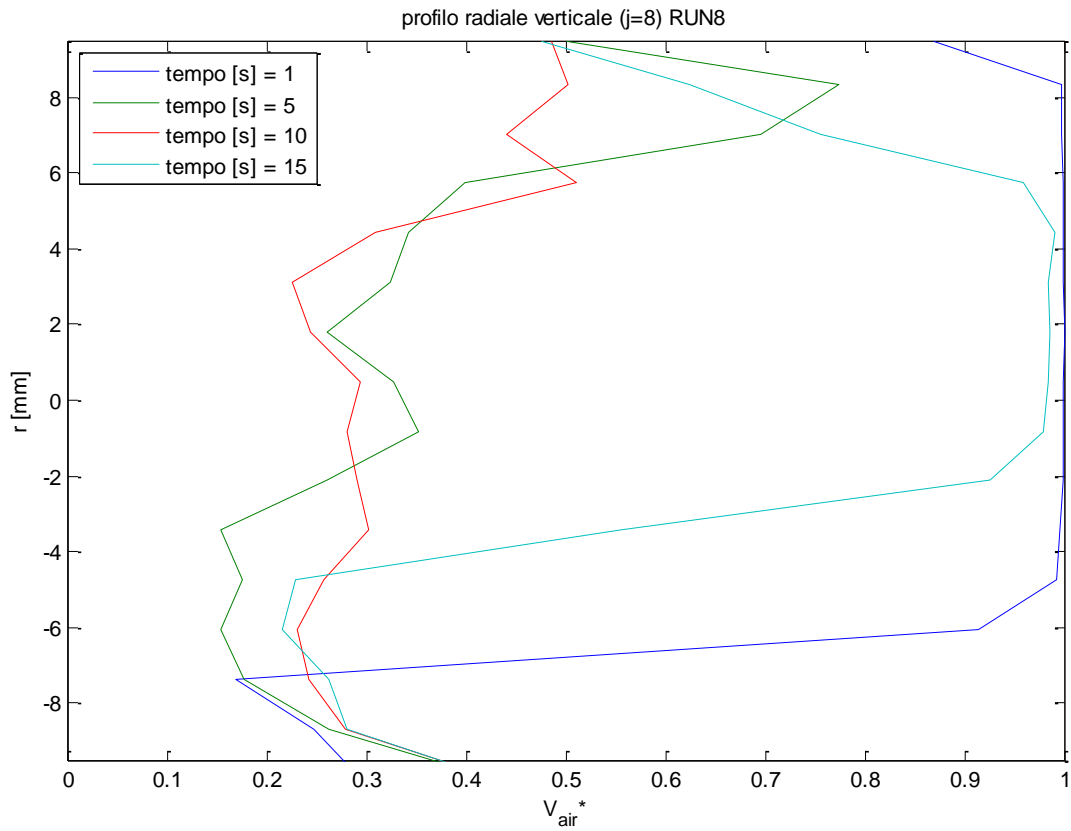
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
7	8.3E-05	0.511944	1.61	0.000162	0.125424	1.479547374

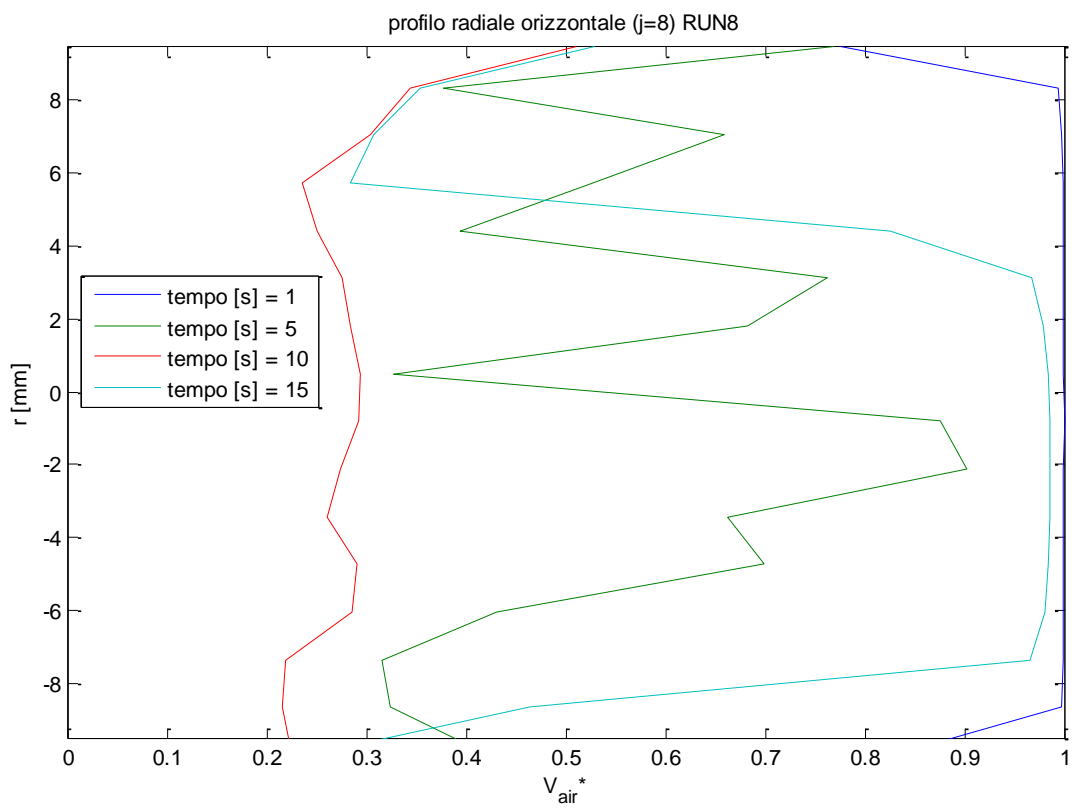
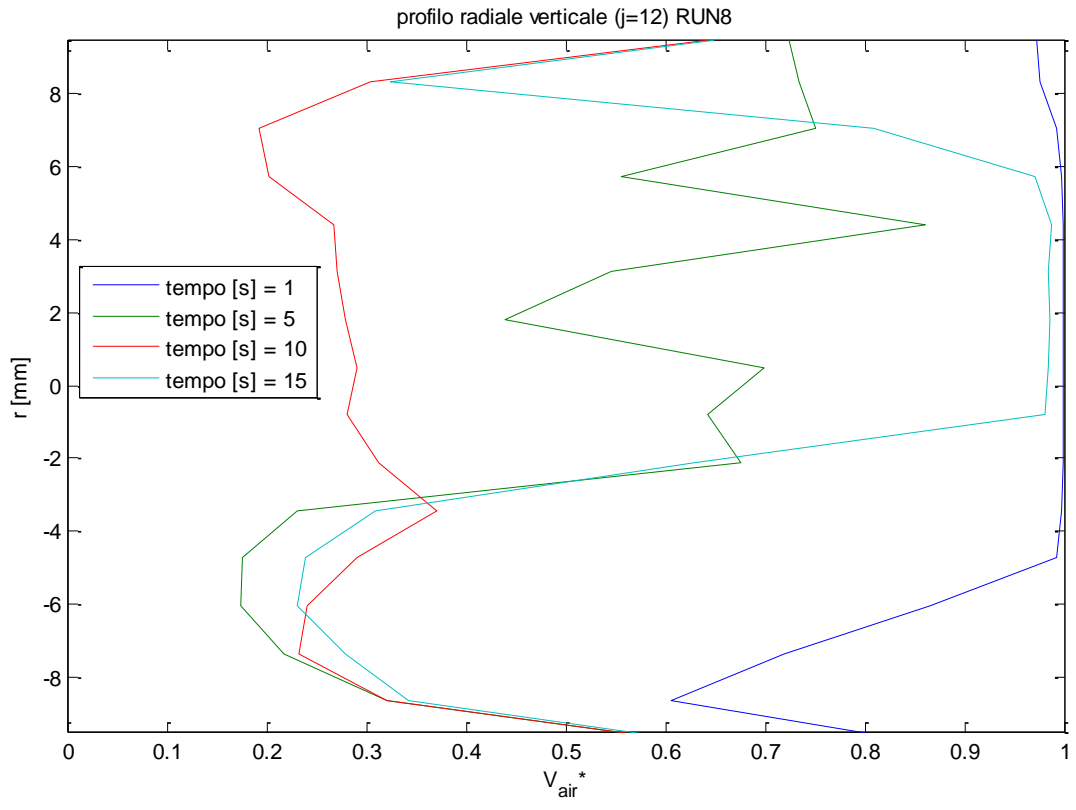


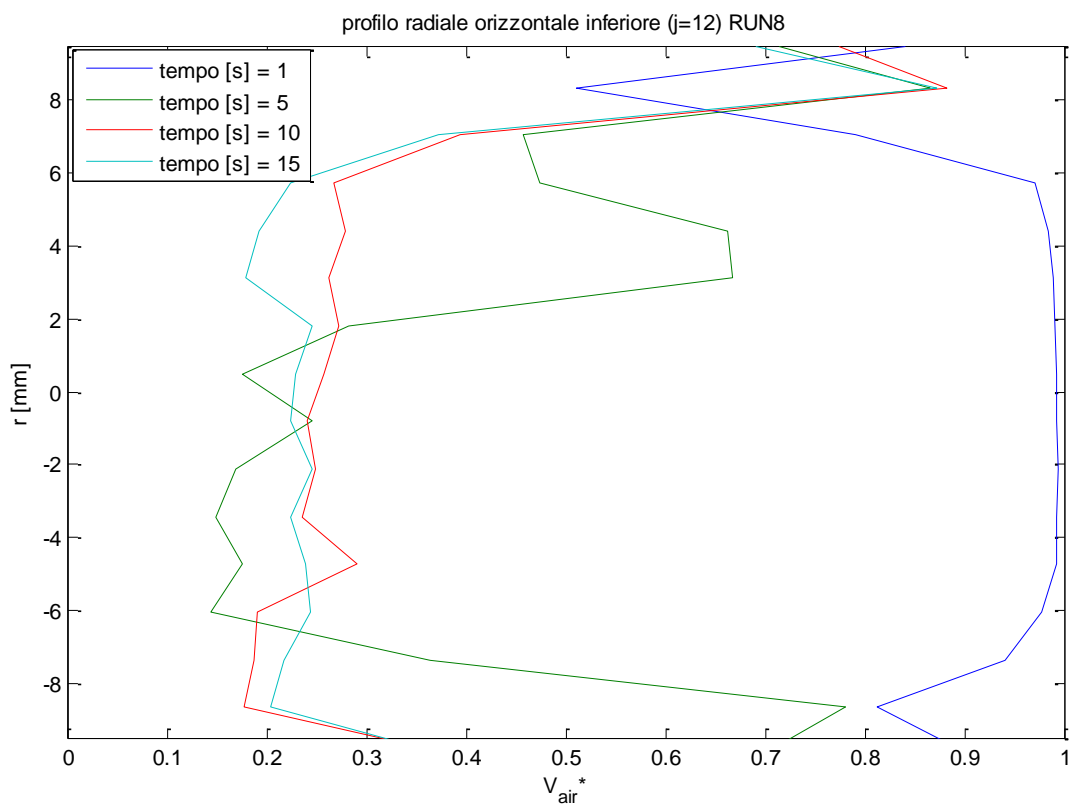
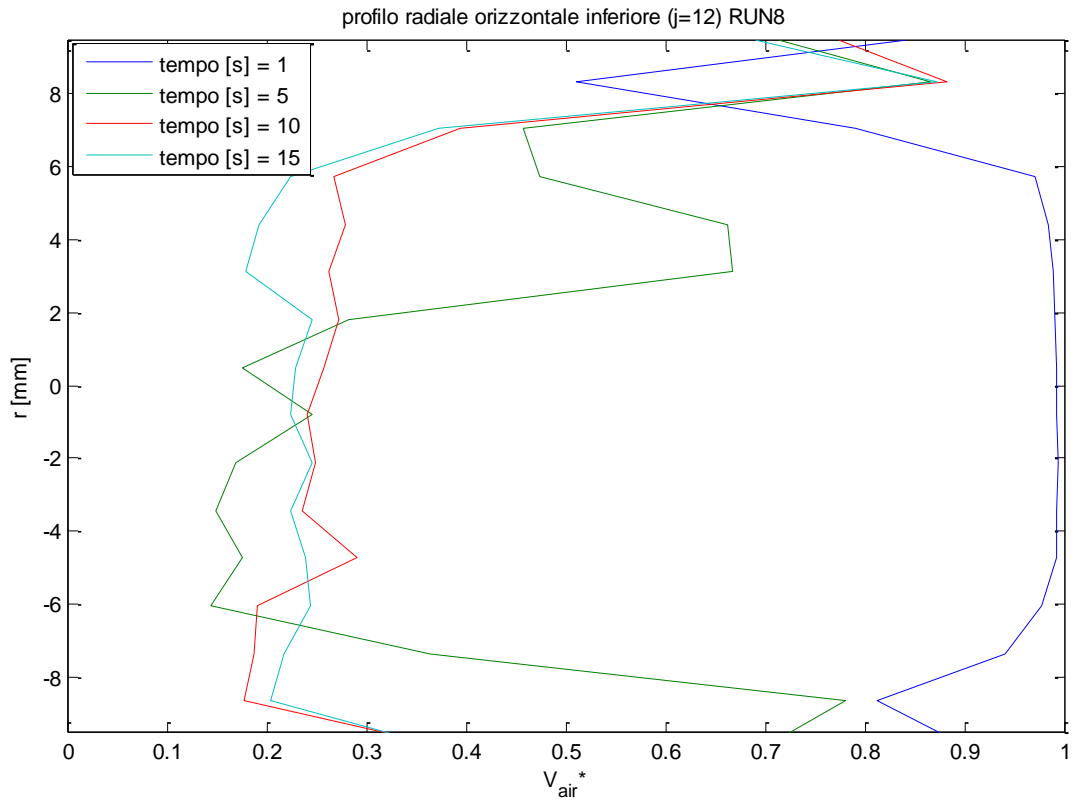




RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
8	0.000408	0.423611	1.62	0.000963	0.613114	1.224259221



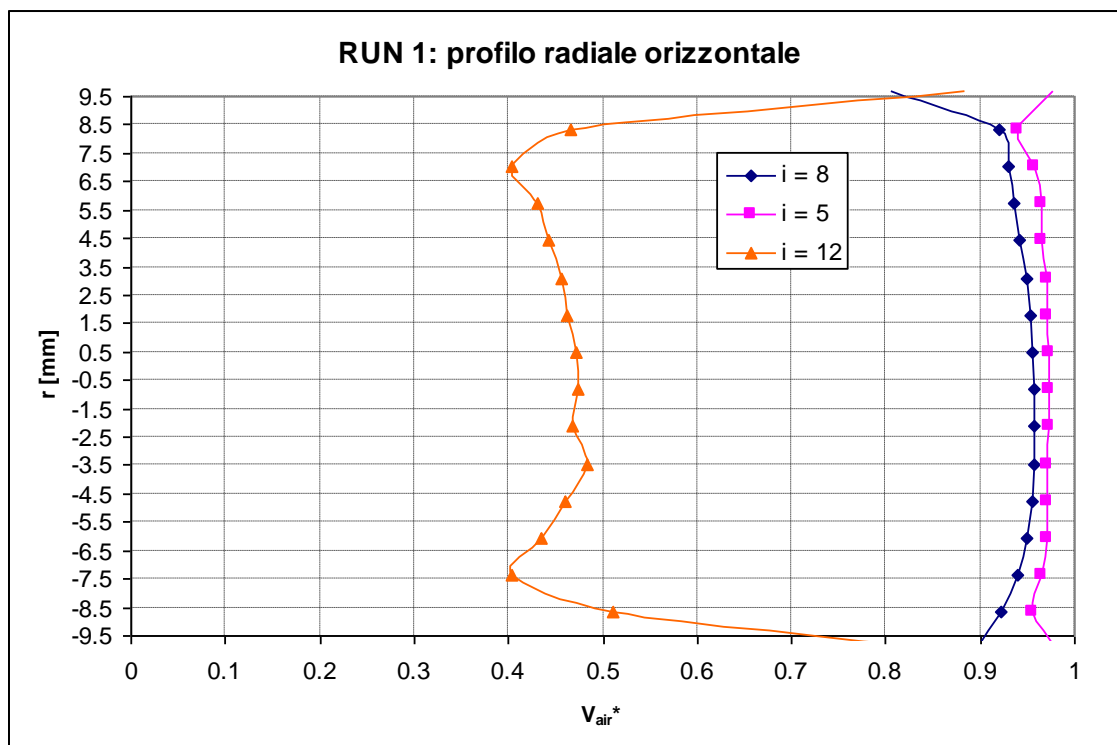
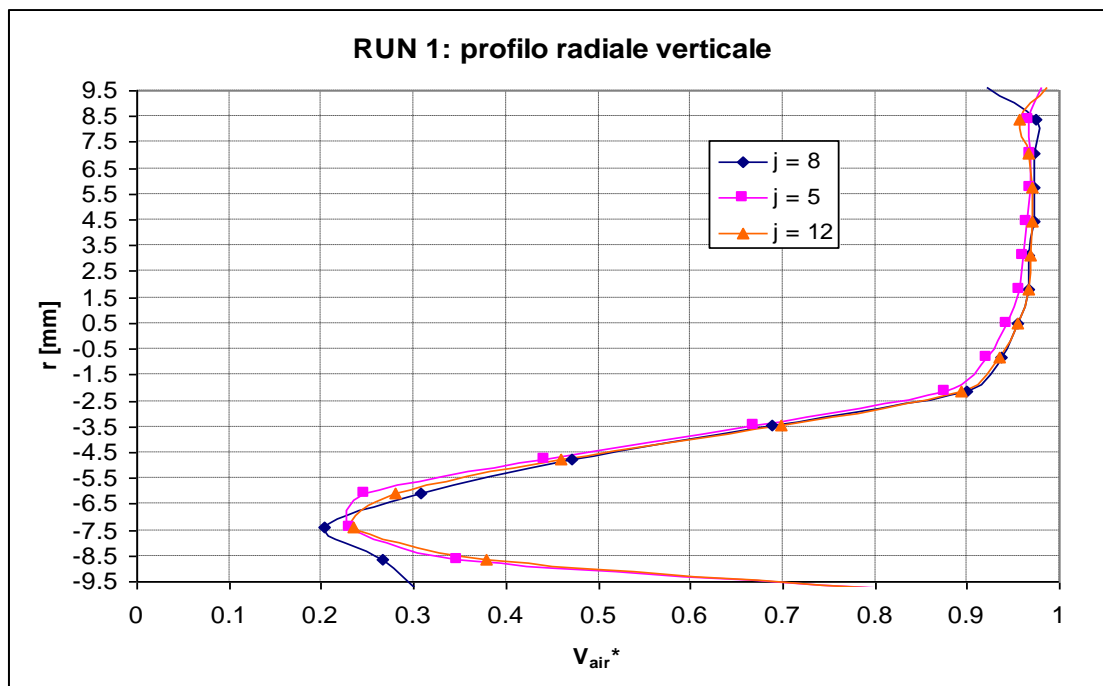




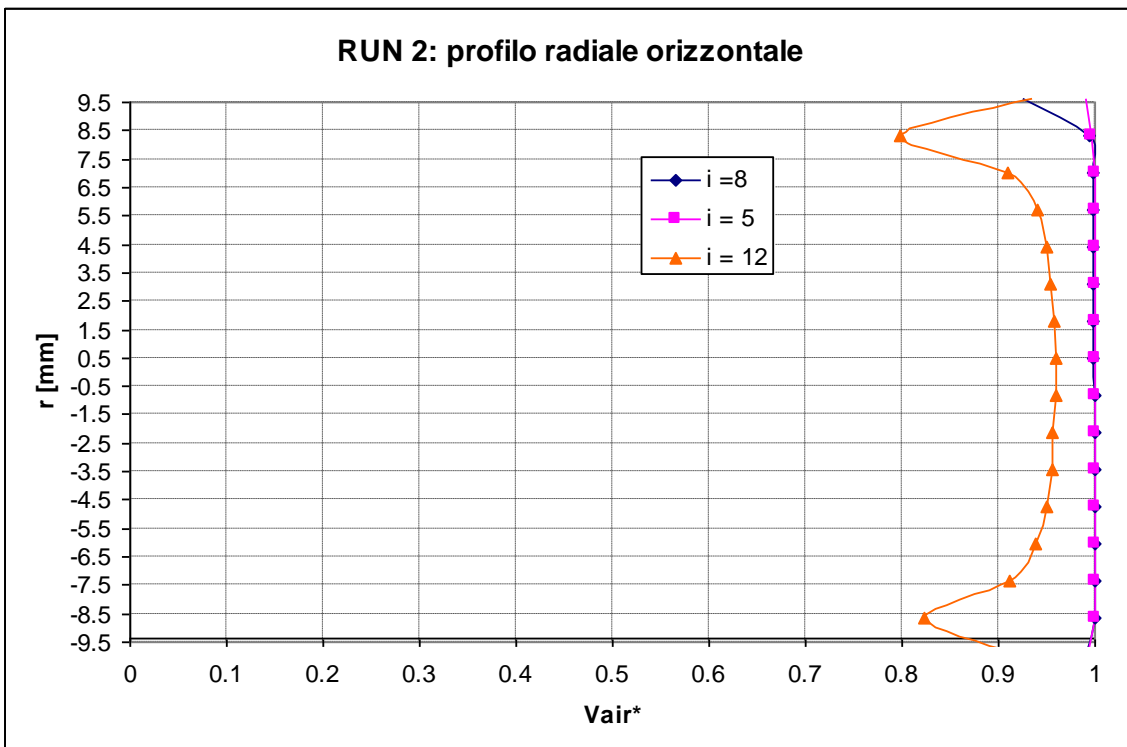
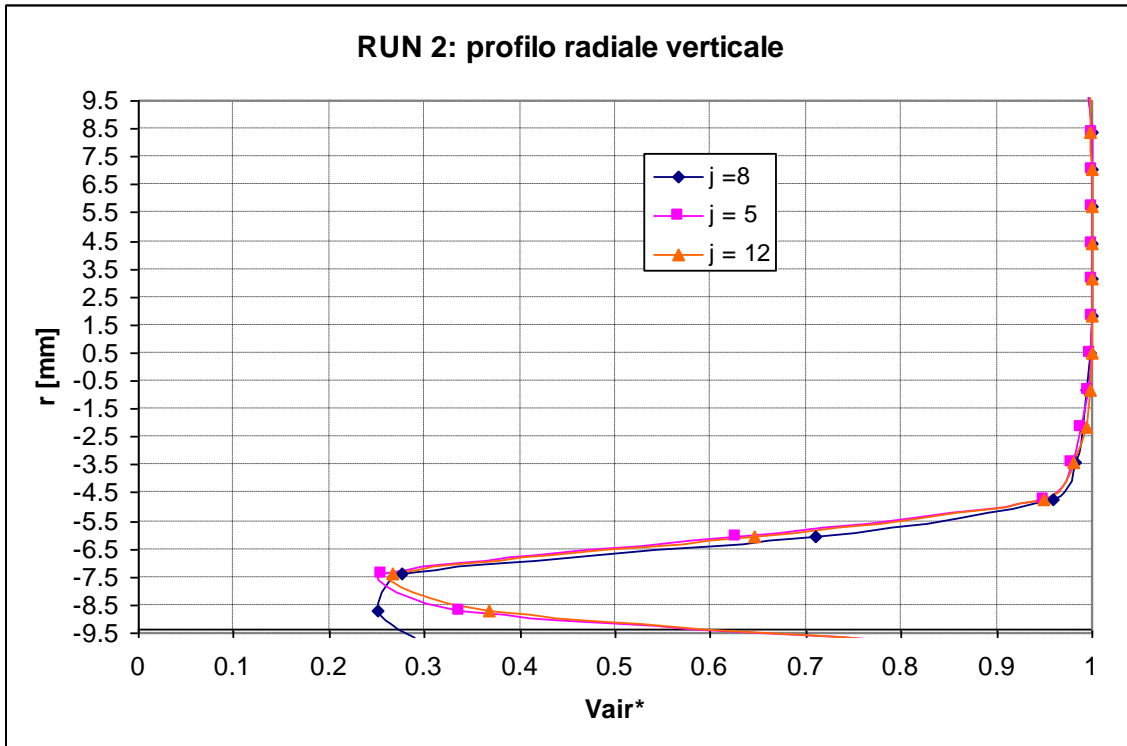
APPENDICE II

Profili della frazione di vuoto cordali medi rispetto al tempo

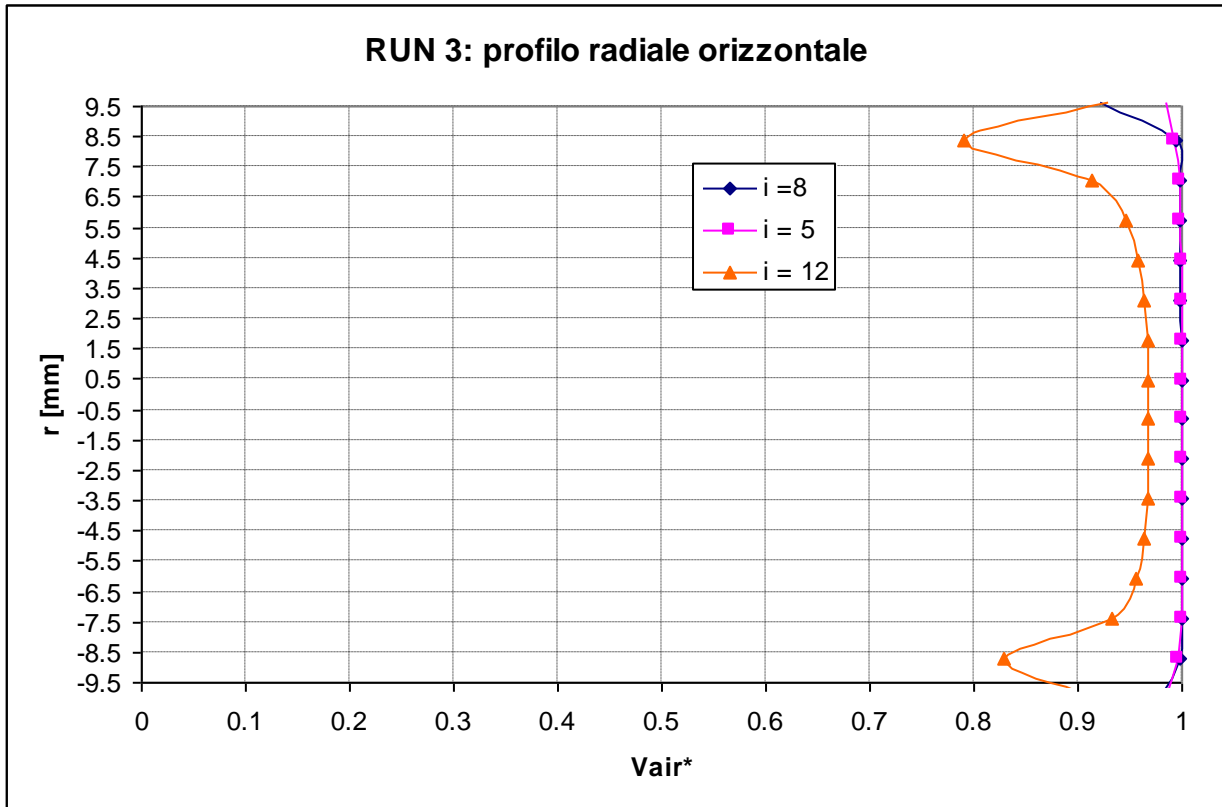
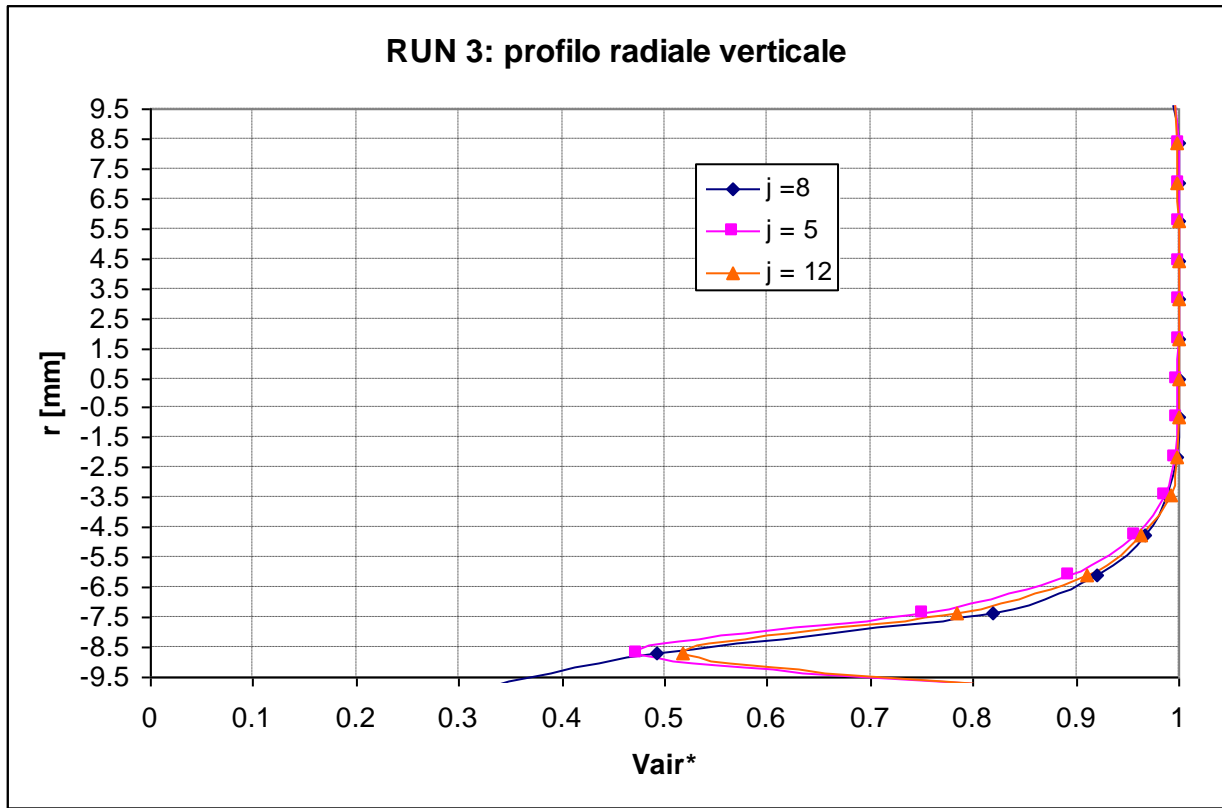
RUN	W _{air} [kg/s]	W _{water} [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	J _g [m/s]	J _l [m/s]
1	0.000817	0.027778	1	0.028564	1.98649	0.080279293



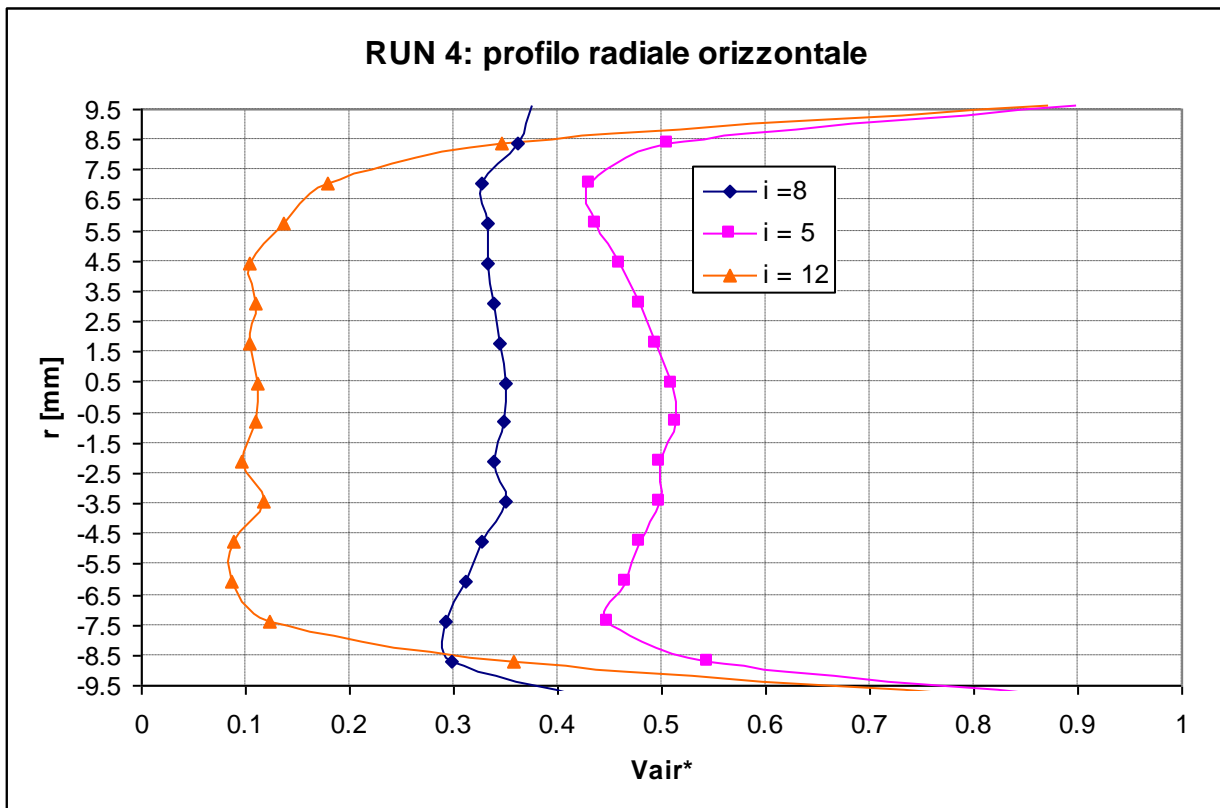
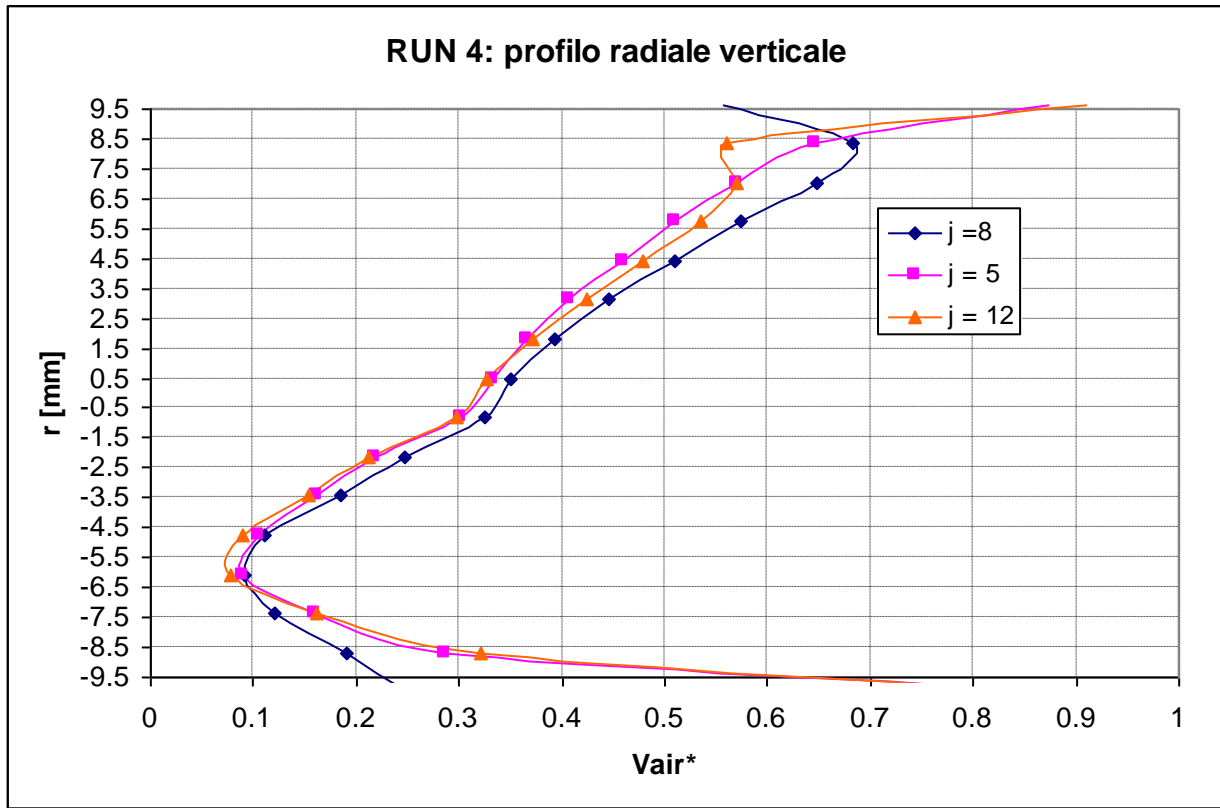
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
2	0.002008	0.027778	1.14	0.067404	4.283117	0.080279293



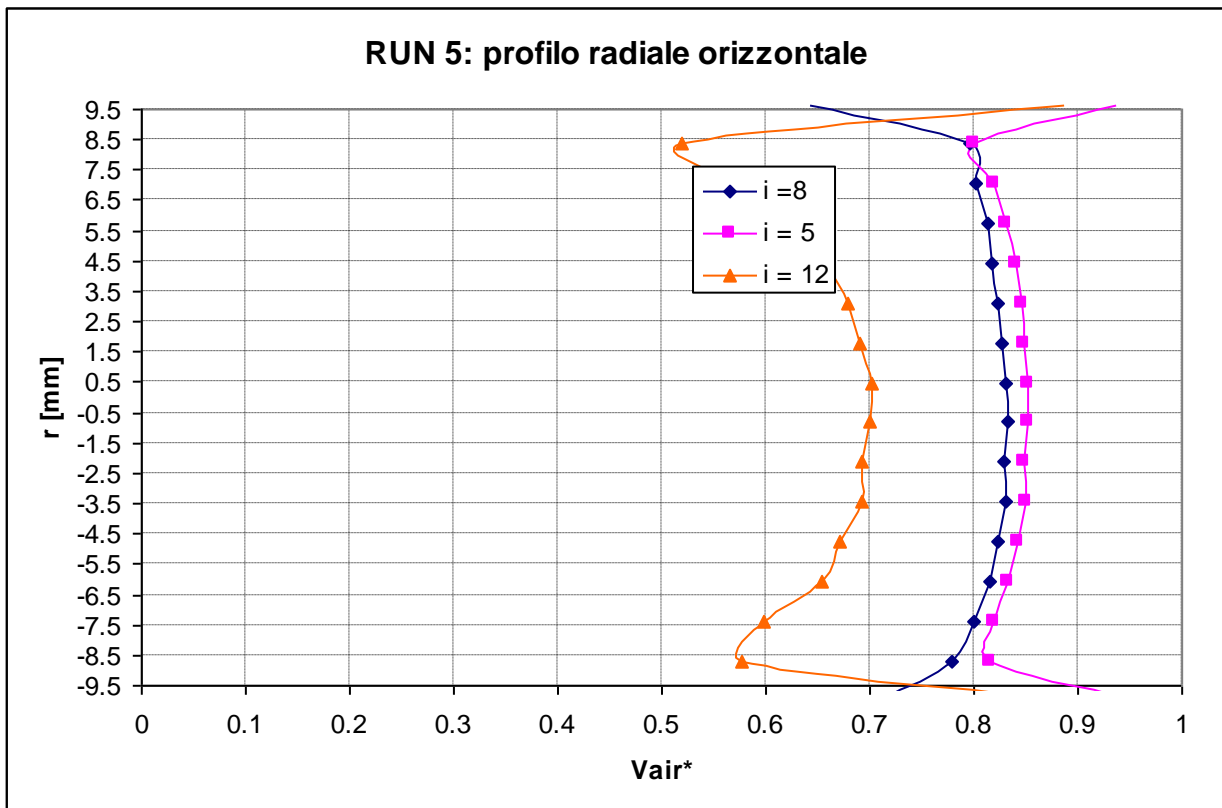
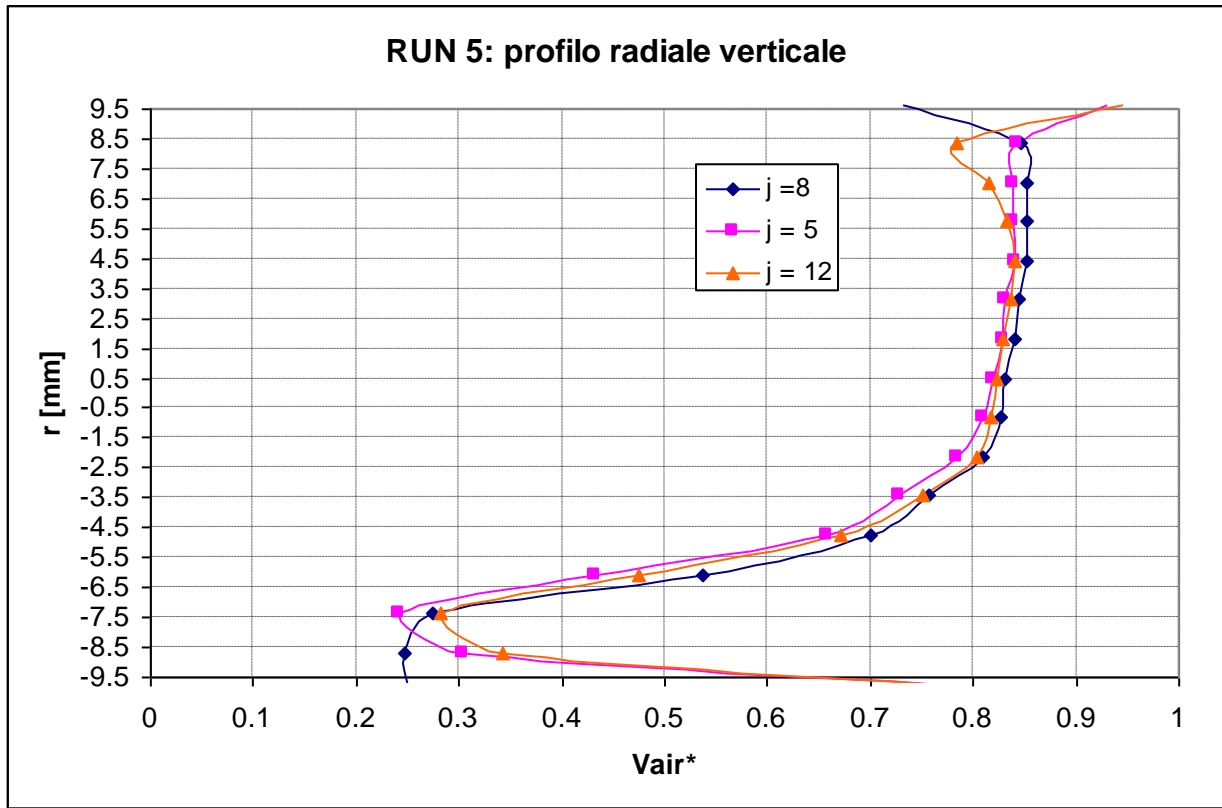
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
3	0.00391	0.027778	1.17	0.123394	8.127861	0.080279293



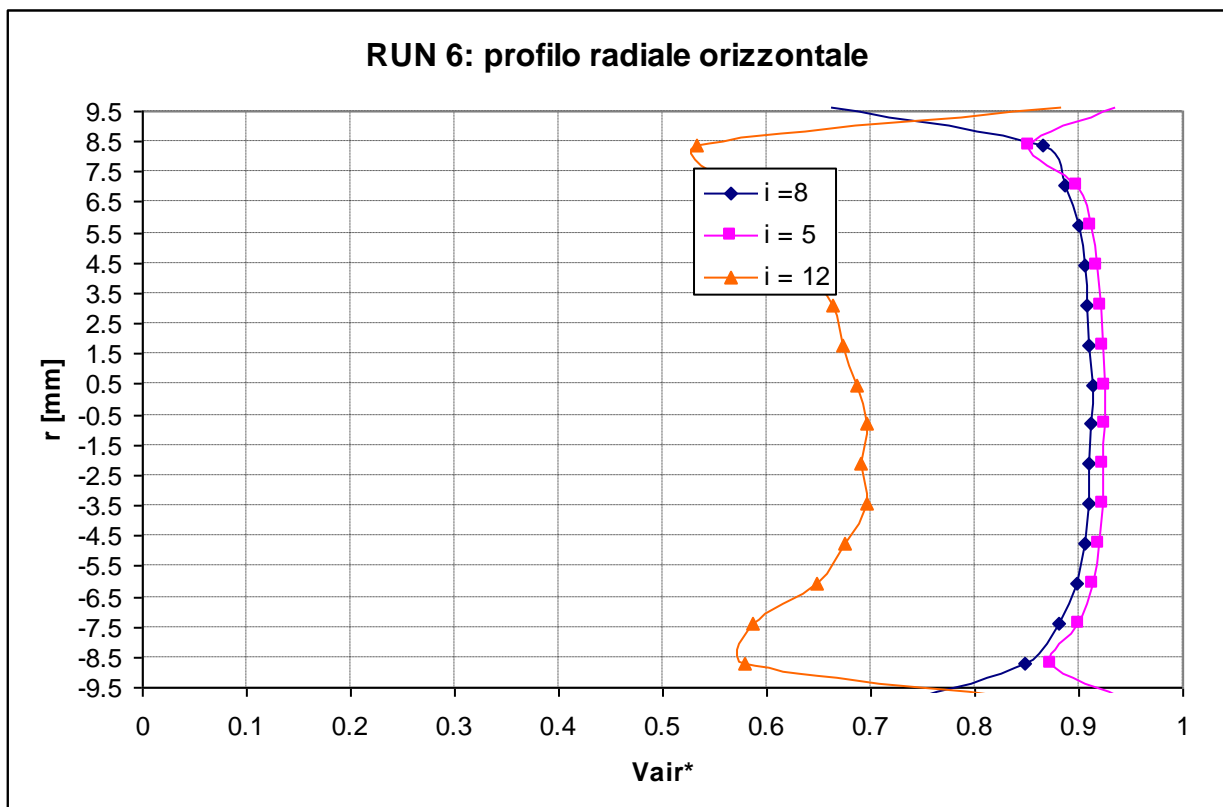
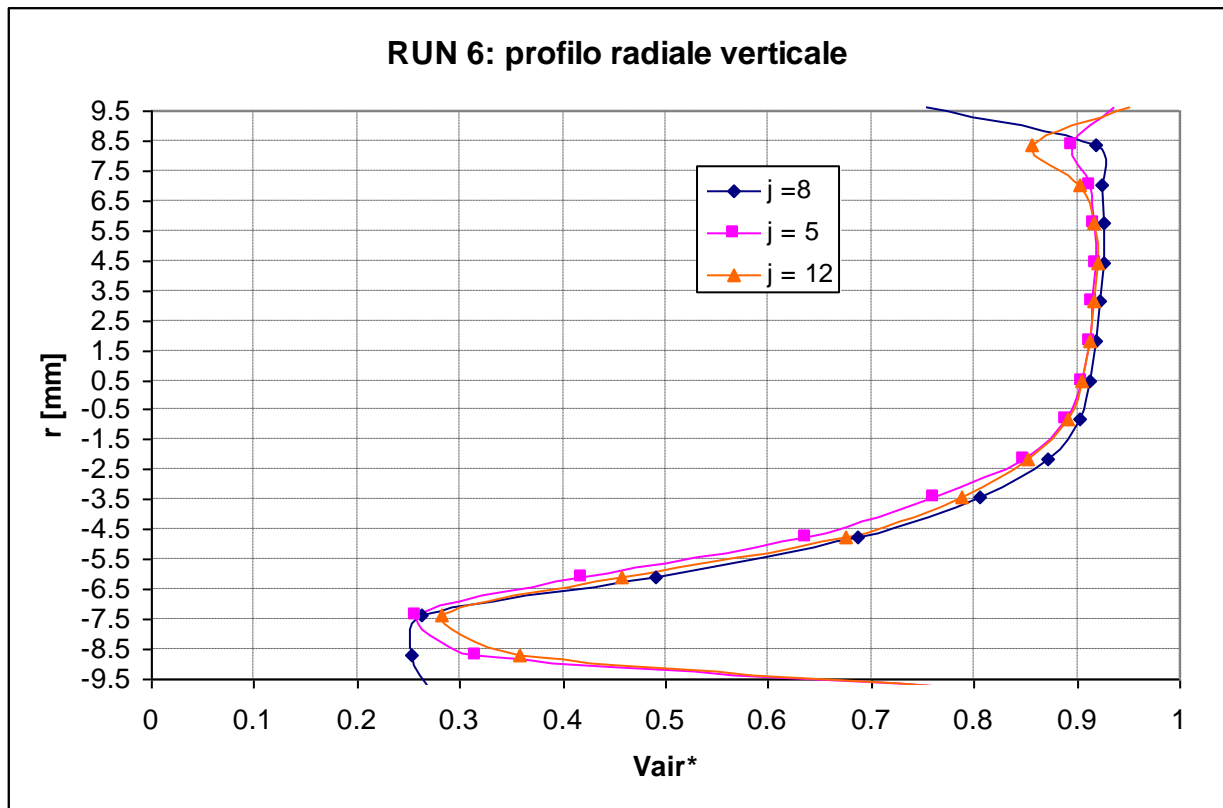
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
4	8.3E-05	0.269444	1.25	0.000308	0.161546	0.778709144



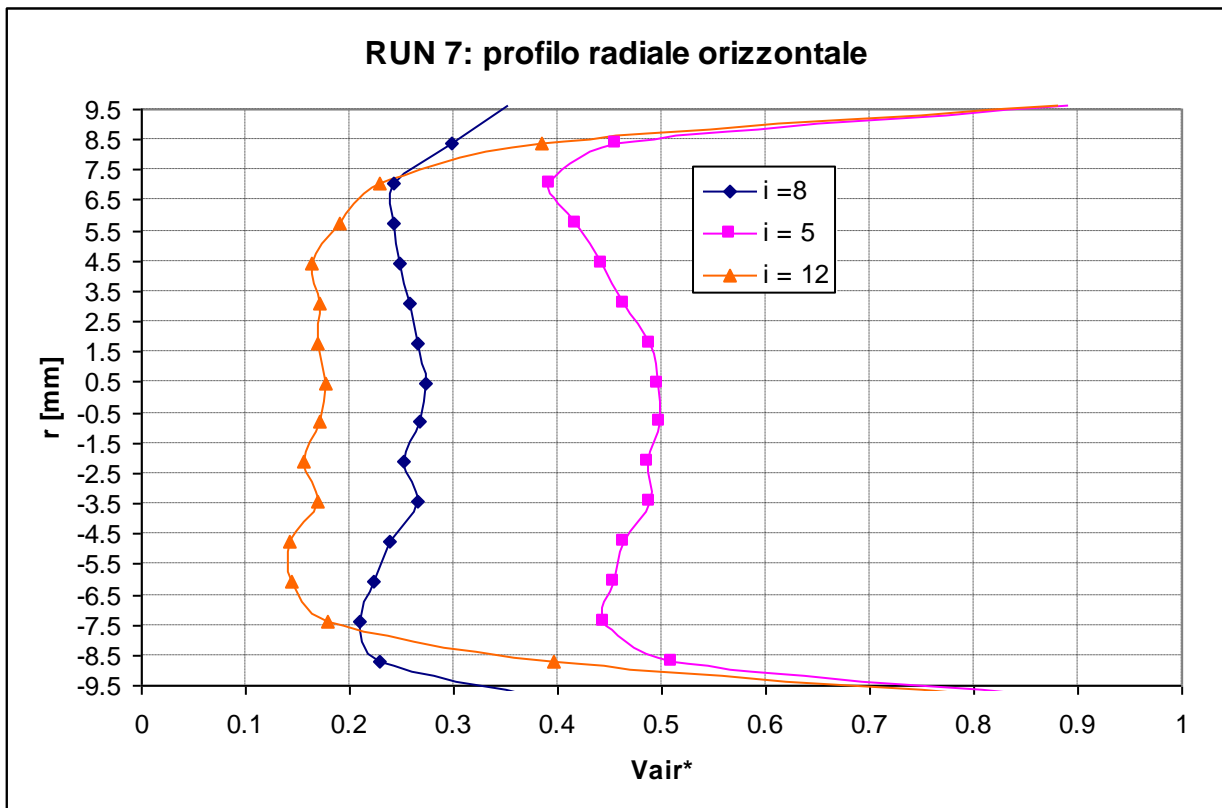
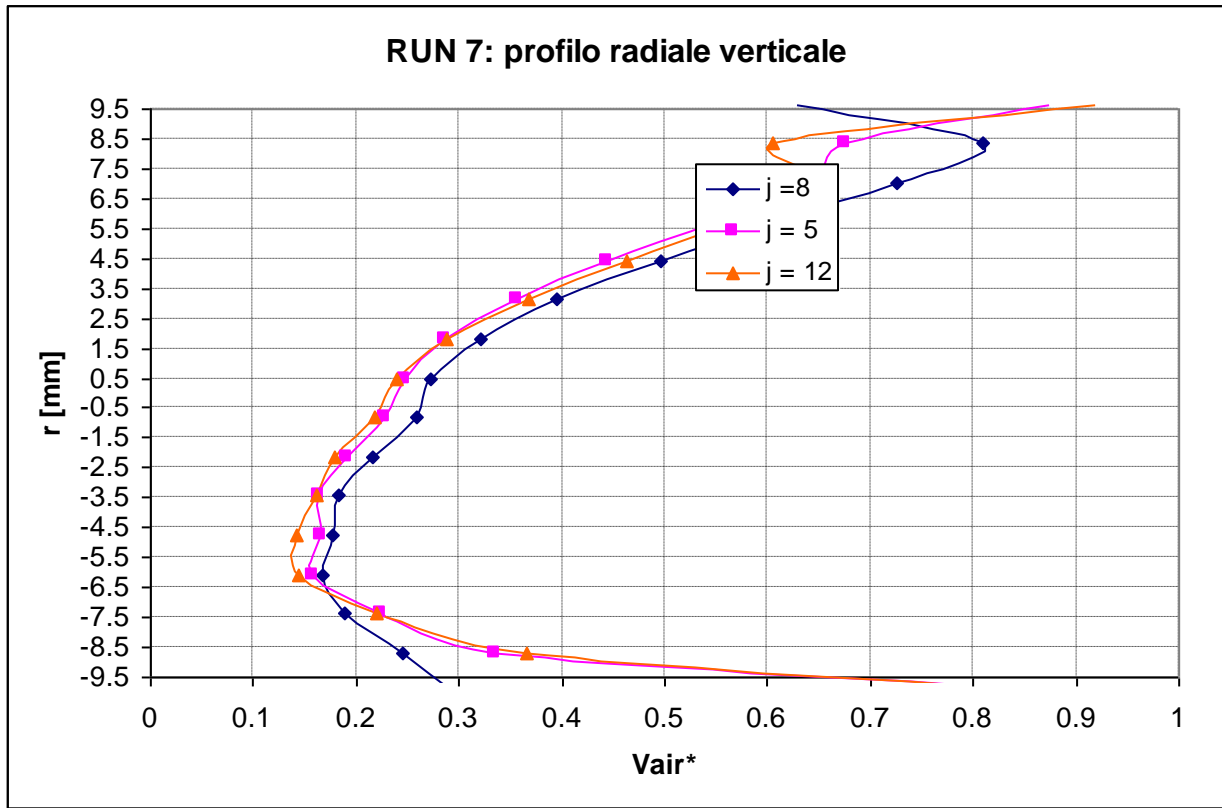
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
5	0.000817	0.305556	1.47	0.002666	1.351354	0.883072225



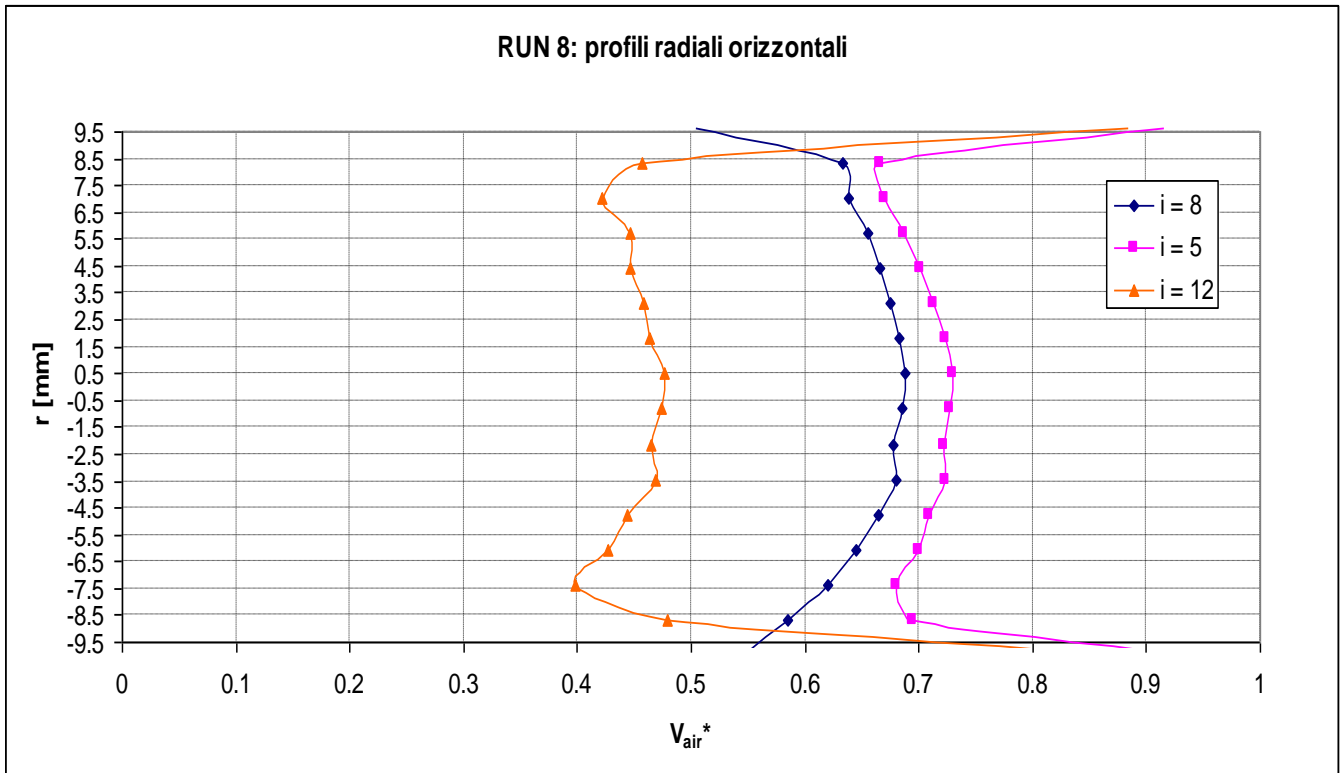
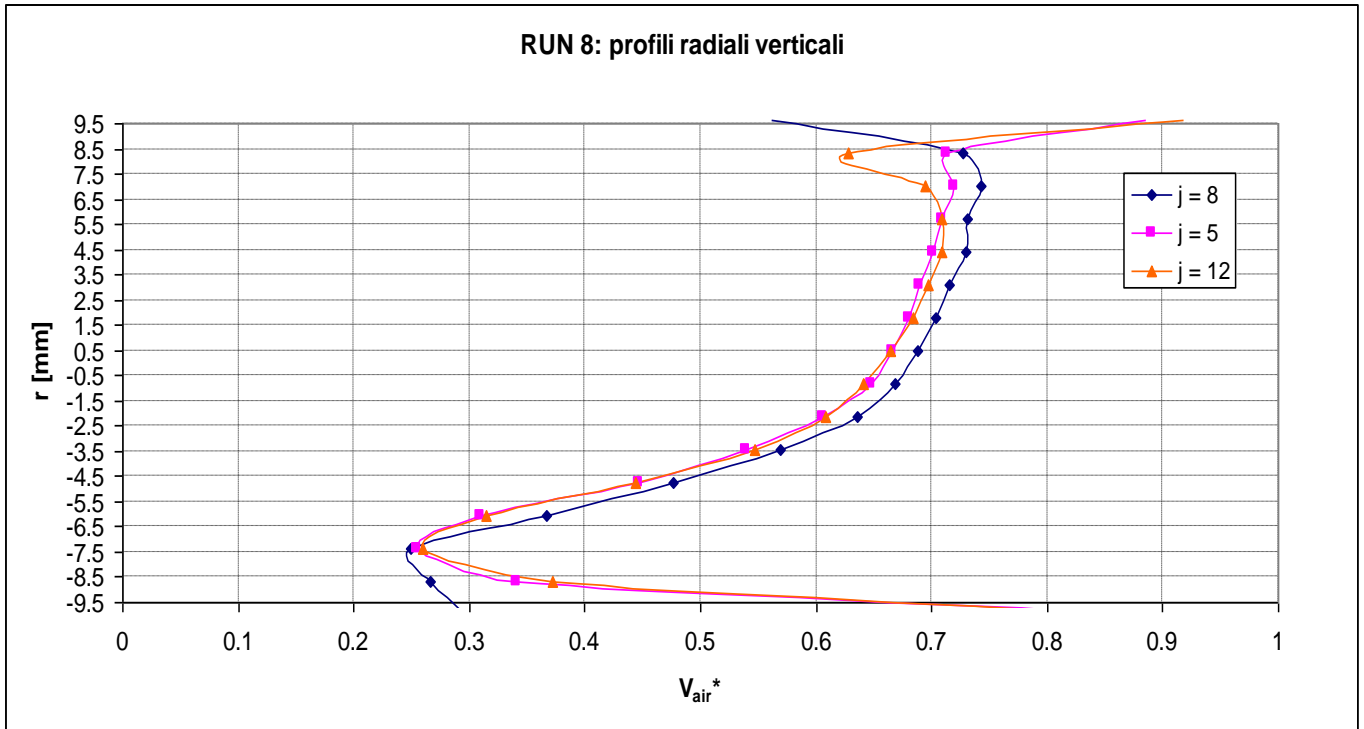
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
6	0.002008	0.269444	1.66	0.007396	2.941418	0.778709144



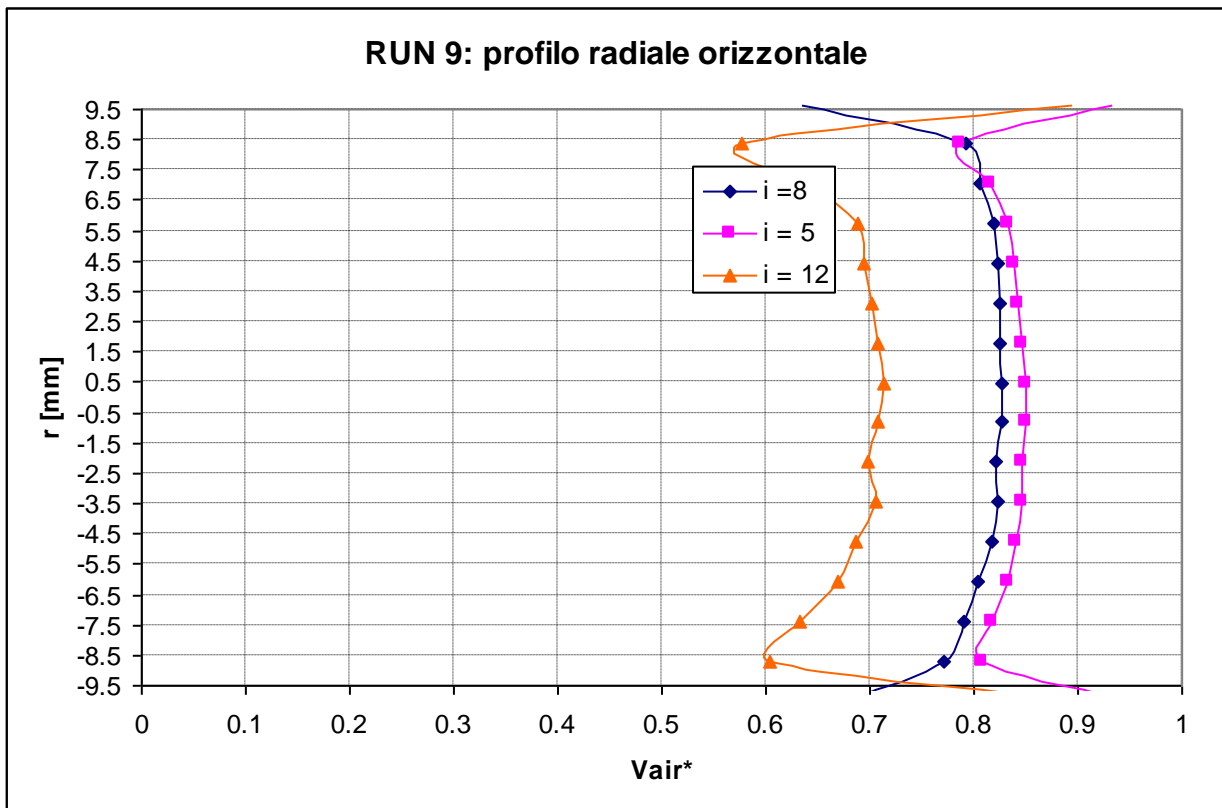
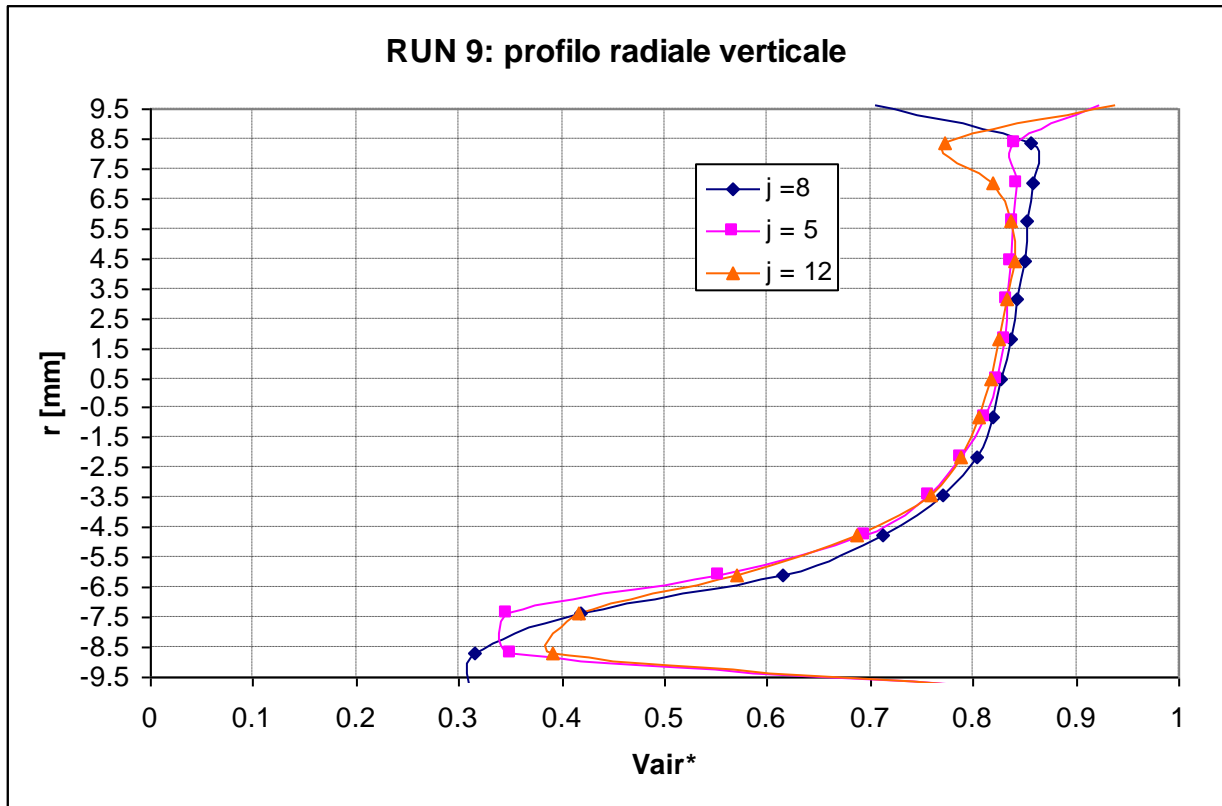
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
7	8.3E-05	0.511944	1.61	0.000162	0.125424	1.479547374



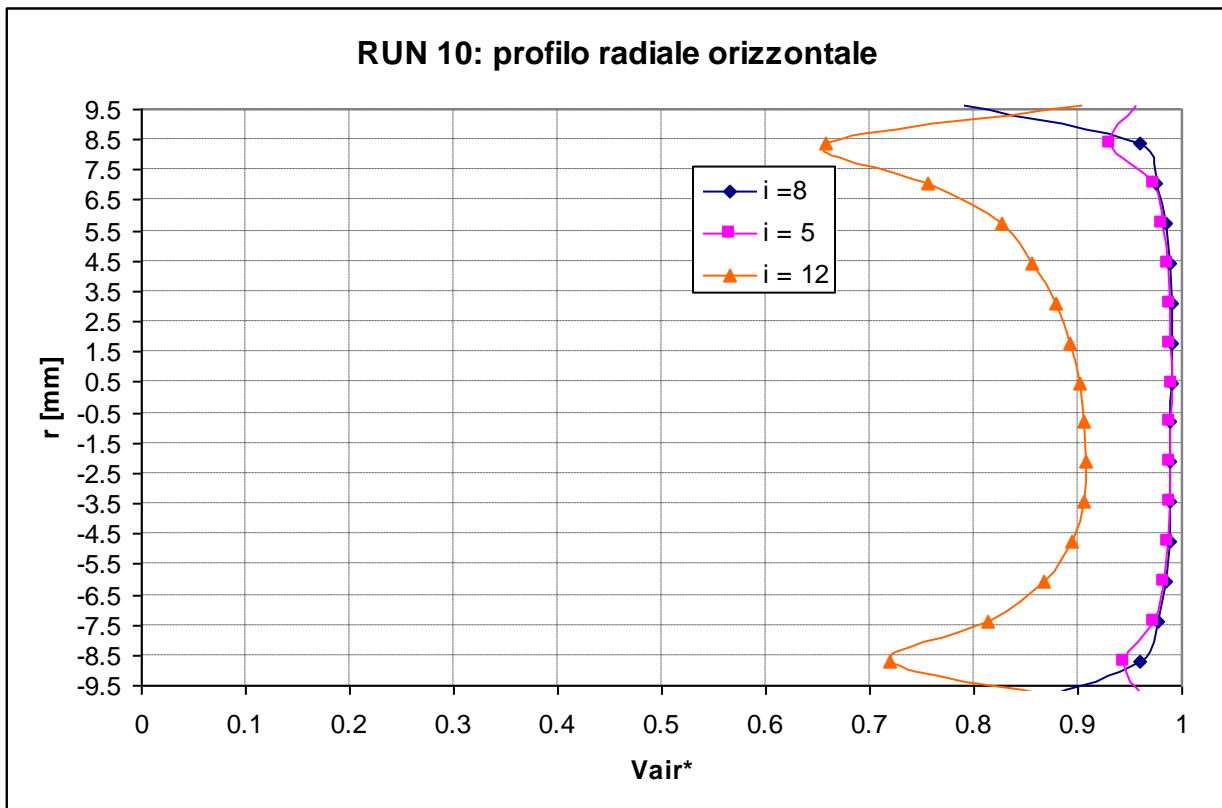
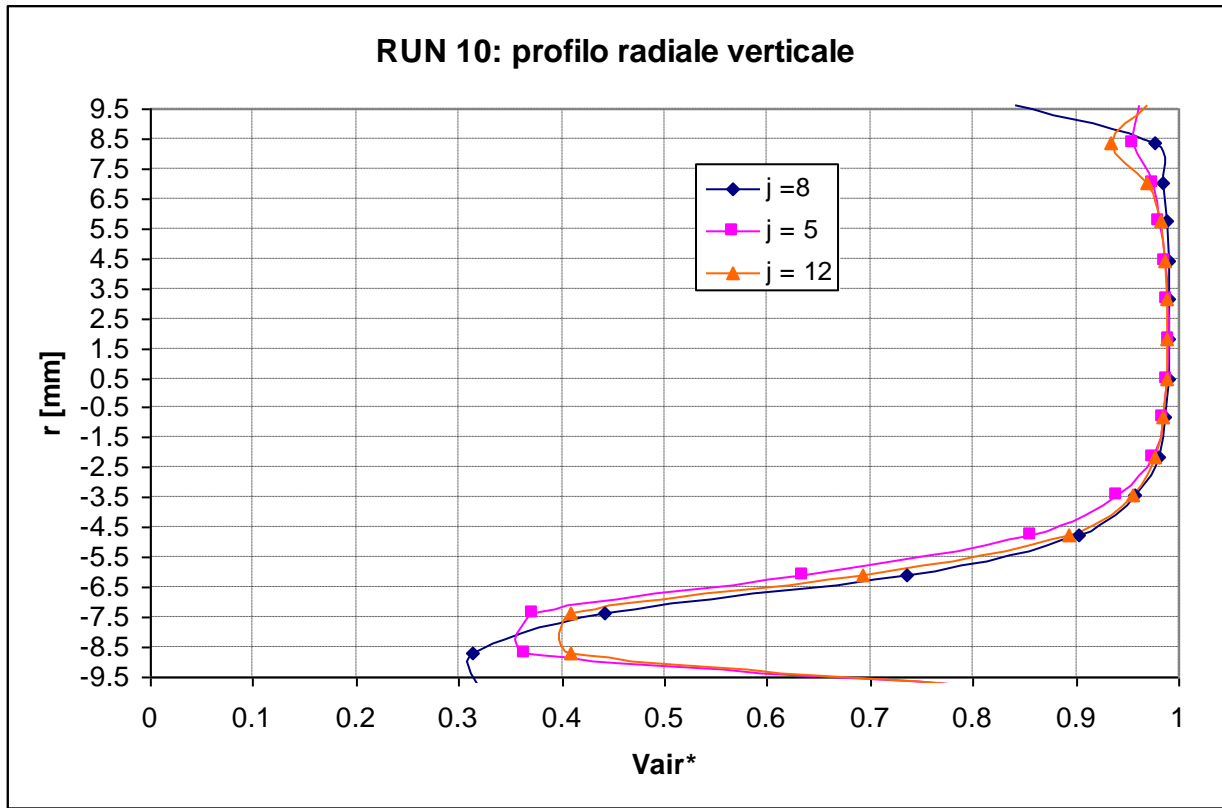
RUN	W _{air} [kg/s]	W _{water} [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	J _g [m/s]	J _l [m/s]
8	0.000408	0.423611	1.62	0.000963	0.613114	1.224259221



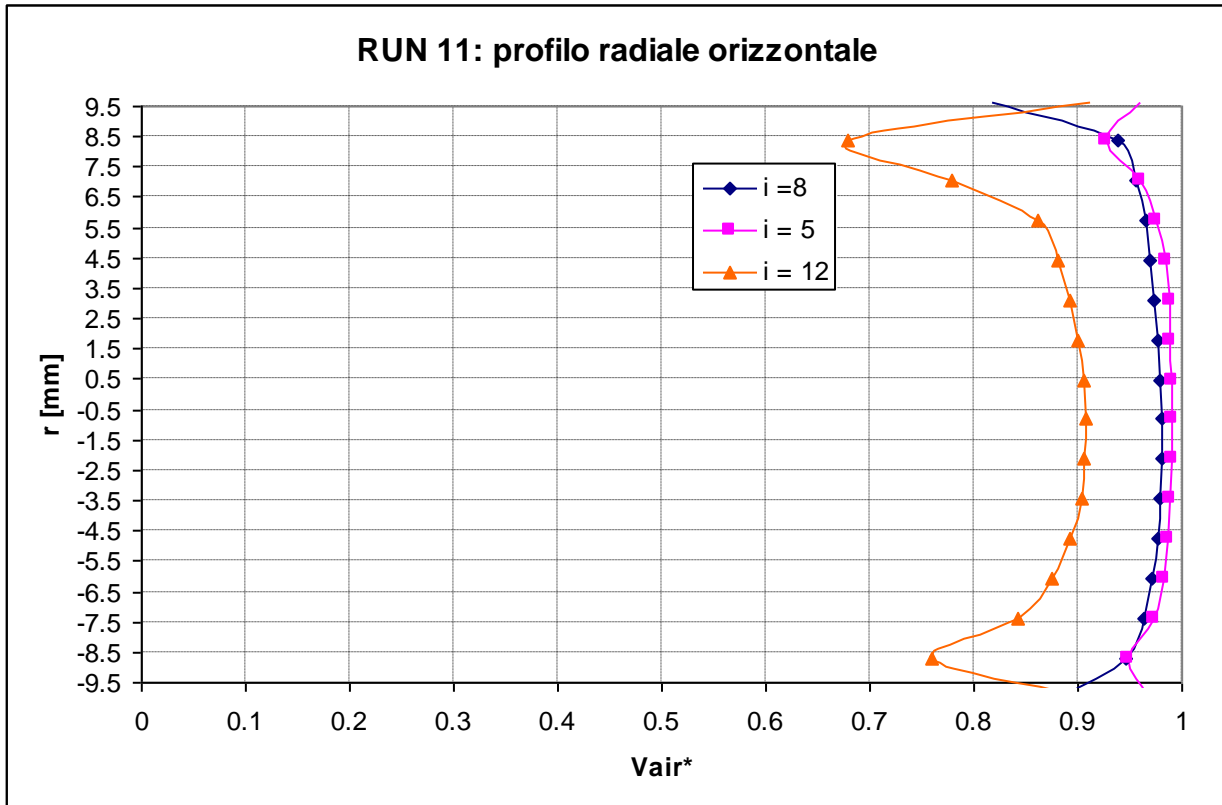
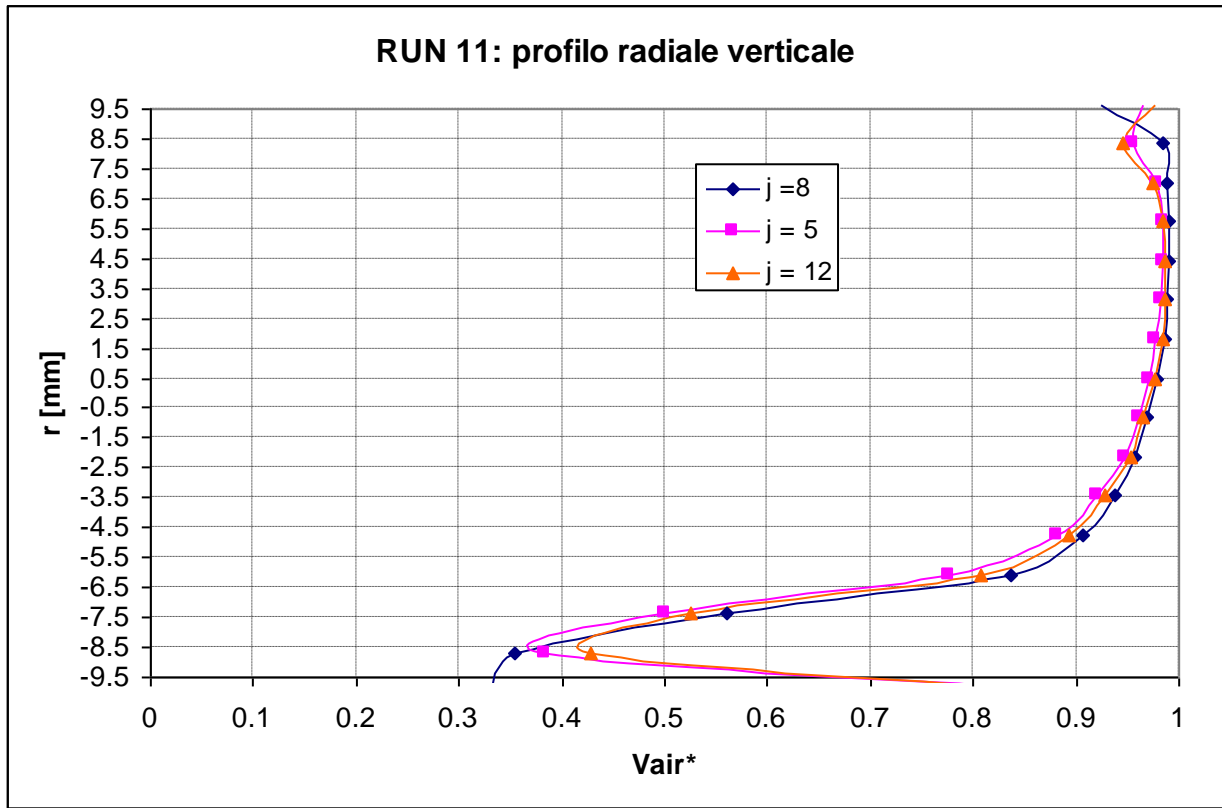
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
9	0.000817	0.369444	1.62	0.002206	1.226228	1.0677146



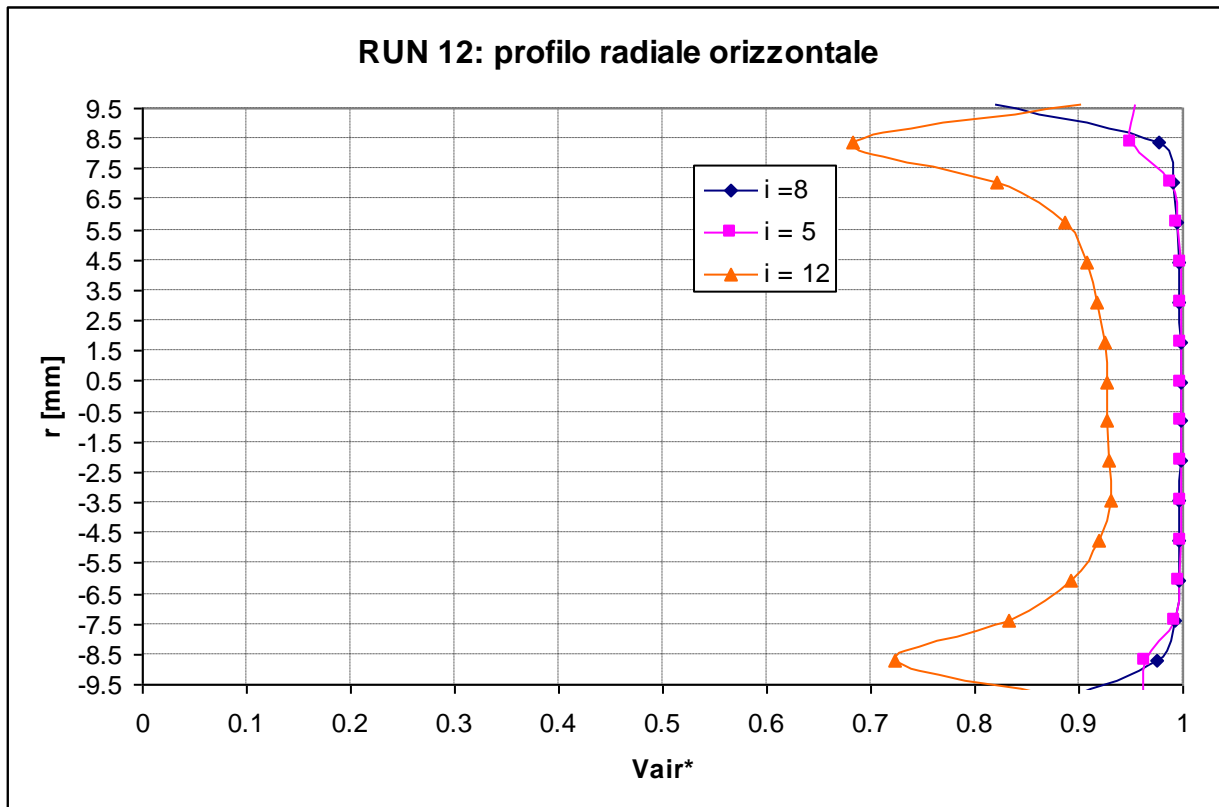
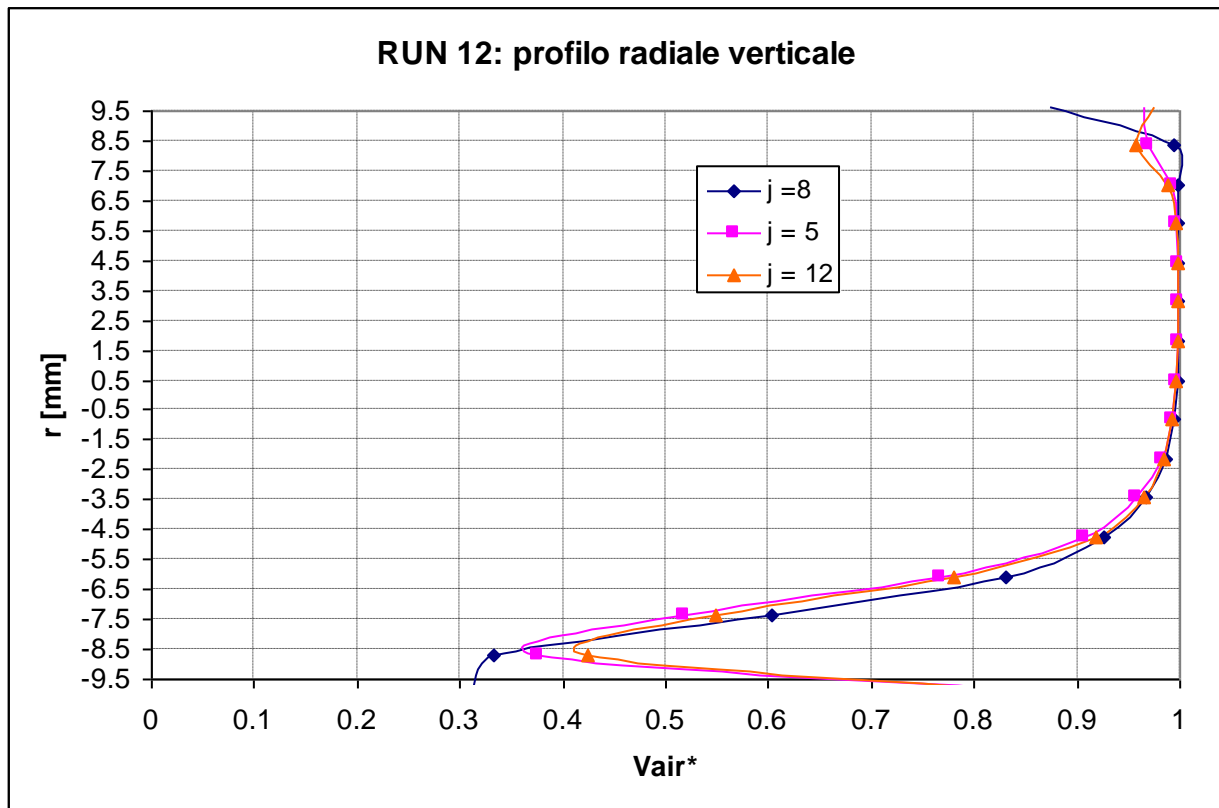
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
10	0.002008	0.277778	1.6	0.007176	3.051721	0.802792932



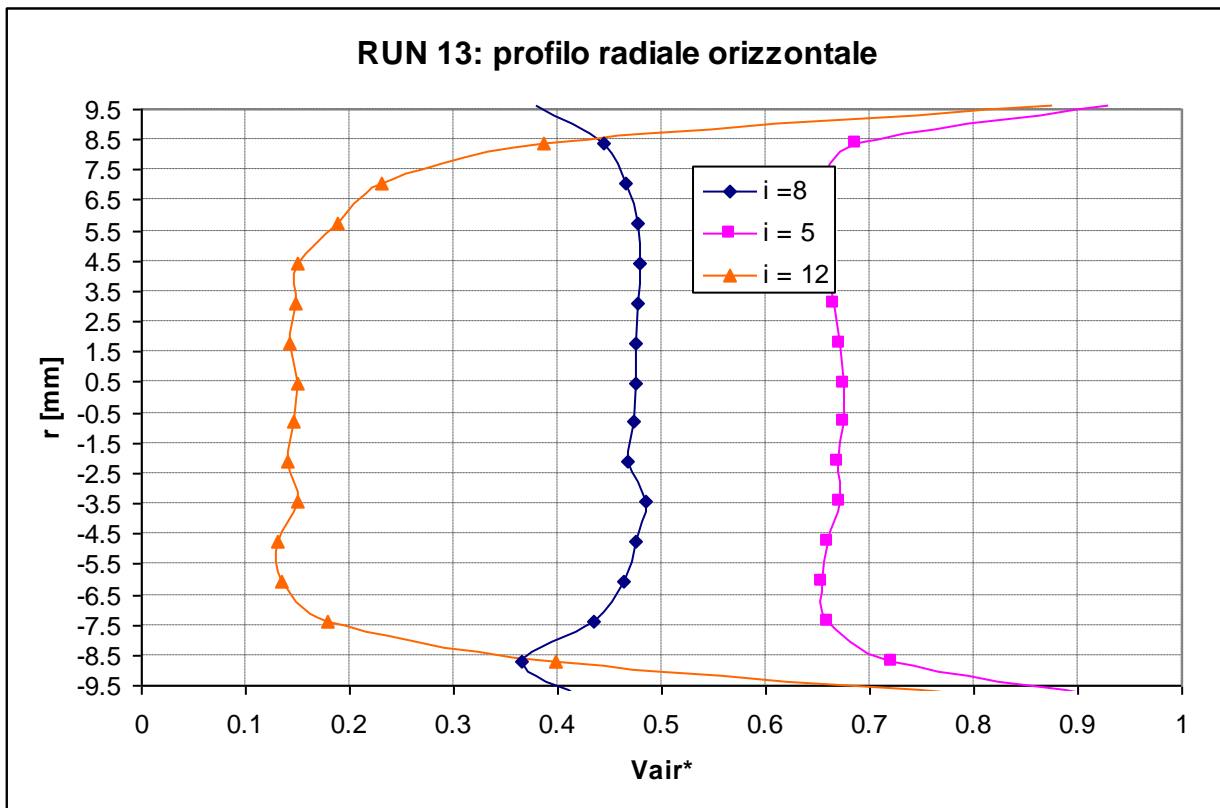
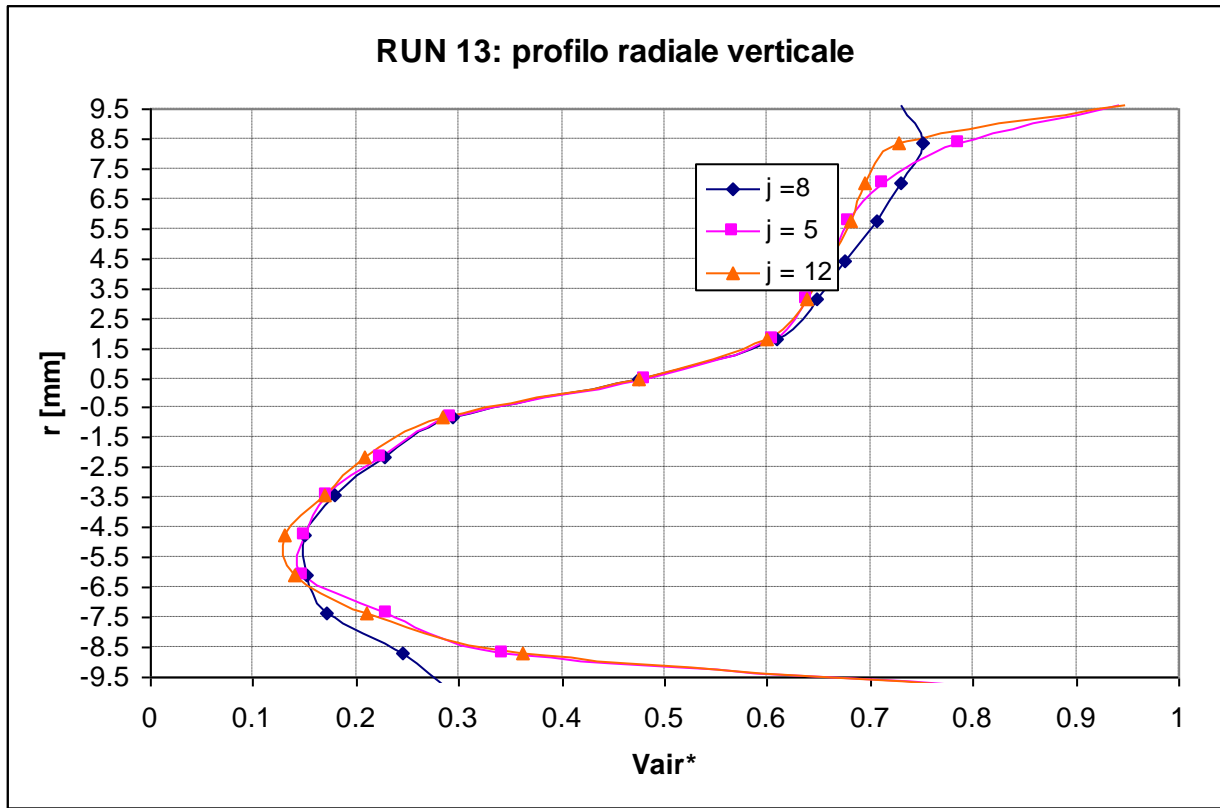
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
11	0.003184	0.277778	1.55	0.011334	4.996622	0.802792932



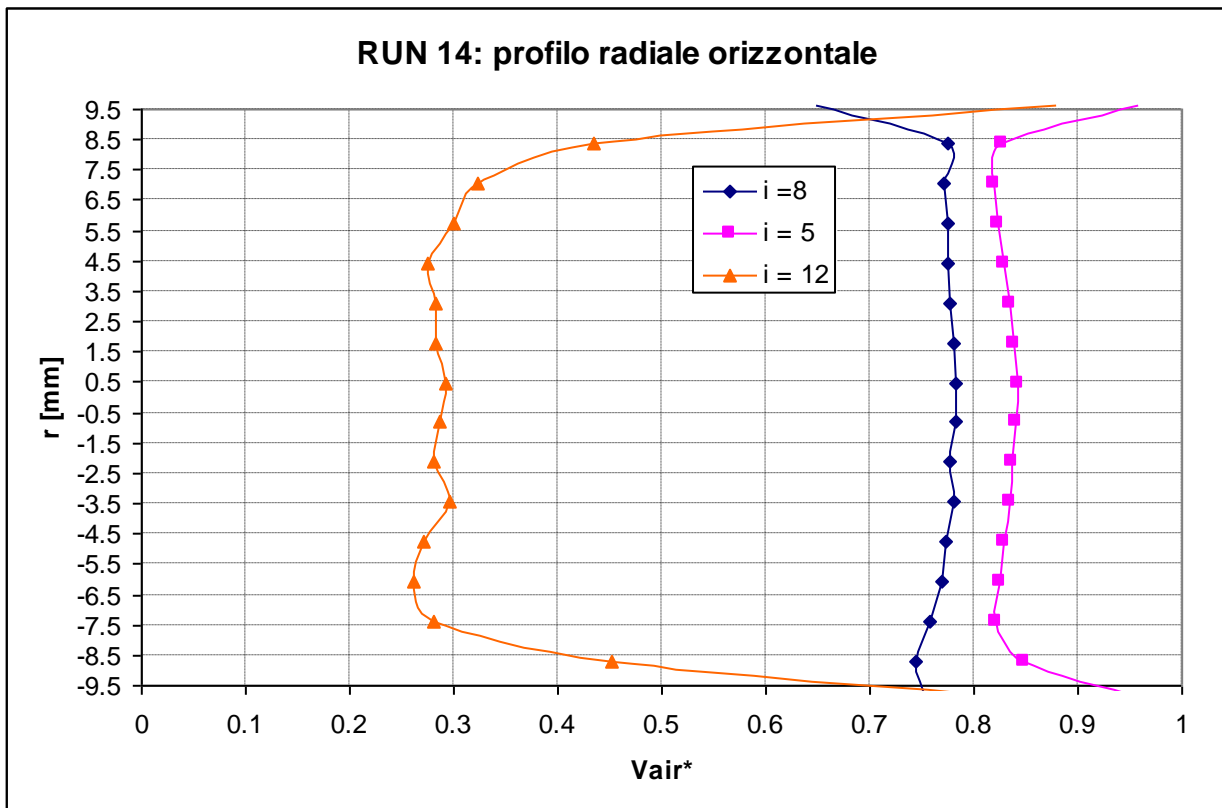
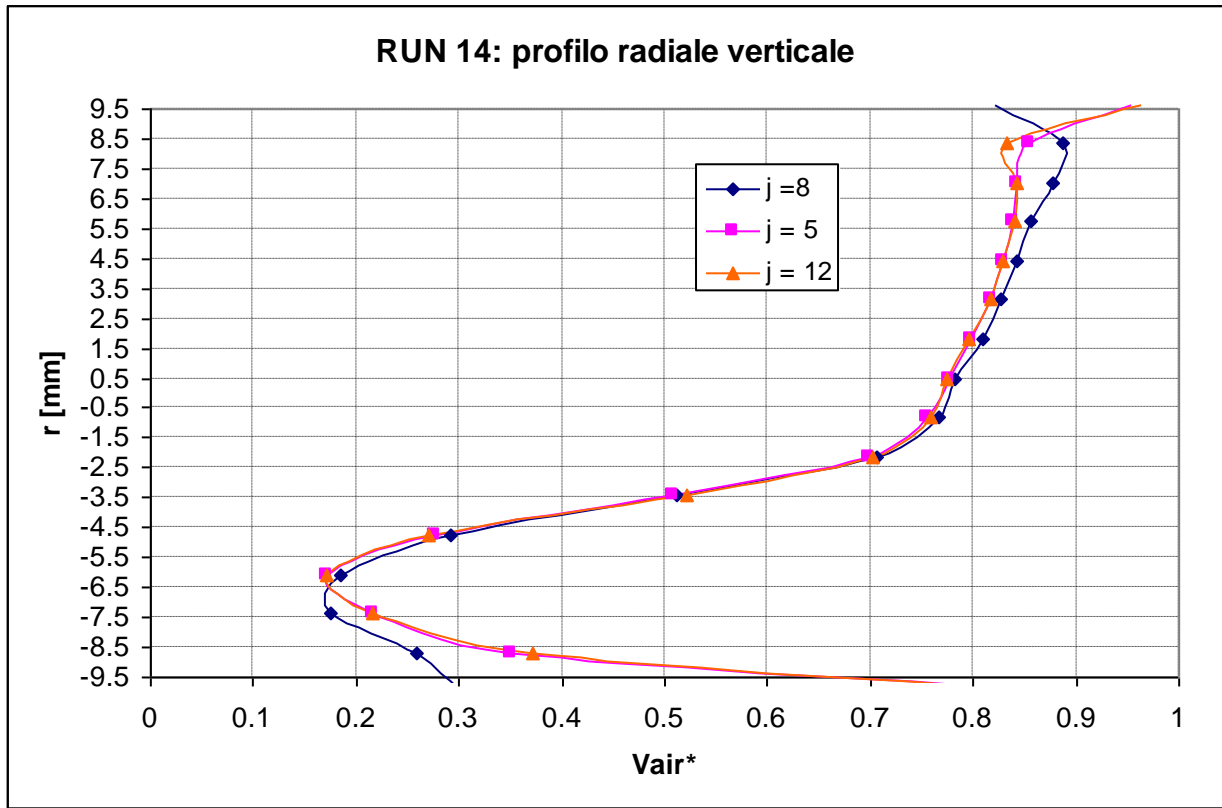
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
12	0.00391	0.083333	1.32	0.044818	7.204241	0.24083788



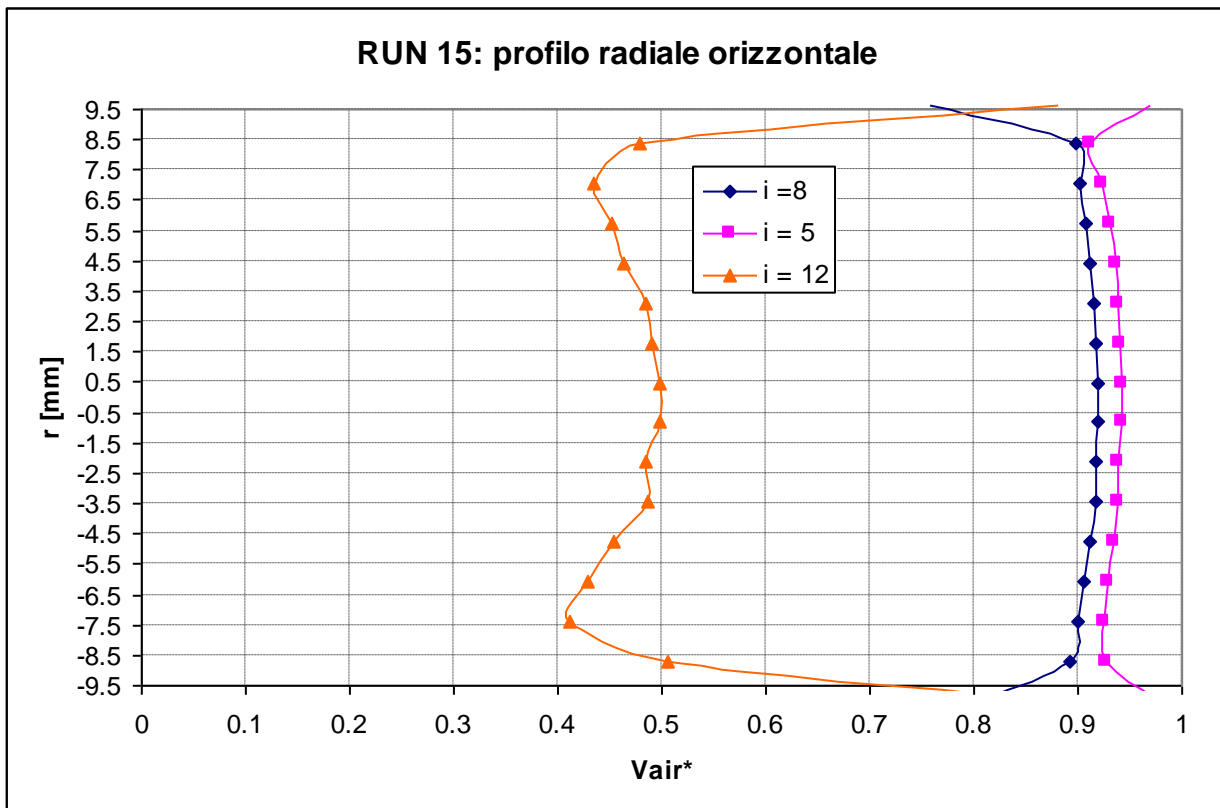
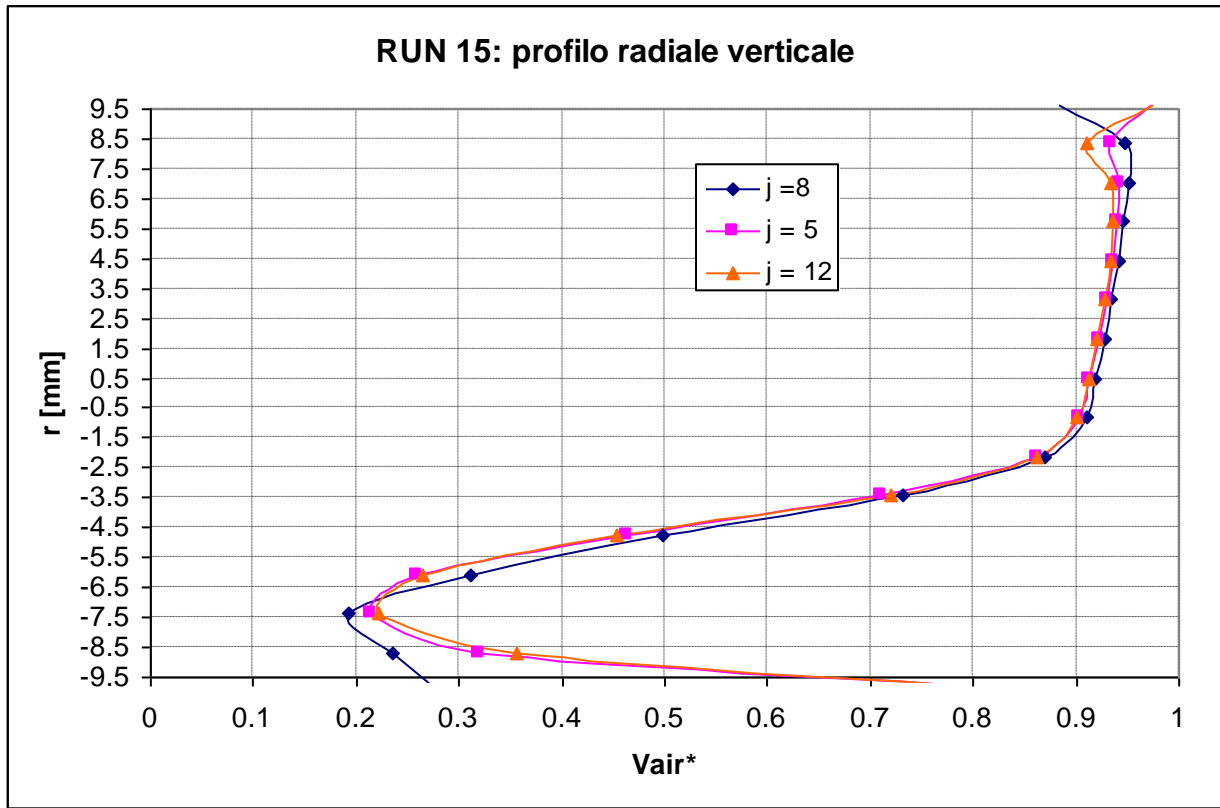
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
13	8.3E-05	0.1111111	1.09	0.000747	0.185259	0.321117173



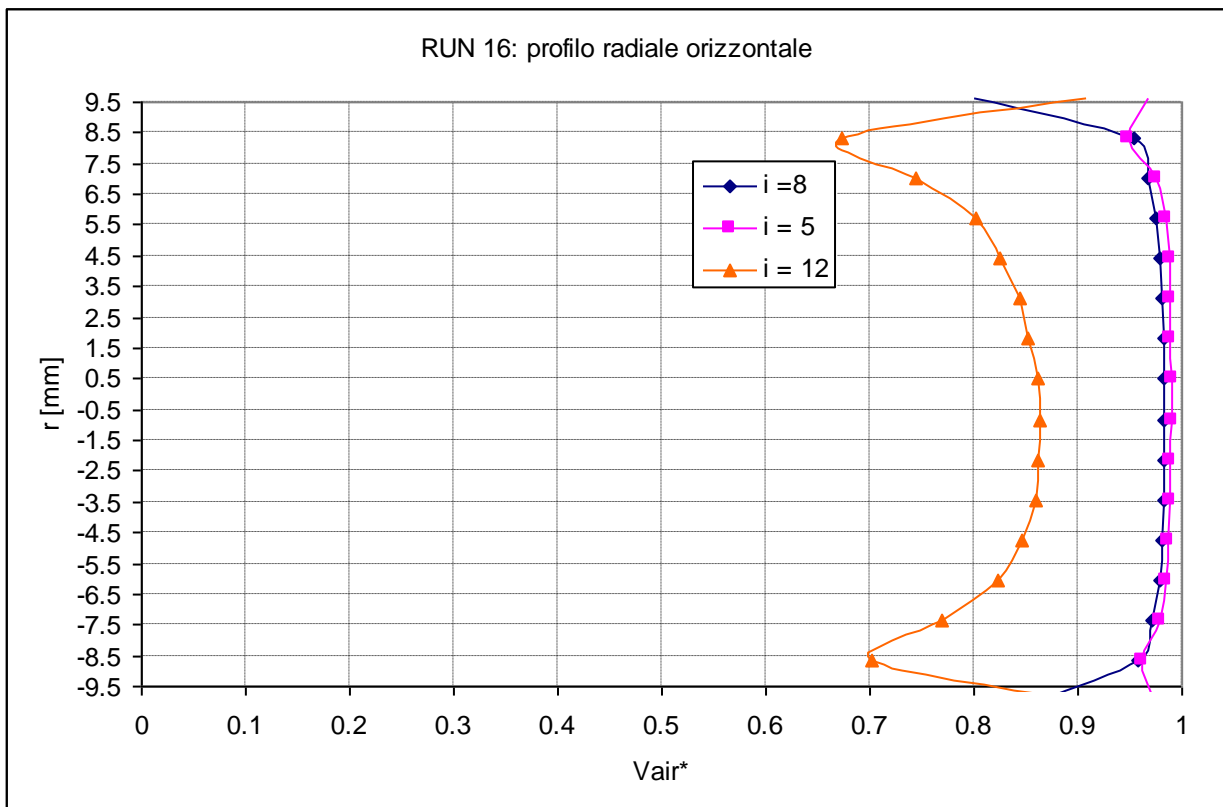
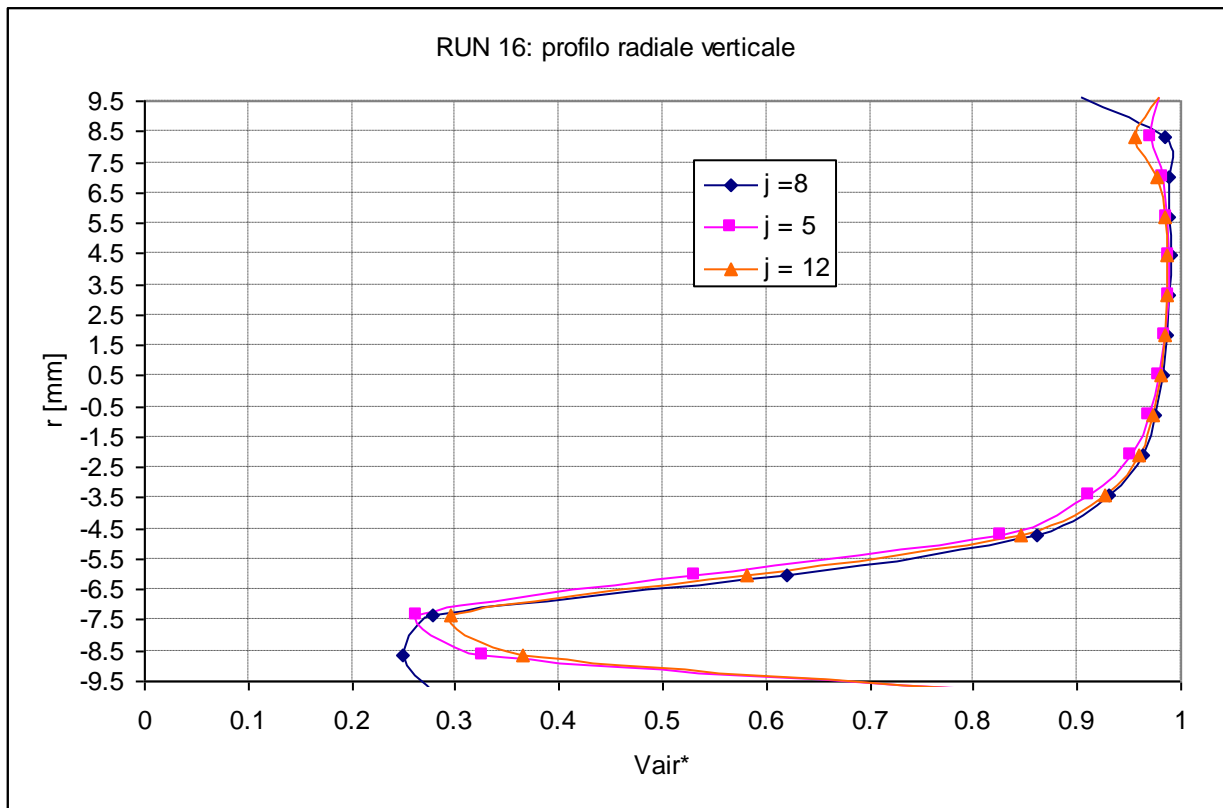
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
14	0.000412	0.111111	1.13	0.003692	0.886272	0.321117173



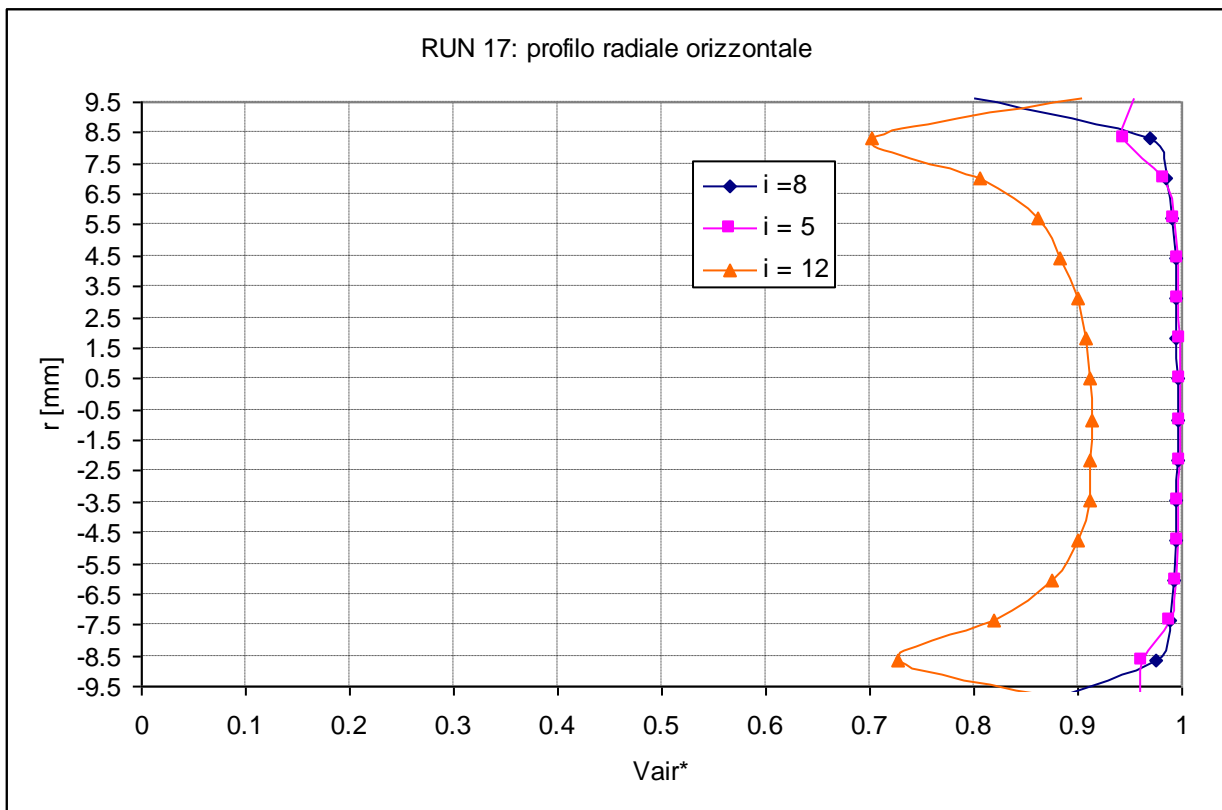
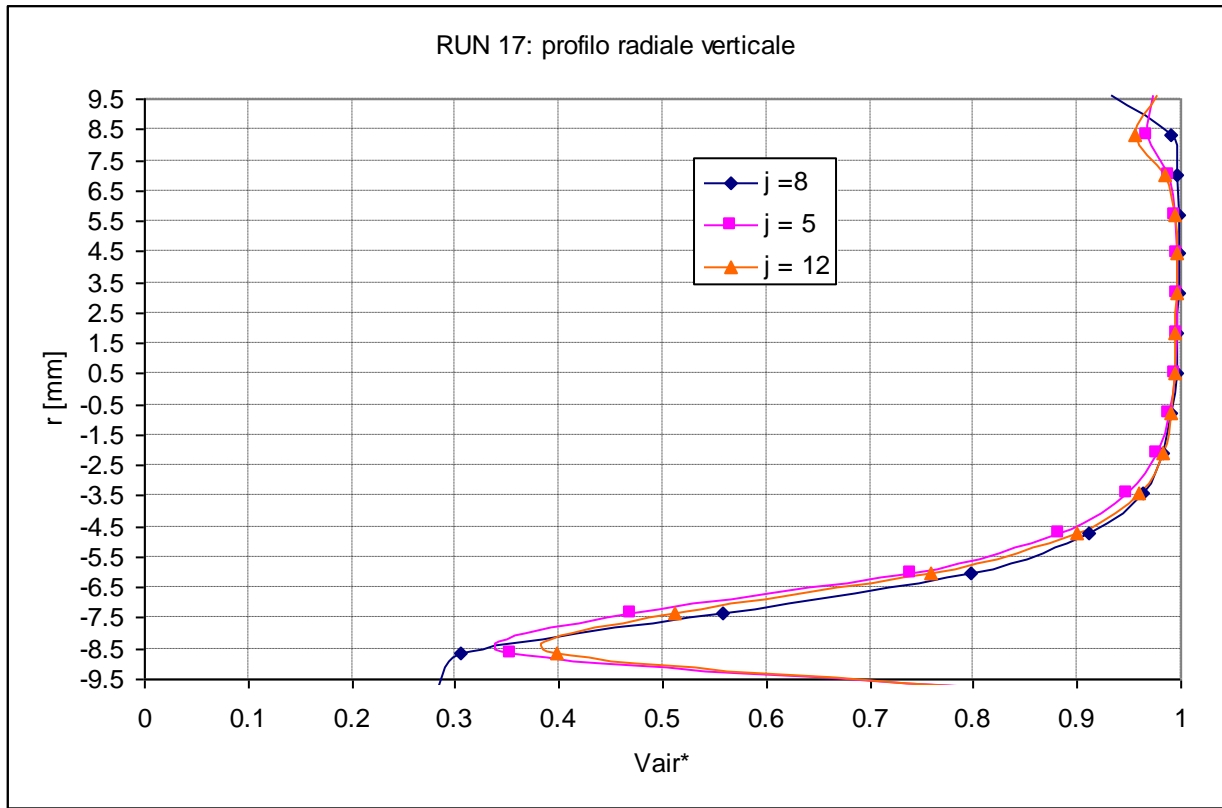
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
15	0.000817	0.111111	1.16	0.007297	1.712492	0.321117173



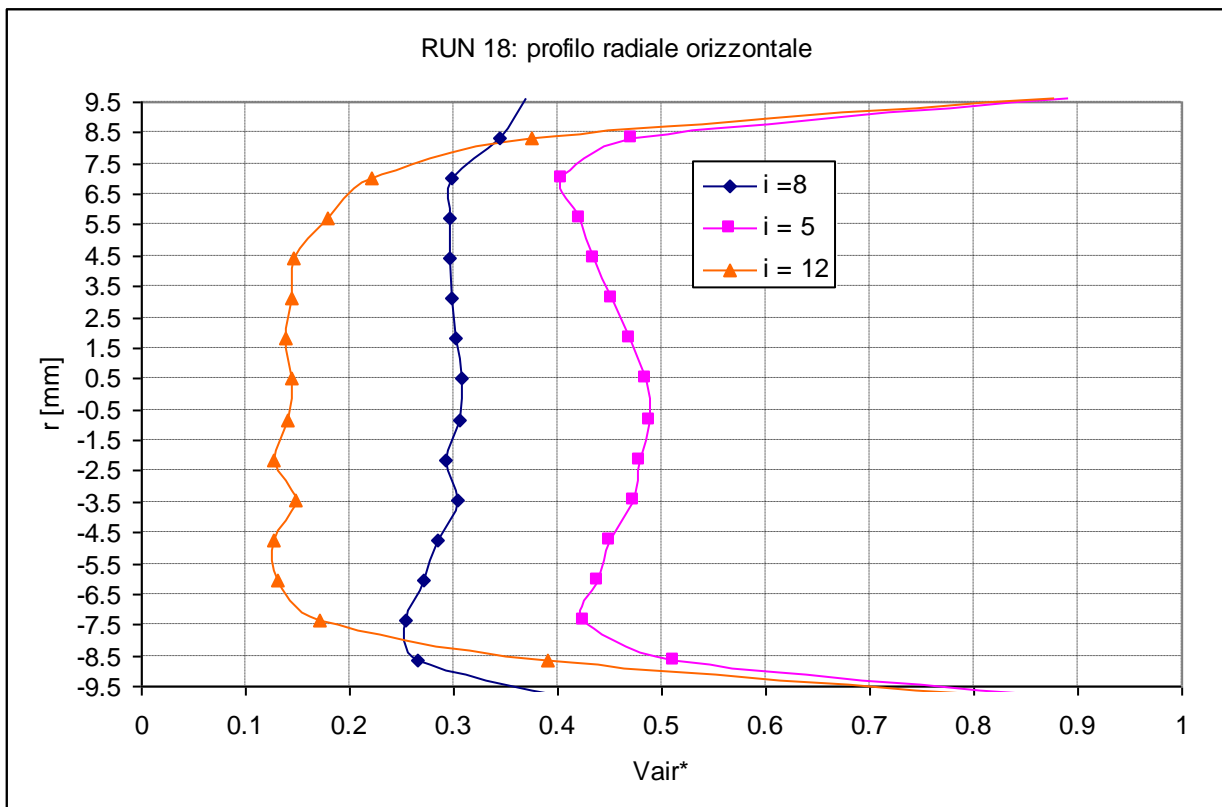
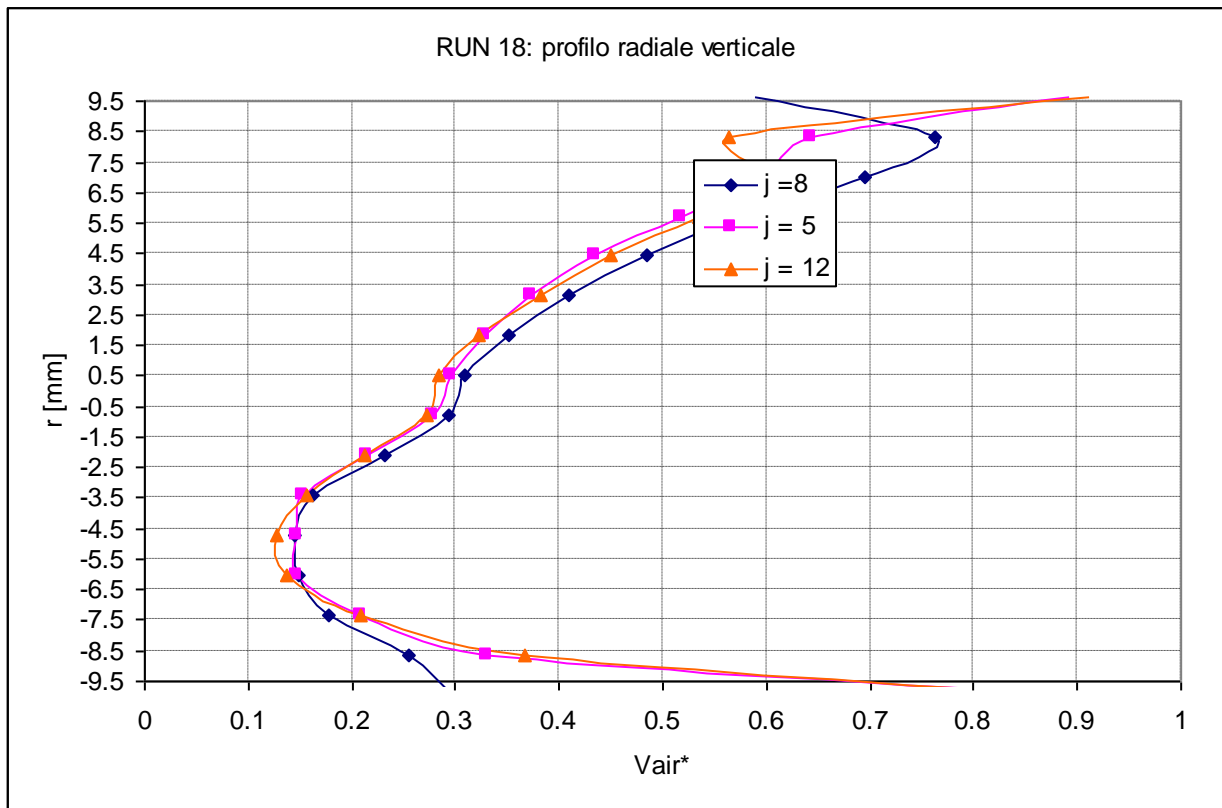
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
16	0.002016	0.111111	1.22	0.017823	4.019471	0.321117173



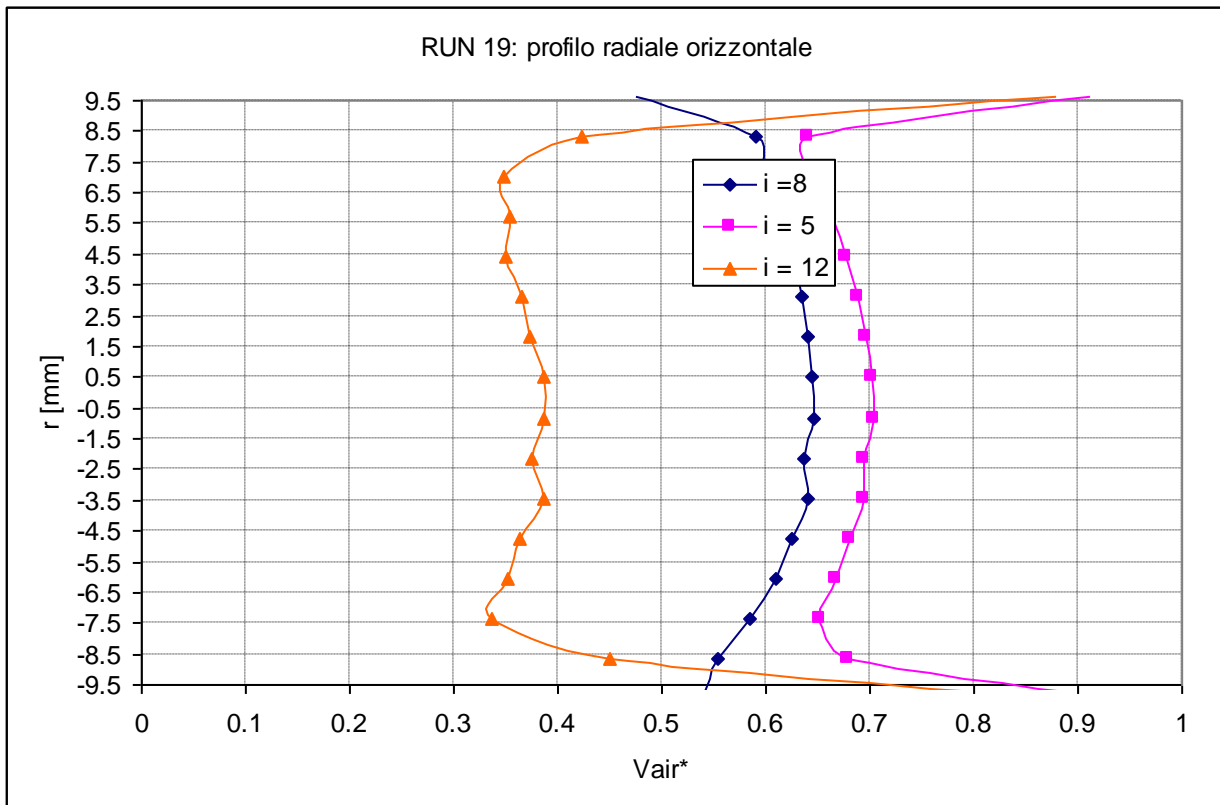
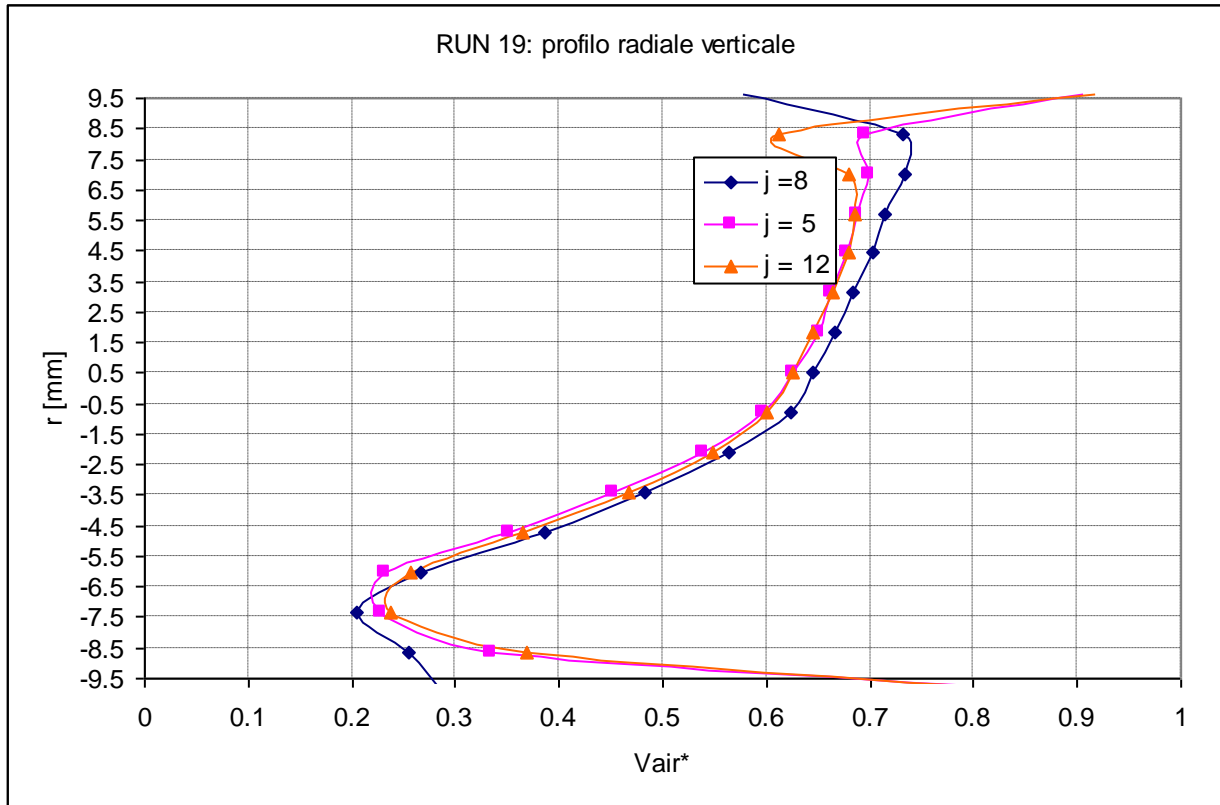
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
17	0.00391	0.111111	1.3	0.033994	7.315075	0.321117173



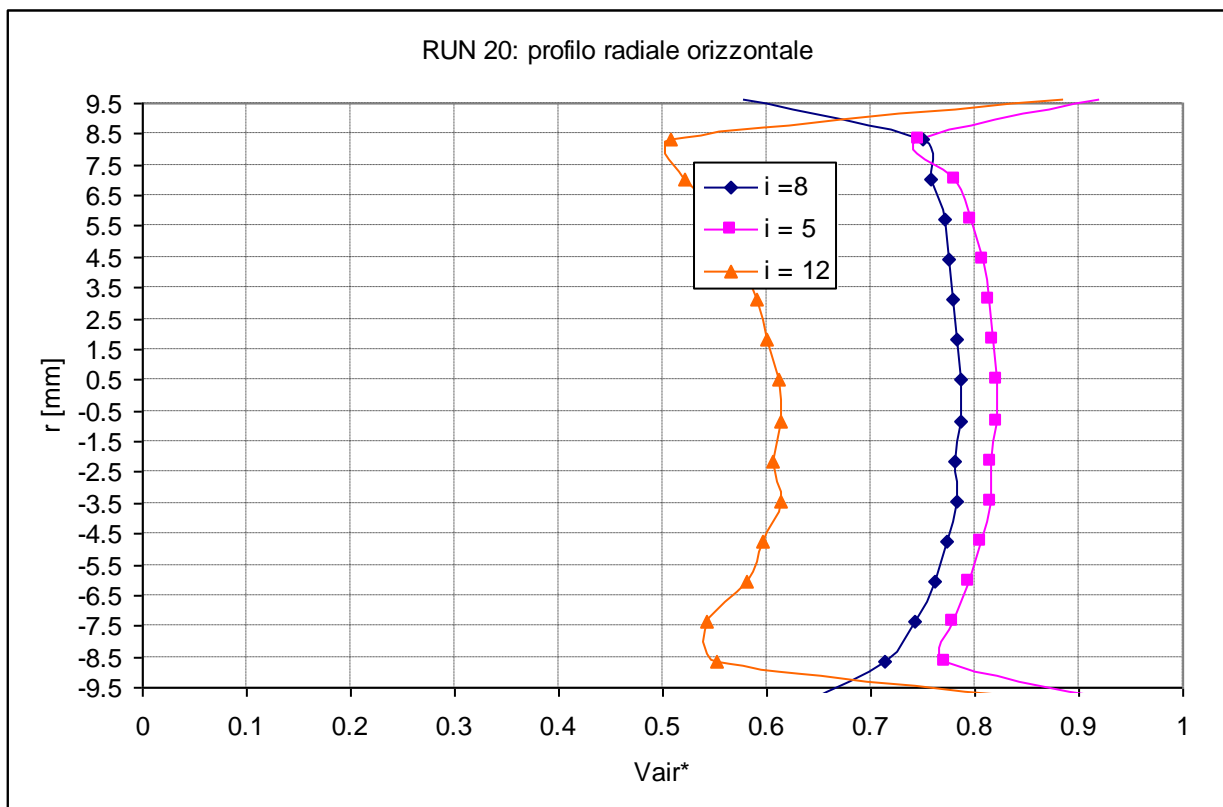
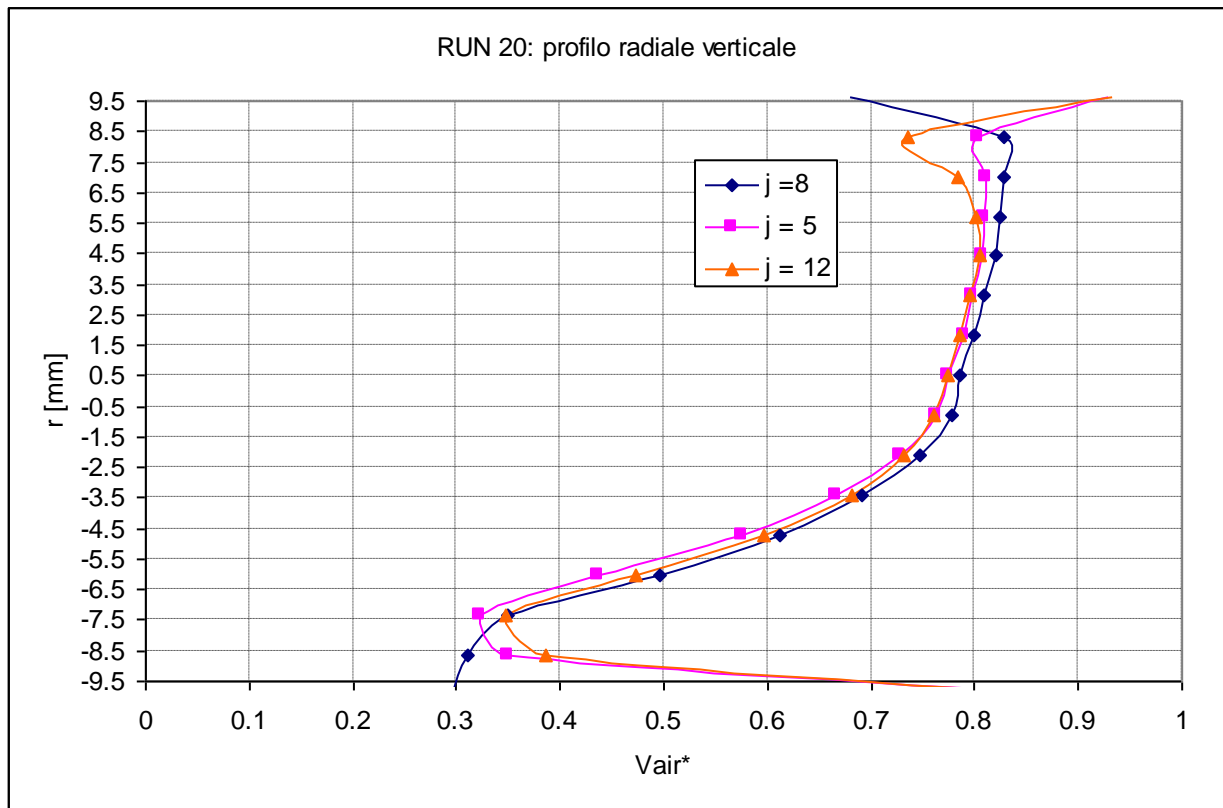
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
18	8.3E-05	0.434167	1.41	0.000191	0.143215	1.254765353



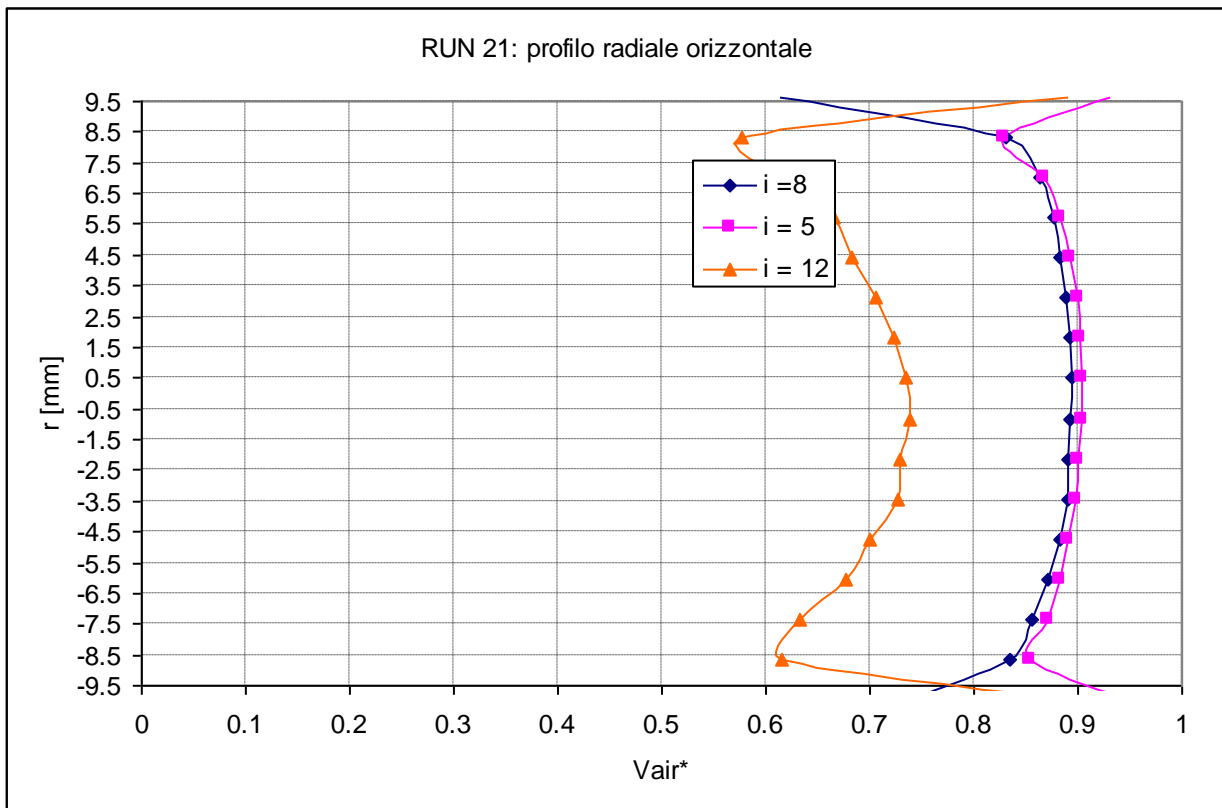
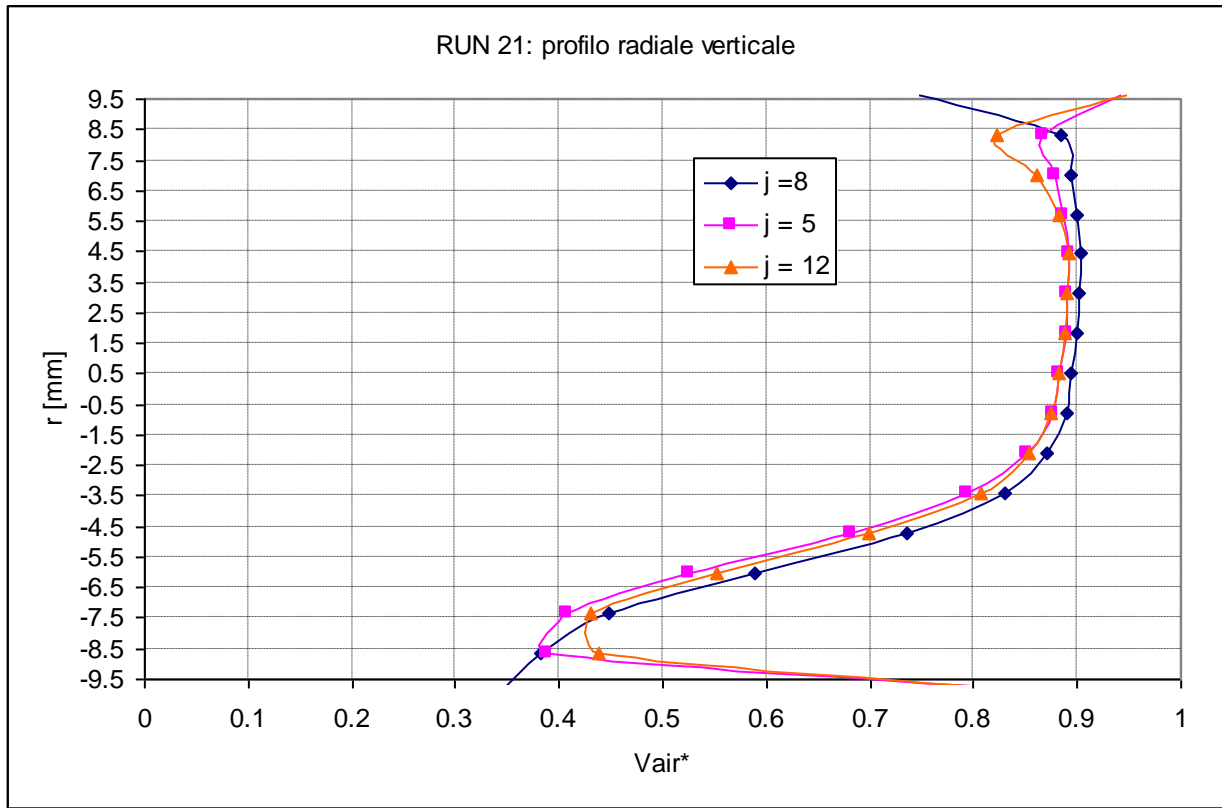
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
19	0.000412	0.413889	1.52	0.000994	0.658874	1.196161469



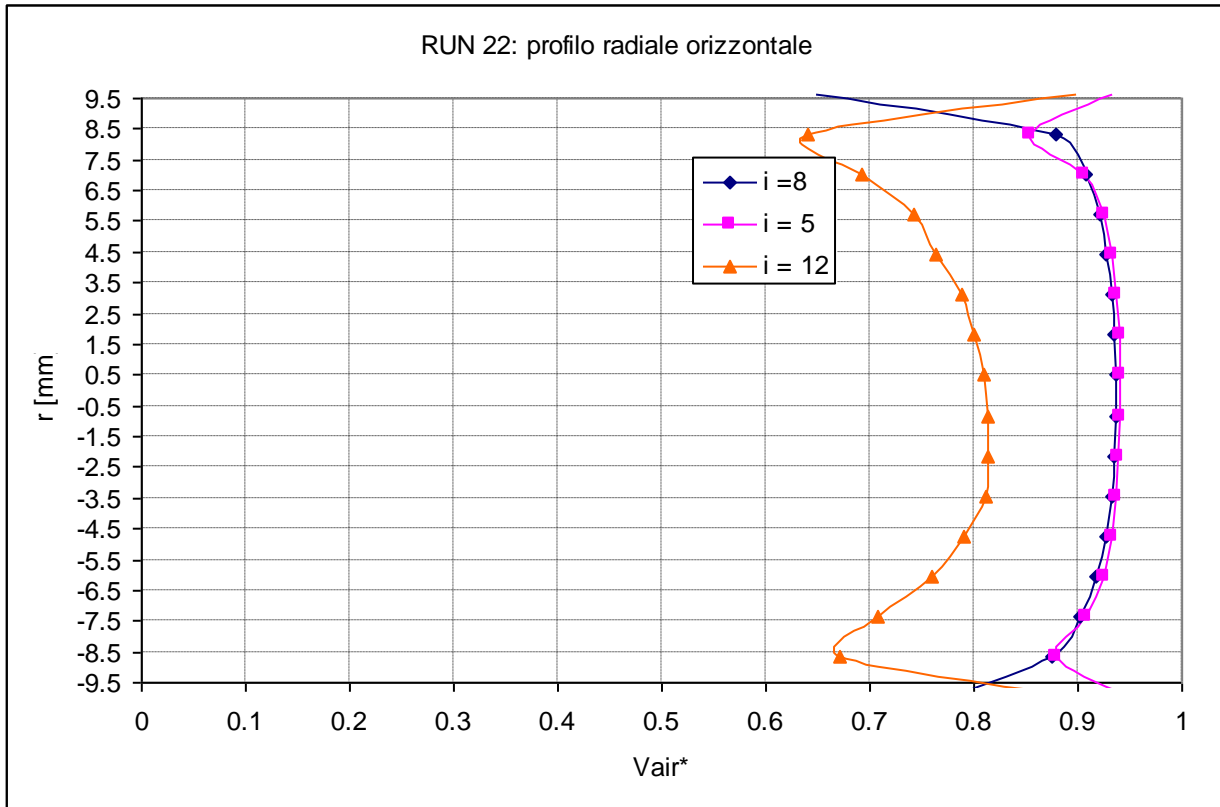
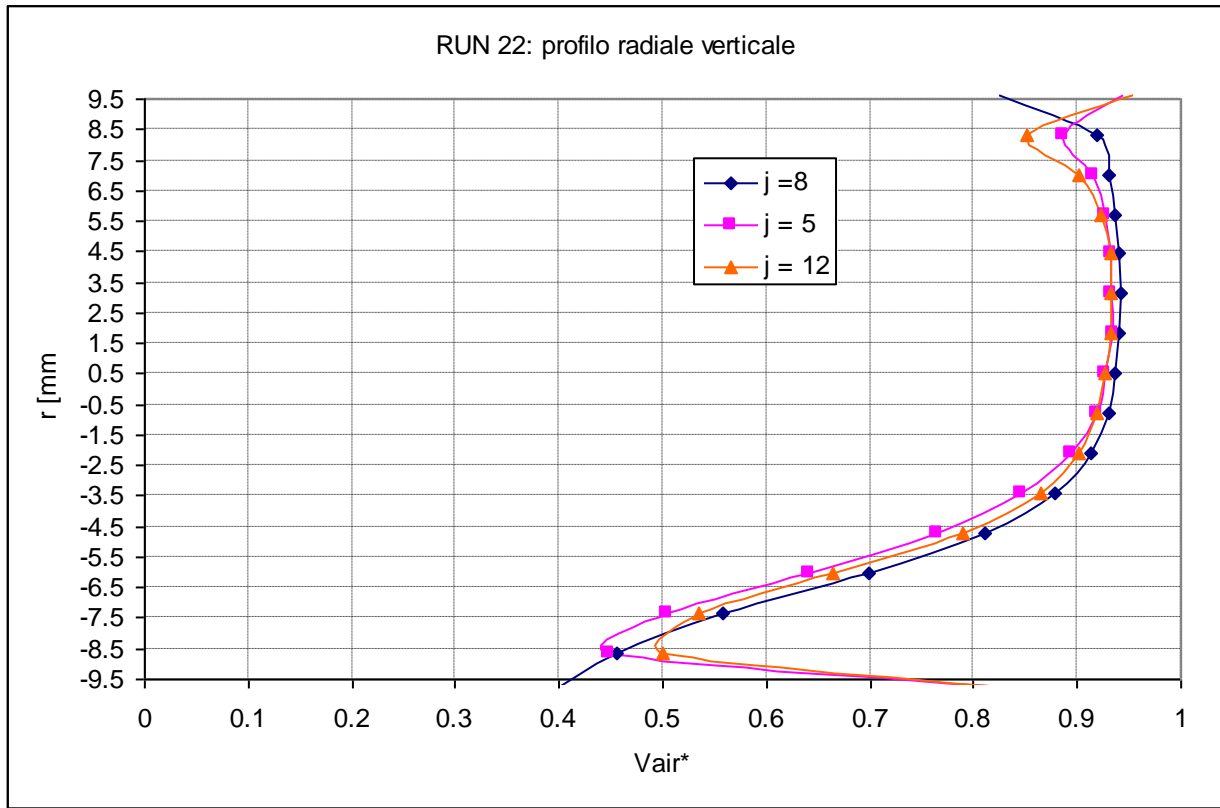
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
20	0.00081	0.425	1.72	0.001902	1.145271	1.228273186



RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
21	0.002008	0.430556	2.13	0.004641	2.292373	1.244329045

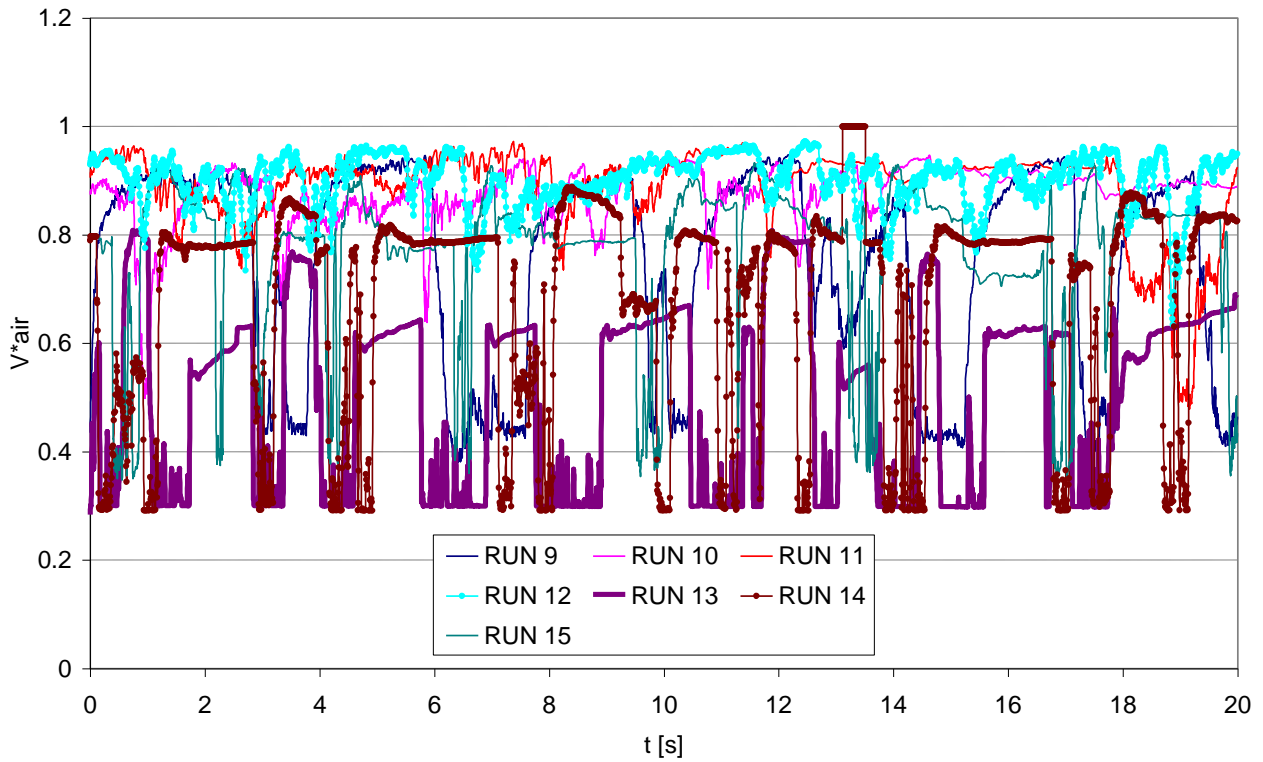


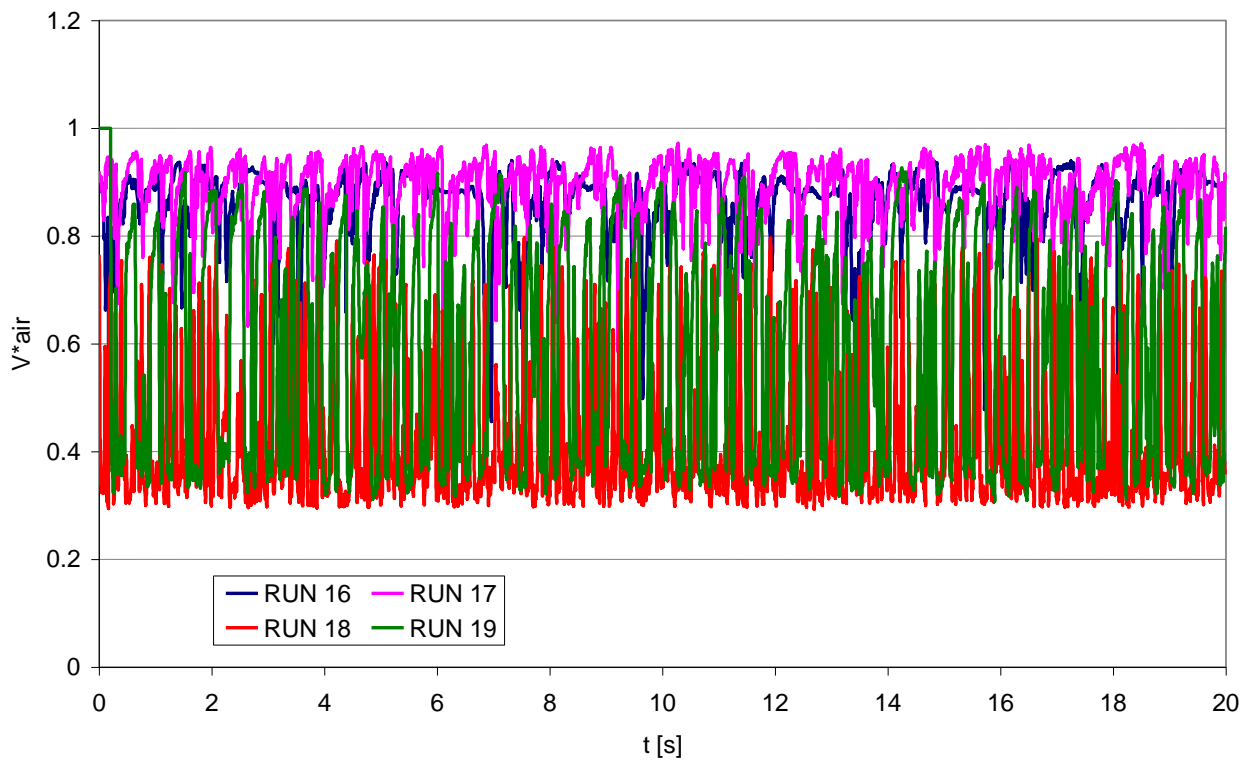
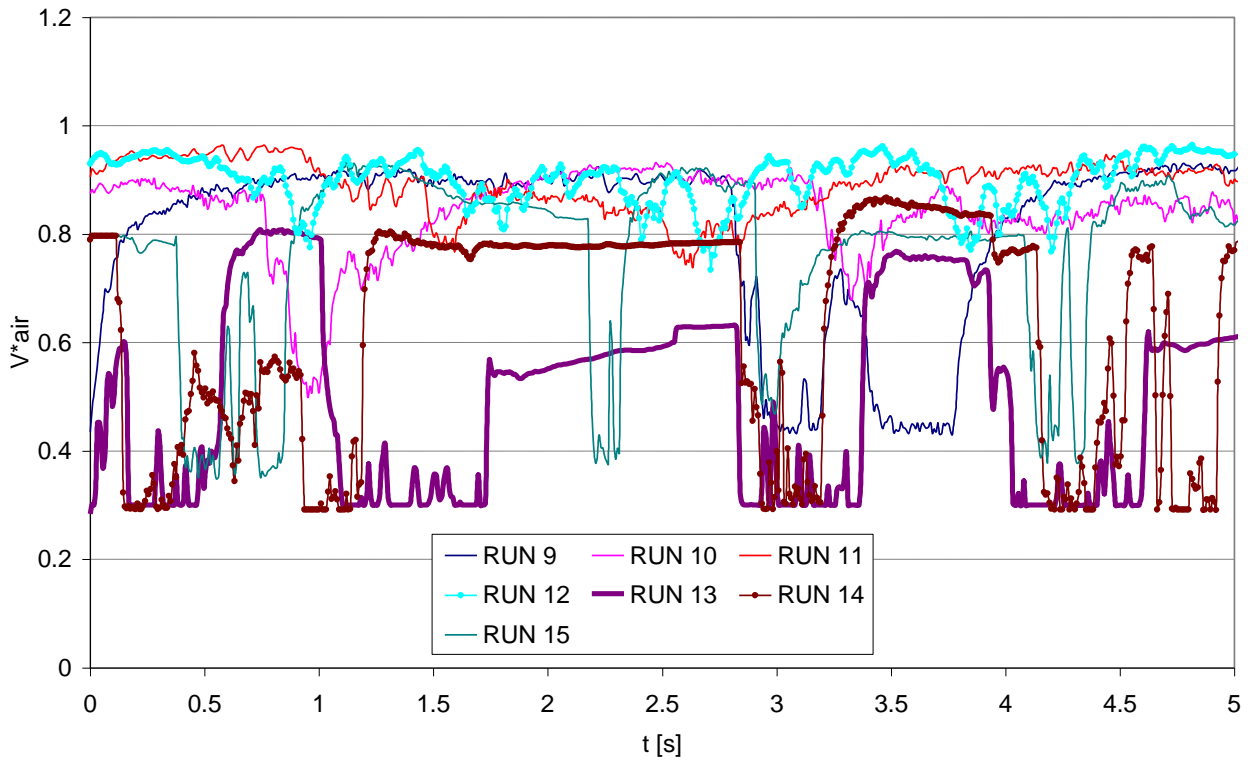
RUN	Wair [kg/s]	Wwater [kg/s]	p media circuit [bar]	x [-]	Jg [m/s]	Jl [m/s]
22	0.003928	0.425	2.58	0.009157	3.702607	1.228273186

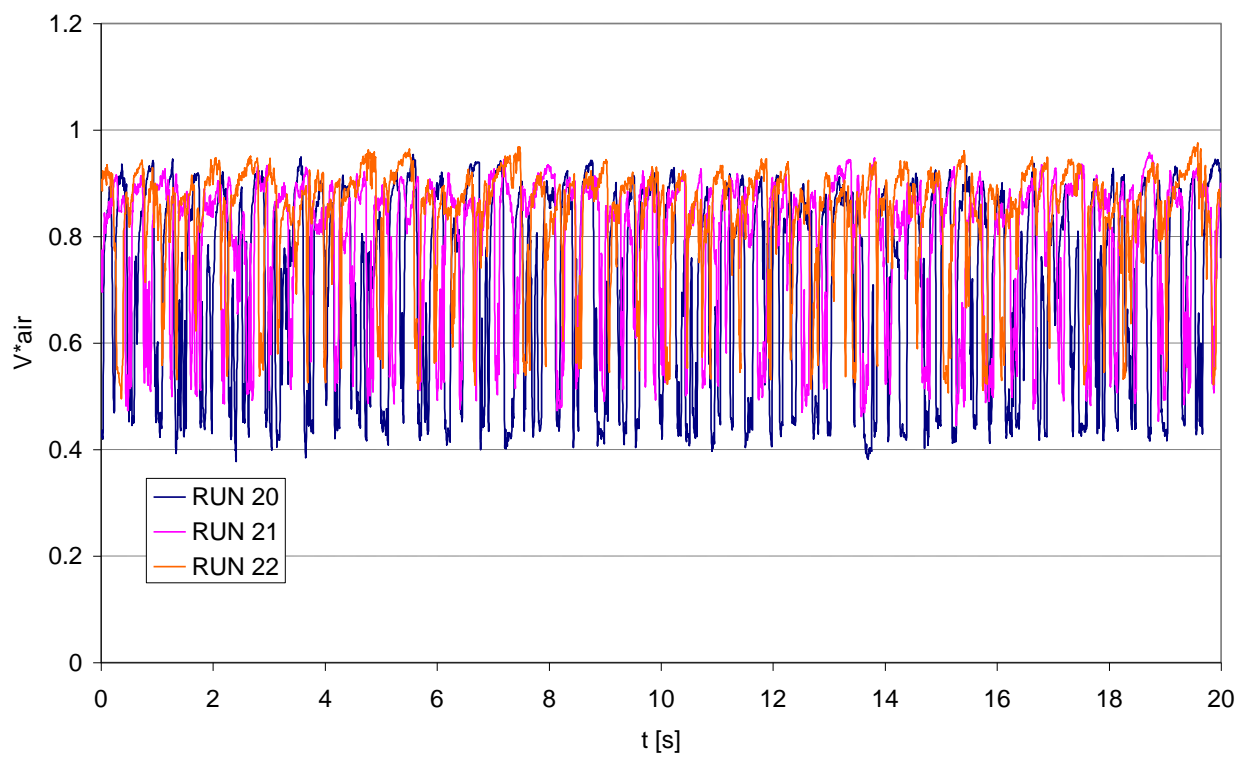
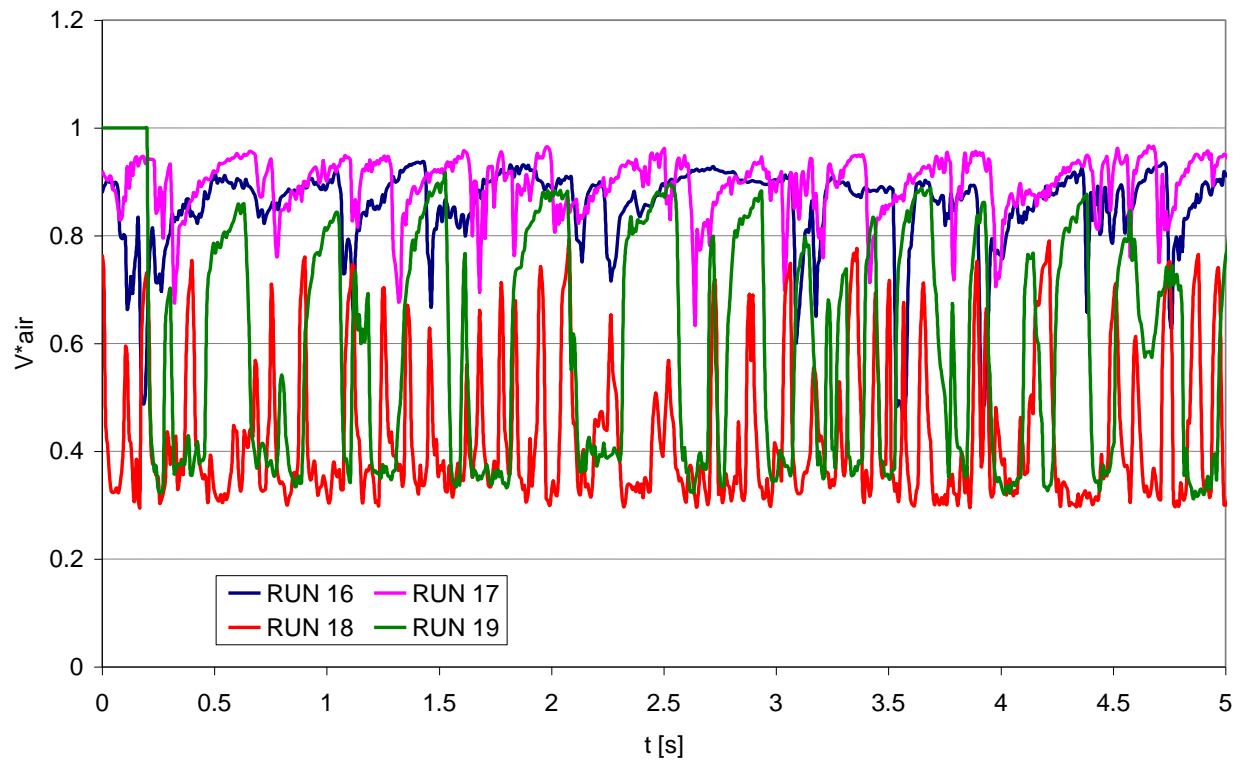


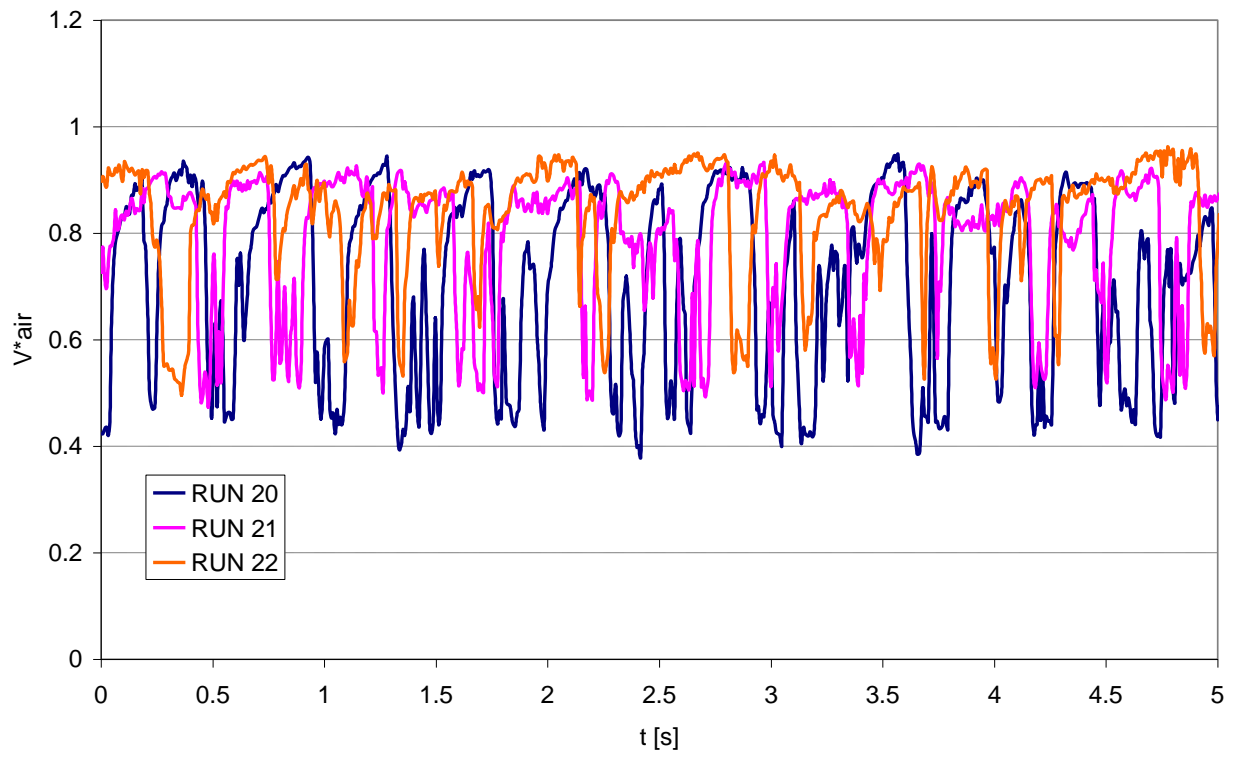
APPENDICE III

Andamenti temporali della frazione di vuoto media associata alla sezione definita in accordo alla procedura di Prasser . Per le medesime prove gli andamenti sono rappresentati con diverse scale temporali di osservazione in modo da poter osservare la risposta dinamica del sensore alle fluttuazioni del deflusso.











CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

Politecnico di Torino

Dipartimento di Energetica



**Relazione tecnica sulle prove a freddo delle sonde per la
misurazione del grado di vuoto e sulla verifica sperimentale
della catena di misurazione, costituita da una turbina, un
drag disk e della sonda sviluppata**

Parte terza

Experimental Study of Horizontal Air-Water

Two-Phase Flow with a Spool Piece

Autori

M. De Salve

G. Monni

B. Panella

CERSE-POLITO RL 1260-III/2011

TORINO, LUGLIO 2011

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2-A3 dell'AdP ENEA MSE del 02/08/10,

Tema 1.3 – “Nuovo Nucleare da Fissione”

CONTENTS

1.	INTRODUCTION	3
2.	SPOOL PIECE	5
2.1	TURBINE	5
2.1.1	Single phase flow.....	5
2.1.2	Two phase flow	6
2.2	DRAG DISK.....	9
2.3	IMPEDANCE PROBE	11
3.	EXPERIMENTAL ACTIVITIES	14
3.1	FACILITY	14
3.2	SPOOL PIECE.....	18
3.2.1	Turbine	18
3.2.2	Drag disk	20
3.2.3	Impedance probe	21
3.2.4	Measurement methodology.....	23
4.	EXPERIMENTAL MATRIX AND CALIBRATION	25
4.1	SINGLE-PHASE CALIBRATION	25
4.1.1	Calibration of the Turbine.....	26
4.1.2	Calibration of the Drag Disk	27
4.2	TWO-PHASE FLOW.....	29
4.2.1	Calibration of the Impedance Probe.....	29
5.	TWO PHASE FLOW EXPERIMENTAL RESULTS.....	32
5.1	VOID FRACTION.....	32
5.2	PRESSURE DROP	33
5.3	FLOW PATTERN MAPS.....	36
5.3.1	Hewitt and Roberts Map.....	37
5.3.2	Mandhane Map.....	39
5.3.3	Taitel and Yemada Map.....	41
5.4	ANALYSIS OF THE MAPS.....	44
5.5	RESPONSE OF THE DEVICES.....	44
5.6	SPOOL PIECE MAPS	50
5.7	AYA's MODEL.....	52
	CONCLUSIONS.....	54
	BIBLIOGRAPHY.....	55
	Annex.....	58

1. INTRODUCTION

In the context of the research activity LP2 "Reattori Evolutivi INTD", with reference to small and medium size reactors, the Department of Energetics of the Polytechnic of Turin has carried out theoretical and experimental studies aimed at developing and characterizing a "Spool Piece" for the measurement of mass flow rate of a two-phase mixture.

The measurement of air-water or vapour-water mass flow rates, together with the flow quality, is essential for the analysis and the control of many thermofluiddynamic industrial processes during steady state and transient conditions. The mass flow rate of the phases, the average gas and liquid densities and the void fraction are the most important two phase flow parameters across the pipe.

The development of instruments and methodologies suitable for the measurements of two phase flow quantities, has started with the development of thermo-electrical power plant and has become increasingly important since 1960 (Hetsroni (1982)). In fact, the large number of research programs, performed in the last decades, have significantly increased our knowledge of two-phase flow measurement techniques based on differential pressure meters (venturi and orifices) (Murdock (1962), Collins (1961)), drag disk (Aya (1975), Hardy (1982), Solbrig (1980), Kamath and Lahey (1980)) and turbine flow meters (Rouhani (1963), Aya (1975), Hardy (1982), Solbrig (1980), Kamath and Lahey (1980)). In 1975-1980, in particular a strong research activity for nuclear power plants applications has been carried out for the development of the instrumentation to measure the two phase flow quantities in large loops, able to simulate nuclear reactors accident conditions. In this context, the concept of Spool Piece (SP) as a set of instrumentation devices connected in series in a pipe has been introduced. An ideal SP is a control volume that is equipped with different measurement instruments; its use in two phase flow is not easy due to the large number of parameters that affect the flow. A model of the SP, depending on the geometry, on the physical model of each instrument and on the SP orientation, is then required in order to interpret the signals.

The choice of a meter (involving at least two separate measuring devices) to measure the flow rate in two-phase flow depends on the purpose for which the measurement is performed, and on the required accuracy (Hewitt 1978). It also depends on the nature of the flow field and on the two phases that are involved.

In a previous study the experimental and theoretical analysis of a SP, consisting of an axial turbine flow meter and a drag disk, that are horizontally installed in a test section operating with air-water flow, has been performed (De Salve, Monni, Panella (2010)).

The analysis and the processing of the SP electric signals have allowed to characterise the flow in terms of flow pattern and mass flow rates of the two phases. The analysis highlighted also the fundamental role of the pressure concerning the flow pattern and the void fraction values of the mixture.

In order to improve the knowledge of the instruments, complete the study about the Spool Piece and analyse the pressure effects in deeper details a new analysis has been carried out using a Spool Piece made up of 3 instruments.

The aim of this study is the experimental and theoretical analysis of horizontal air-water flow using a Spool Piece made up of a turbine, a drag disk and an impedance probe to measure the flow rate and the void fraction; the pressure and the temperature are also measured.

The experimental data are used to construct an operating map of the SP, which is able to evaluate the mass flow rates of the phases in the mixture, with relative errors, and to predict the flow pattern and other parameters that are important to characterise the flow.

2. SPOOL PIECE

2.1 TURBINE

2.1.1 Single phase flow

Essentially the turbine meter is a turbine rotor that rotates as the fluid passes through its blades. In addition, in a single-phase flow, the output is used to calculate the fluid velocity and the volumetric flux as it is designed to measure the bidirectional average velocity of the fluid flow.

As it can be noticed in *Fig. 1* the rotor spins as the liquid passes through the blades and the rotational speed is a direct function of volumetric flow rate. Moreover, in the two-phase flow regime the instrument output signal is proportional to the combination of both the gas velocity and the liquid velocity.

$$S_t = K_t \cdot Q$$

$$v = Q / A$$

where A is the pipe cross section [m^2], Q is the volumetric flow rate [m^3/s], v is the mean flow velocity [m^2/s] and K_t is the calibration coefficient that must be evaluated in a single phase flow.

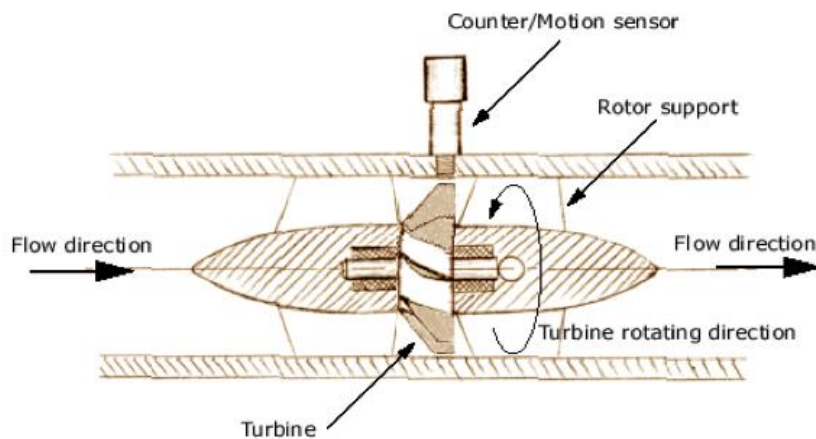


Fig. 1. Axial turbine flow meter

The turbine flow meter generates, via a magnetic pickup, a sinusoidal low-level electrical signal, the frequency of which is proportional to the angular velocity of the rotor of the axial turbine. Then

$$V_t = \frac{\omega}{tg\left(\frac{\phi}{r}\right)}$$

where

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{r}\right) = \operatorname{cost}$$

and

V_t is the mean flow velocity

ω is the angular velocity of the rotor

ϕ is the blade inclination angle.

2.1.2 Two phase flow

In two-phase flow there is no agreement about which analytical expression better matches the turbine outputs. The presence of the slip between the two phases, the different flow regimes, and the influence of the gas flow rate and of the liquid flow rate strongly affect the turbine flow meter.

Two analytical models generally describe the turbine velocity, based on different assumptions: the Rouhani model (1974) and the Aya model (1975).

Aya's model is based on a momentum balance on a turbine blade due to velocity difference between the two phases and the turbine blade. It typically describes a dispersed flow with gas velocity higher than the liquid one.

Although the two-dimensional velocity profile of dispersed two-phase flow might differ from that of single-phase flow, the gas and liquid velocities acting on the drag disk target can be assumed to be almost the same as the mean gas and liquid velocities exert forces on the blades of the turbine meter within the Reynolds number range where the flow is turbulent. Therefore, the same symbols (V_g for the gas velocity and V_l for the liquid velocity) will be used for both drag disk and turbine meter.

The momentum flux detected by a drag disk for dispersed flow can be expressed as

$$I_d = C_{dg} \cdot \alpha \cdot \rho_g \cdot V_g^2 + C_{dl} \cdot (1 - \alpha) \cdot \rho_l \cdot V_l^2$$

where C_{dg} and C_{dl} are, respectively, the drag coefficients of a drag disk for the gas and liquid phases. Using the ratio of drag coefficients of a drag disk

$$\overline{C_d} = \frac{C_{dl}}{C_{dg}}$$

it is possible to rewrite the momentum flux

$$I_d = C_{dg} \cdot \alpha \cdot \rho_g \cdot V_g^2 \cdot [S^2 + \overline{C_d} \cdot f \cdot \frac{(1-\alpha)}{\alpha}]$$

where S is the slip ratio V_g/V_l and f is the density ratio ρ_l/ρ_g . The drag coefficients C_{dg}

and C_{dl} should be taken from calibration tests for the drag disk. Using the previous parameters it is possible to define the void fraction as

$$\alpha = \frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_l - \rho_g}$$

where ρ_l is the density of the fluid, ρ_g is the density of the gas and ρ_a is the mixture density:

$$\rho_a = \alpha \cdot \rho_g + (1 - \alpha) \cdot \rho_l$$

and

$$S^2 = \frac{(\rho_l - \rho_g) \cdot \left(\frac{I_d}{C_{dg}} \right) - (\rho_a - \rho_g) \cdot \rho_l \cdot \overline{C_d} \cdot V_l^2}{(\rho_l - \rho_a) \cdot \rho_g \cdot V_l^2}$$

So one can write:

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = \frac{S}{f} \cdot \frac{1-x}{x}$$

and the mass flux G and the mass flow rate W can then be written as

$$\begin{aligned} G &= \alpha \cdot \rho_g \cdot V_g + (1 - \alpha) \cdot \rho_l \cdot V_l \\ &= \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_l - \rho_g} \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{I_d}{C_{dg}} - \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_l - \rho_g} \cdot \rho_l \cdot \overline{C_d} \cdot V_l^2 \right)} + \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_l - \rho_g} \cdot \rho_l \cdot V_l \end{aligned}$$

Thus, it is possible to obtain the mass flow rate W given by AYA's model knowing the diameter of the pipe D_i .

$$W = G \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2$$

A turbine blade rotates with angular velocity ω . Then the turning speed of a point in the turbine is

$$V_r = r \cdot \omega$$

where r is the distance from the axis of rotation. Assuming that the frictional forces exerting on turbine blades are negligible when compared to the forces due to momentum changes of fluids, and knowing that the turning speed V_r is then equivalent for fluids to the imaginary velocity of a turbine meter defined by

$$V_t = \frac{V_r}{\tan\phi}$$

where ϕ is the twisting angle of a blade and V_t can be regarded as constant over a turbine blade and corresponds to the fluid velocity detected by a turbine meter. So:

$$\tan \frac{\phi}{r} = \text{constant}$$

When this is true:

$$V_t = \omega r$$

By developing these equations with a momentum balance about the turbine blade segment, and assuming that the force that the gas flow exerts upon the turbine blades is equal to the force that the blades are exerting on the liquid flow, the following relation can be written:

$$V_f = \begin{cases} a + b, & s \leq \bar{C}_t \cdot \sqrt{Y/\bar{C}_t} \\ a - b, & s > \bar{C}_t \cdot \sqrt{Y/\bar{C}_t} \end{cases}$$

where

$$a = \sqrt{\frac{Y}{\bar{C}_t}} \cdot \left(\frac{1 + \sqrt{\bar{C}_t \cdot Y}}{\bar{C}_t + \bar{C}_d} \right) \cdot V_t$$

$$b = \frac{1}{\bar{C}_t + \bar{C}_d} \left[(\bar{C}_t + \bar{C}_d) \cdot \left(\frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_a - \rho_g} \right) \cdot \frac{I_d}{\rho_f \cdot c_{dg}} - \frac{\bar{C}_d}{Y} \cdot \left(1 + \sqrt{\bar{C}_t \cdot Y} \right)^2 \cdot V_t^2 \right]^{1/2}$$

and

$$Y = \frac{\rho_f}{\rho_g} \cdot \left(\frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_f - \rho_g} \right)$$

where ρ_a is the apparent density from a densitometer, I_d is the momentum flux from a drag disk, V_t the velocity from a turbine, and \bar{C}_t is the ratio of drag coefficients of a turbine blade for the liquid and gas phases.

2.2 DRAG DISK

The drag disk is a device capable of measuring the force exerted by the fluid flow on a portion of the pipe cross section, or in other words, it is designed to measure the bidirectional average momentum flux passing through a duct. Its dimension and geometry can vary and depending on these characteristics there are different kinds of drag disk. For instance, when the target is a disk less than 10% of the pipe cross section it is known as a target flow meter. The size of the target determines the flow range of the strain gauge target flow meter as the measure is performed by disposing a drag body or target in the flow stream and by measuring the drag force exerted on the body by the fluid flow. Two-phase drag devices have been described by several authors between 1960 and 1990.

For instance, Hunter and Green (1975) demonstrated that the drag coefficient is almost constant in a wide range of the Reynolds number. In the same year, Sheppard (1975) demonstrated that, in two-phase flow, if the drag meter is installed in a spool piece, with a turbine meter, accurate calculated measurements were attained only when the drag disc is positioned upstream of the turbine and a flow disperser is installed. Some years later, Hardy and Smith (1990) showed that the influence of the temperature induced changes on the resistance of the wires that could have influenced negatively the signal reading; a dedicated system to prevent these effects was studied in order to avoid this issue.

Nowadays almost only one kind of the body-target-type meter is produced, that detects the force exerted by the flow by means of a strain gauge circuitry.

The dynamic force of the fluid flow or, in other words, the velocity of the approaching stream, is sensed as a drag force on a target suspended in the flow stream. This force is transmitted in a linear way with a lever rod and a flexure tube to an externally bonded four active arm strain gauge bridge. This strain gauge bridge circuit translates the mechanical stress due to the sensor (target) drag into a directly proportional electrical output. The electrical output is virtually unaffected by variations in the fluid temperature or static pressure head within stated limitations of the unit, even though the

flow has influence on the drag as the drag force is usually proportional to the squared flow rate.

Concerning the theoretical aspects, the main characteristics of this device are explained in the following.

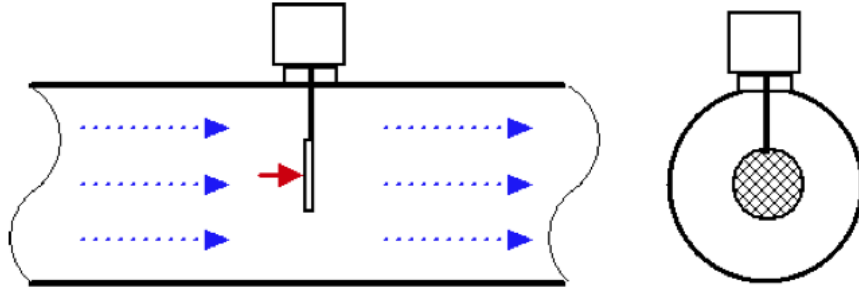


Fig. 2. Drag disk scheme

A body immersed in a flowing fluid is subjected to a drag force F_D [N] given by:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot (\rho \cdot V^2)$$

where C_d is the dimensionless drag coefficient that should be taken from the calibration tests for the instrument, A [m²] is the cross section area of the pipe and $\rho \cdot V^2$ [Pa] is the momentum flux, which is expressed by:

$$\rho \cdot V^2 = \alpha \cdot \rho_g \cdot V_g^2 + (1 - \alpha) \cdot \rho_l \cdot V_l^2$$

The drag disk determines an abrupt change of section of the duct and as a consequence a concentrated head loss, which can be measured by a differential pressure transducer.

The Drag Disk output I_D [Pa] can be expressed as:

$$I_D = \frac{F_D}{A}$$

where A [m²] is the cross sectional area of the pipe and F_D [N] is the drag force given previously.

There is a range of the Reynolds number where the output may be affected by the viscosity. This Re range is between 1000 and 2000. In addition the laminar flow exists below Re=400 and the transition to turbulent flow occurs at about Re=2000. In both regions, C_d may vary in an unpredictable manner. At low Re the low flow and/or the high viscosity have to be taken in account.

The drag coefficient C_d is almost constant in a wide range of Re. Hunter and Green (1975) demonstrated that the variation in C_d over a Reynolds number range of 2000-

250000 is from about 0.97 to 1.93. They suggested the following correlation to find C_d values.

$$C_d = C_0 + C_1 \cdot \left(\frac{a}{A}\right) + C_2 \cdot \left(\frac{a}{A}\right)^2 + C_3 \cdot \left(\frac{a}{A}\right)^3 + C_4 \cdot \left(\frac{a}{A}\right)^4$$

where a is the area of the target and A is the cross section of the pipe.

2.3 IMPEDANCE PROBE

The impedance method is based on the fact that the liquid and gas phases have different electrical conductivities. The probe impedance measurement is based on the principle that by applying a voltage to a pair of conductive plates separated by an insulator (dielectric), the electrical charges are separated, and an electric field is generated between the plates. That charge is proportional to the applied voltage and the proportionality constant is a characteristic of the electrical capacity measured in Farad [F].

$$C = \frac{Q}{V}$$

where Q is the electric charge and V is the potential difference.

For parallel plates, C is

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

ϵ_r is a property of dielectric material and $\epsilon_0 = 8,85418781 \text{ Fm}^{-1}$.

If the two constituents have different electrical properties, it is possible to obtain a correlation between the void fraction and the mixture impedance. Air is generally a poor conductor with a low dielectric constant. However, liquids have got a higher value of the dielectric constant due to a large concentration of dipoles.

The measurements of the impedance take place in a volume defined by lines of an electric field associated with the electrode system. These measurements are quasi-local, that is to say, the sensor determine the percentage of both phases not strictly in a selected cross section of the pipe but in a certain volume, based on the electrodes height (except for wire sensor that are installed inside the pipe and perpendicular to the flow). The exact boundary of this volume cannot be precisely drawn due to fringe effects.

To minimise the non-local effects, the height of the electrodes measured along the pipe should be as short as possible, but the effect of the fringe field cannot be eliminated. Although short electrodes have small capacitance and low sensitivity, so a compromise is needed. Moreover the sensor should be shielded to minimise the distortion effects due to outer objects and electromagnetic fields. The shield dimensions should be as large as possible in order to minimise the stray capacitance.

Because of the electric properties of the fluid, the impedance consists of capacitive and resistive components. Measurements of capacitance from a capacitor filled with a conducting liquid, such as water, are difficult due to the equivalent resistance of the liquid, which is usually low, that is connected in parallel with capacitive component of the admittance, provided that the water component is the continuous phase in the mixture. For low frequencies, this resistance is like a short circuit to the capacitance. In order to cut off the effect of the resistance, the sensor admittance has to be measured in high frequency range.

Many different types of electrodes configuration where studied by a number of authors. The different geometries can be classified in four general types; within each type there are only minor differences related to the specific environment of the probe or the number of the electrodes:

- Coaxial
- Parallel flat plates
- Wire grid
- Wall flush mounted circular arc.

The difference in the electrode geometry results in different electric fields within the measurement volume and hence in the sensitivity and response of the sensors. Two geometries will be analysed: ring type and concave type sensors. Experiments will be performed to validate the design theory and to evaluate the sensor characteristics using air-water two-phase flow in a horizontal pipe.

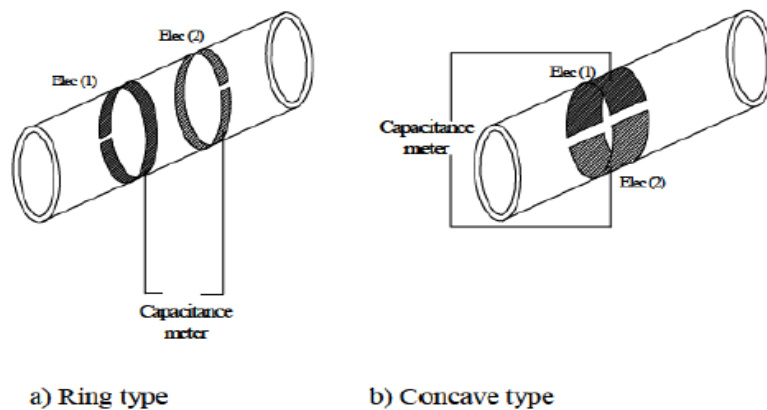


Fig. 3. Scheme of ring type sensor and concave type sensor.

The capacitance measurement is sensitive to the void fraction distribution or to flow regimes due to the non-uniformity of the electrical field inside the measuring volume. The relation between the admittance of the mixture and the void fraction is not one to one and for a single admittance value there could be different void fraction values, based on different flow patterns. However, this can be compensated by first identifying the flow pattern.

3. EXPERIMENTAL ACTIVITIES

3.1 FACILITY

In the *Fig. 4* one can see the location of the SP and its main devices: 1- Impedance probe, 2- Turbine and 3- Drag Disk.

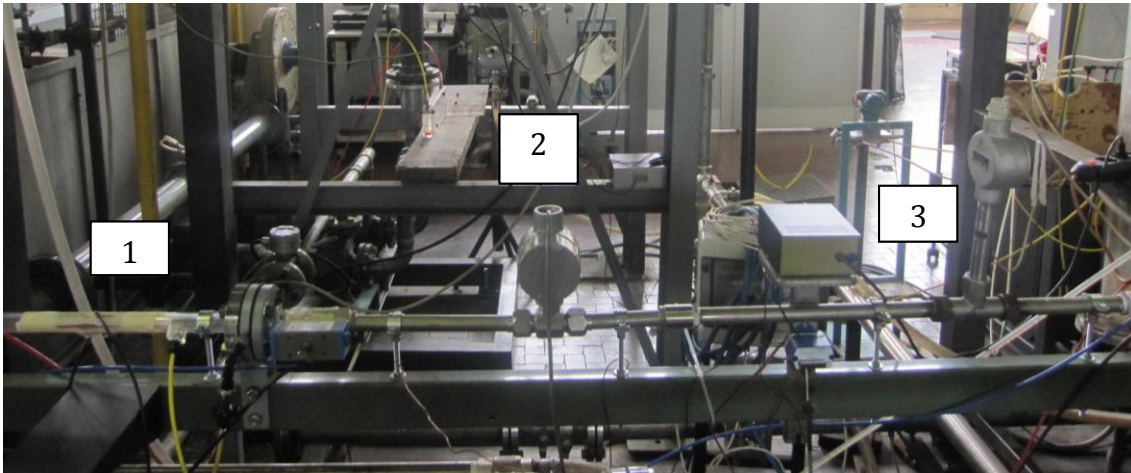


Fig. 4. Experimental facility

The main components of the facility are the feed water loop, the feed air loop, the mixing section, the instruments used to measure single-phase flow rates and also pressure and temperature instrumentations (see *Figs. 5 and 6*).

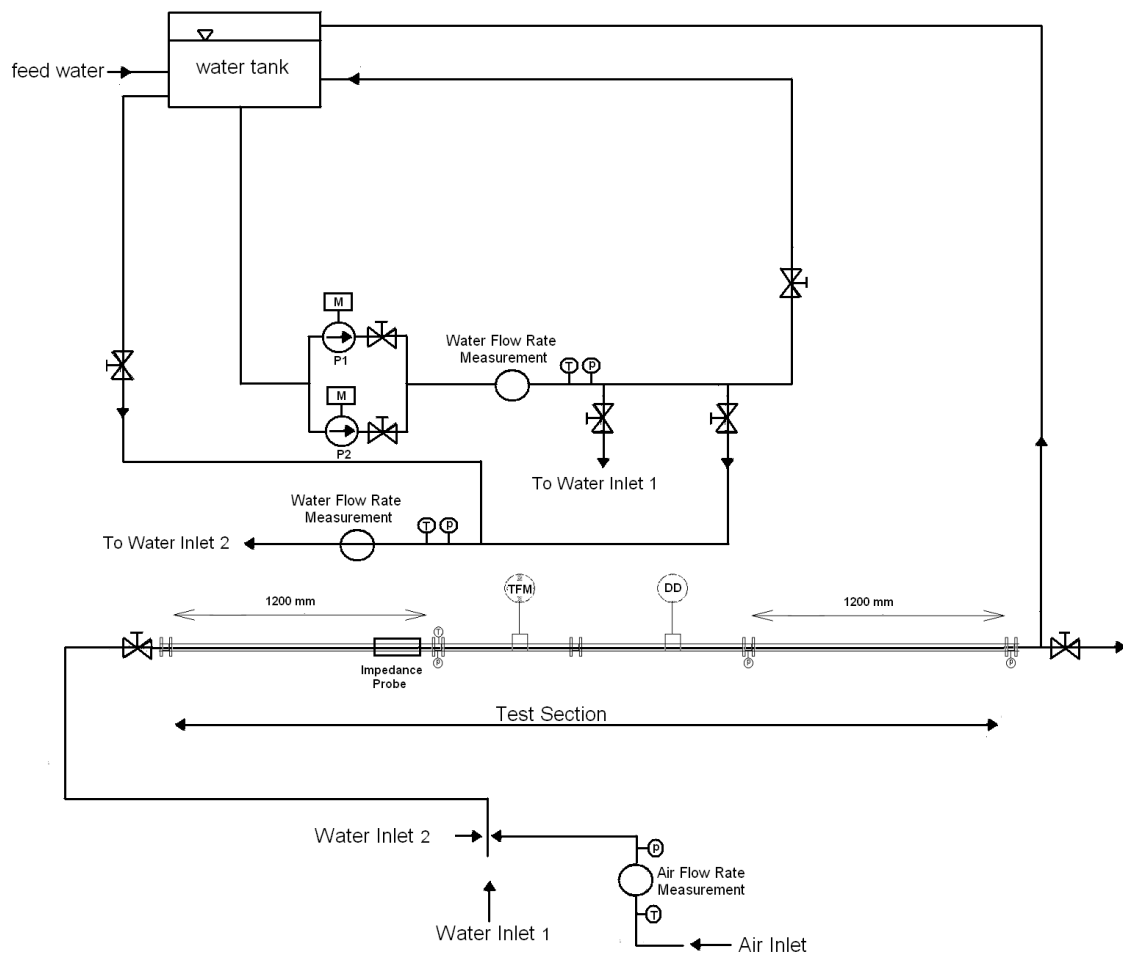


Fig. 5. Scheme of the experimental facility

The water flow rate is provided from the circuit that consists of a tank, two circulation pumps (P1 and P2) that work at variable speed by means of an inverter, and a manifold that distributes the water in the test sections.

The water flow can be provided either by using the pumps or by using the tank head depending on the needed flow rate.

For high water flow rate (higher than 400 l/h) it is necessary to use the pumps (see Fig. 6); in this case water enters towards the test section axially, through a pipe of 21 mm that connects the circuit with the feed water loop.

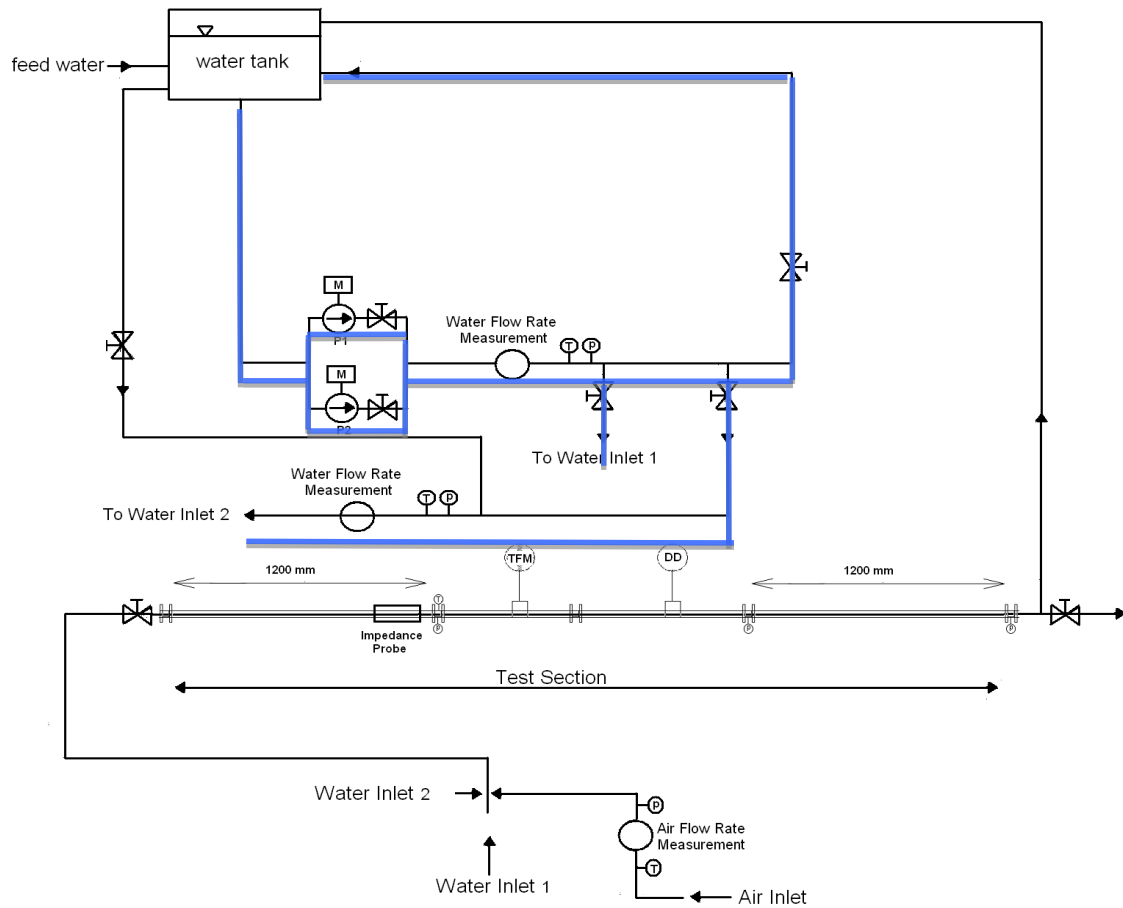


Fig. 6. Scheme of the experimental facility. High flow rate

The liquid flow is measured before the test section using an electromagnetic flow meter (ASA AW6 – 2900/1/B/1/AA) having a flow rate measurement range of 0.9-36 m³/h and a manufacturer's specified accuracies of $\pm 0.5\%$ r.v.

On the other hand, low water flow rates are obtained by using the potential energy of the water that is stored inside the tank when

$$\frac{M_L}{\rho_L} < 100 \text{ l/h}$$

and by using the pumps if

$$\frac{M_L}{\rho_L} < 400 \text{ l/h}$$

In this case, water enters towards the test section radially, through a pipe of 10 mm that connects the mixer with the feed water loop.

Concerning the air to be provided, it can be injected into the circuit by using compressed air from the air network with the conditions:

$$P = 6 \text{ bar}$$

$$\frac{M_G}{\rho_G} < 5000 \text{ NI/h}$$

where *NI/h* means the flow rate measured under normal conditions or standard conditions ($P=1,013 \text{ bar}$ and $T=20^\circ\text{C}$).

It is also possible to inject air either in series with a pressure reduction or using a compressor that provides high flow rate under the conditions:

$$P \simeq 1 \text{ bar}$$

$$\frac{M_G}{\rho_G} < 35000 \text{ NI/h}$$

However, the air flow rate is measured at the inlet of the test section by means of different rotameters for the different ranges: (ASA E5 3000), whose range under normal conditions is between 6300NI/h and 63000NI/h; and a second rotameter, whose range under standard conditions is between 500 NI/h and 5000 NI/h. The uncertainties based on manufacturer's values are $\pm 2\%$ f.s.v. and there is a pressure gauge near the flow meter that allows the correction of flow meter readings.

The standard volumetric flow rate is evaluated by the expression

$$Q(p_0 = 1.013 \text{ bar}, T_0 = 20^\circ\text{C}) = Q_{ASA}(p, T) \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T}} \cdot \sqrt{\frac{p}{p_0}}$$

Then the mass flow rate is calculated by using the air density (that is evaluated under standard conditions).

The test section, which has a total length of 4800 mm, is composed by some devices that are shown in the *Table 1*.

Component	Characteristics	Quick-closing valves
Mixing section	$D_i = 20$ mm	NO
A pipe composed by two parts	Horizontal length ($D_i = 20$ mm, $L = 1600$ mm) Vertical length ($D_i = 20$ mm, $L = 200$ mm) Connected by a 90° elbow A second elbow is used to direct the flow into the horizontal Plexiglas pipe	NO
First Plexiglas test section	$D_e = 25$ mm, $D_i = 19$ mm, $L = 1200$ mm In this section the impedance probe is installed in order to measure the void fraction	YES
Turbine section and drag disk section	Turbine (Hoffer) Drag disk (Ramapo MARK V SN:31195)	YES
Second Plexiglas test section	$D_e = 25$ mm, $D_i = 19$ mm, $L = 1200$ mm	NO

Table 1. Components of the experimental facility

The quick-closing valves measure the volumetric void fraction in the test section and in other regions of the facility.

3.2 SPOOL PIECE

The SP is made up of a Plexiglas pipe where the impedance probe is installed, followed by the turbine section and the drag section, and of a second Plexiglas test section.

3.2.1 Turbine

The turbine, as manufactured by Hoffer, is used to measure the velocity of the fluid. In the experimental facility there are two straight pipes: the turbine is inserted between an upstream length of 290 mm (15 D) and a downstream length of 180 mm (about 8,6 D). It is also interesting to have a quick view about the properties of the turbine, so that is recommended to focus one's attention on the *ANNEX*, which contains the equipment application sheet of the turbine.

Preamplifier

The preamplifier, located on PCA180, accepts the input from the flow meter. The Preamplifier applies amplification, low-pass filtering, and wave-shaping to the input signal. The wave shaping function converts the signal into a square-wave before sending it to the Microcontroller.

Microcontroller

The Microcontroller, located on PCA183, accepts the square-wave output of the preamplifier and performs all of the calculations that are required to control the Loop Driver. After measuring the frequency of the square-wave, the Microcontroller uses the following equations to compute the flow rate and current.

$$flowrate = \frac{frequency}{Kfactor} \cdot 60^{FM} \cdot CF$$

where

Kfactor depends on the Flow Calculation Method setting and is either the Average K-Factor or the Linearized K-Factor from the Frequency/K-factor Table.

FM = Is the Flow rate Units setting of 0, 1, or 2. Where “0” is for Seconds, “1” is for Minutes, and “2” is for Hours.

CF= Is the Correction Factor setting

Then, the current

$$current = 4mA + (16mA \cdot \frac{flowrate}{AF})$$

where

AF= Is the 20 mA maximum Flow rate value

If the calculated flow rate is greater than AF setting, the current will be set to 24 mA to indicate “Over-range” condition. After calculating the current, the Microcontroller digitally sends the current information to the Loop Driver.

Loop driver

The loop driver, located on PCA183, uses the digital information sent to it by the Microcontroller to set the current of the loop. The Loop Driver also supplies power to the Microcontroller.

Communications interface

The Communications interface, located on PCA183, provides an RS232C port to the Microcontroller. The connector for the communication interface may be accessed by removing the top plate. The external terminal device provides power for the Communication Interface. The Communication Interface is used to configure and trouble-shoot the transmitter.

System Response Time

The analogue output response time to reach steady state due to a change in the flow rate is approximately (1/8 seconds) when flow stops, the time for the analogue output to return to 4 mA will be between 3 and 12 seconds, depending on the Maximum Sample Time (MST) setting. MST is adjusted using the NB=(DATA) command, where NB is a value between 1 and 80. The default MST setting is NB=1. Adjusting the MST is only recommended for low flow applications where the minimum input frequency is below 1Hz.

3.2.2 Drag disk

The drag disk, as manufactured by Ramapo, is capable of measuring the force exerted by the fluid flow on a target inside of pipe cross section.

As it has been said on previous lines, the dynamic force of fluid flow is sensed as a drag force on a target into the flow stream. The strain gauge bridge circuit translates the mechanical stress due to the sensor into directly proportional electrical output:

$$S_d = K_d \cdot F = K_d \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_d \cdot \rho \cdot V^2 \right)$$

where A_d is the target cross section, C_d is the drag coefficient and K_d is an electrical proportional factor. In single-phase flow, the drag coefficient is almost constant in a wide range of Re number (10^4 - 10^7).

In the experimental case, the electronic of the target flow meter produces, by a strain gauge, a signal in the range between 0-10 V, corresponding to the force that the fluid flow applies to the target. Conversion is linear, and the declared force factor is:

$$k = \frac{S}{V_{ai} \cdot F} = 0,595 \cdot \left[\frac{V}{V \cdot Kg_f} \right]$$

where S is the electrical signal in V, V_{ai} is the supply voltage of the Wheatstone bridge and F is the force expressed in kg due to the interaction between target and fluid.

It is necessary to obtain an accurate value of C_d . For two-phase applications, a drag disk cannot easily be used because of the variation of the momentum flux in the cross section due to void migration to the centre of a tube. Even with full-flow drag devices, it is difficult to determine the correct value of the momentum flux. The only known parameters are the cross-sectional void fraction obtained from measurements and the individual phase mass flows. Anderson (1980) developed a simple model with cross-sectional averaged properties. Using a two-velocity separated flow model, it was assumed that the forces on the drag body were equal to the sum of the individual forces due to both phases. After some algebraic manipulation, the drag force was shown to be equal to

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_{\text{bersaglio}} \cdot [\alpha \cdot (\rho \cdot V^2)_g + (1 - \alpha) \cdot (\rho \cdot V^2)_l]$$

This model is the same as used by Aya to analyse the behaviour of a turbine meter and a drag meter in a SP.

As in the case of the turbine, the application sheet of the drag disk used in the laboratory facility is enclosed in the *ANNEX*.

3.2.3 Impedance probe

Firstly, it is important to indicate which are the dimensions of this device (*Fig. 7*): the two characteristic parameters are:

$$l_{\text{probe}} = 16,6\text{cm}$$

$$h_{\text{probe}} = 1,8\text{cm}$$

The electrical behaviour of the system must be analysed as equivalent impedance. Because of the presence of water (conductive fluid) and because of the excitation frequency used (167 kHz), the system cannot be considered as purely capacitive. Then the equivalent impedance is

$$Z_{\text{eq}} = R + jX_C$$

The system (wall + fluid phases' distribution) has to be analysed as an electrical system constituted by a network of resistances and capacitances connected in series and/or in parallel. The values of R and C depend on electrical properties of the materials and also on the geometry of the system. As concave probes can be approximate as parallel plates, neglecting the curvature of the electric field, it is possible to write

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d}{A} \quad X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad C = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{d}$$

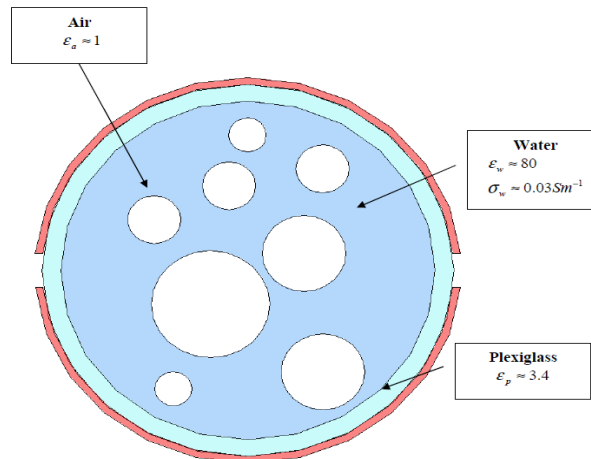


Fig. 7. Scheme of the measurement cross-section and electrical properties of the materials

where f is the excitation frequency. Using a simplified model of flow pattern, the Z_{eq} can be expressed as a function of this parameter

Figs. 8 and 9 show the electrical schemes that is adopted to generate an analogical electrical signal function of probe impedance.

It consists of a signal which provides a sine wave, 5Vpp/167kHz applied to one of the two electrodes. The output signal (voltage between the electrodes) is sent to an amplifier, a full wave rectifier and a low pass filter (100Hz) and then sent, by the National Instruments DAQ system, to the personal computer (pc) in order to analyse the electrical signals (Volt).

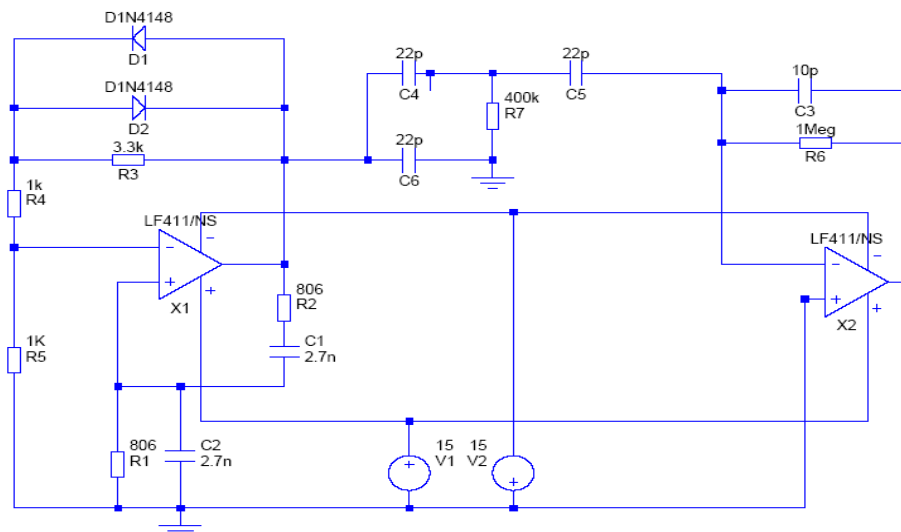


Fig. 8. Electrical scheme. Oscillator

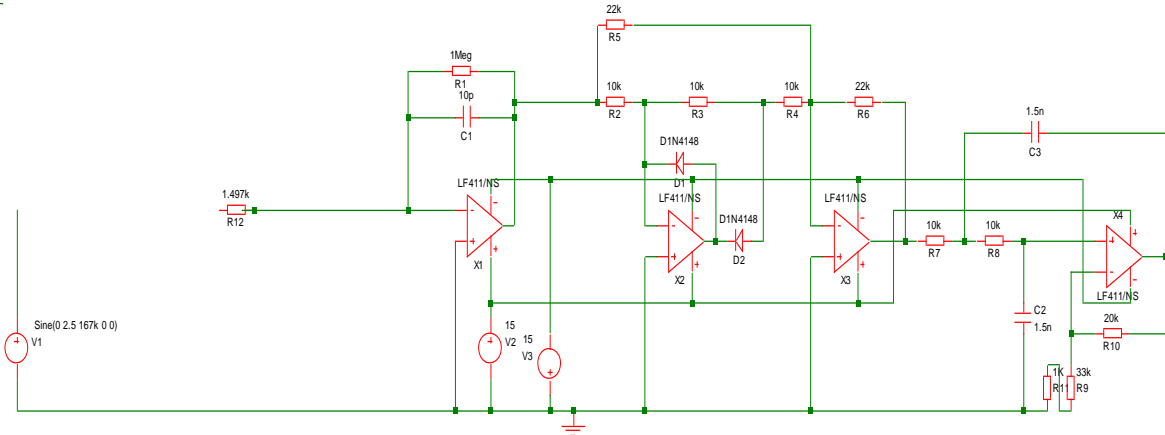


Fig. 9. Electrical scheme. Measurement system

3.2.4 Measurement methodology

The mixture of air and water is prepared in a mixer pipe ($D_i = 21$ mm) where air enters along the radial direction and water along axial and/or radial pipe direction.

Single-phase flow rate is measured before the inlet section (pressure and temperature in the rotameter have to be measured for each run in order to correct the volumetric air flow rate).

In the test section, the absolute pressure at the inlet of the SP is measured using an absolute pressure transducer Rosemount 3051/1 operating in the range between 0.5-10 bar. Pressure drop in the SP and in the second or first Plexiglas section are also measured.

The SP instrument signals (turbine, drag disk, impedance probe) and the pressure signals are gathered with a National Instruments DAQ system (NI USB-6218) using LabView® environment. Each channel connected to the PC has got its respective connected device, namely:

- Channel 0: Turbine signal
- Channel 1: Drag signal
- Channel 2: Pressure signal
- Channel 3: Impedance probe signal
- Channel 4: Pressure drop signal.

After that instrument calibration with single-phase water flow, it is necessary to register turbine and drag signals for each water flow rate, in order to calculate K_t and $K_d \cdot C_d$.

Concerning the range of flow rates of both air and water, in the two-phase campaign the air flow rates range between 0.0632 and 3.06 kg/s and water flow rates range between $1.67 \cdot 10^{-5}$ and $5.6 \cdot 10^{-4}$ kg/s.

Thus, for each run the procedure is as follows:

- 1) To fix the water flow rate
- 2) To fix the air flow rate
- 3) To measure the air pressure inside the air rotameter
- 4) To register the signals for about 30s; from the instantaneous values, standard deviations and mean values are evaluated. Using sample frequency equal to 1kHz, the mean value is evaluated each second using 1000 measurement points.
- 5) To act the quick-closing valves, to discharge the water contained in the test section and to weight it (about 5-10 times for each water/air ratio). Water mass in the test section will be used to calculate the volumetric void fraction in the test section.
- 6) To repeat all the procedure (about 5-10 times for each determined water/air ratio), verifying that the conditions are unchanged (mass flow rates and pressures).

4. EXPERIMENTAL MATRIX AND CALIBRATION

First of all, it is important to construct an experimental matrix of the tested flow rates (Table 2) and, as mentioned previously, for each Run at least five measurements are taken and the mean of all the values is calculated in order to work with more reliable data.

Run	W_{H_2O} [Kg/s]	W_{air} [kg/s]	Run	W_{H_2O} [Kg/s]	W_{air} [kg/s]
1	0.027778	0.000911	21	0.552167	0.000893
2	0.069444	0.000908	22	0.309722	0.002209
3	0.111111	0.000913	23	0.415444	0.002209
4	0.027778	0.00224	24	0.552167	0.002209
5	0.069444	0.00224	25	0.320833	0.004309
6	0.111111	0.00224	26	0.413056	0.004341
7	0.027778	0.004414	27	0.558222	0.004366
8	0.069444	0.004341	28	0.258333	0.002684
9	0.111111	0.004417	29	0.418111	0.002688
10	0.166667	0.000091	30	0.5575	0.002688
11	0.276333	0.000091	31	0.301944	0.003534
12	0.421167	0.000091	32	0.4165	0.003539
13	0.5525	0.000091	33	0.555556	0.003534
14	0.149556	0.00045	34	0.016667	0.002515
15	0.275556	0.000451	35	0.027778	0.002474
16	0.417111	0.000452	36	0.094444	0.002515
17	0.562222	0.00045	37	0.016667	0.003216
18	0.183333	0.000903	38	0.027778	0.003272
19	0.2825	0.000903	39	0.108333	0.003272
20	0.418722	0.000901			

Table 2. Air and water flow rates for each Run

In the *ANNEX* all the data can be found in order to check and understand better the experimental information obtained.

4.1 SINGLE-PHASE CALIBRATION

The first step to begin the experimental analysis is to calibrate the instrumentation. In order to make this some experiments have been done with single-phase flow (water).

4.1.1 Calibration of the Turbine

To calibrate the turbine the formula presented in the point 1.1.2 are used taking into account the technical characteristics of the turbine used in the laboratory (see the ANNEX). The aim of this analysis is to find the parameter K_t and also to find the regression curve at different water flow rate, by relating the signal of the turbine (S_t) with the flow rate, as shown in Fig.10.

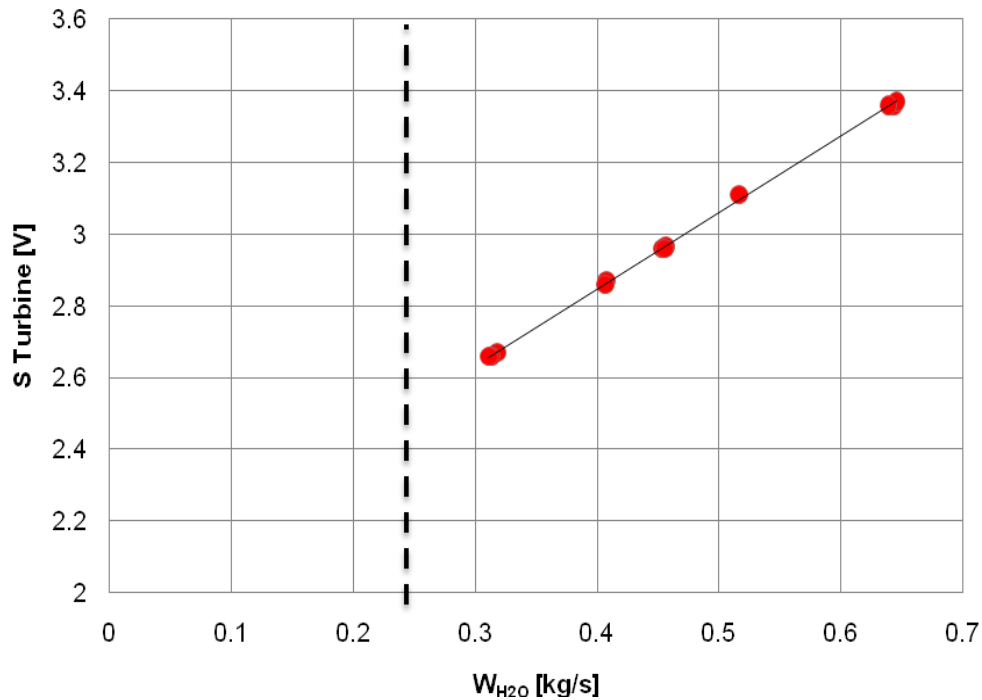


Fig. 10. S Turbine [V] vs. mass flow rate of water [kg/s]. Single-phase (water)

The non-continuous straight indicates the minimum water flow rate (single-phase flow) where the turbine is designed to work. As one can see in ANNEX, the range of water flow rate is between 900-13600 l/h or 0.25-3.8 kg/s. At water flow rate less than 0,25 kg/s the signal likely has a non-linear behaviour as in this area it cannot be applied the expression

$$S_t = K_t \cdot Q$$

For that reason, water flow rates higher than 0,25 kg/s have been chosen for the single-phase flow calibration. The regression curve of these data follows the equation:

$$S_{Turbine}[V] = 2,1371 \cdot W_{H2O} + 2$$

with a correlation coefficient of

$$R^2 = 0.99959$$

Thus, the data fits well a linear regression, as the expression that relates the signal with the water flow is:

$$S_t = K_t \cdot Q$$

At higher water flow, the turbine rotates faster, so the signal that is sent to the computer is higher. When there is no flow ($W_{H2O} = 0$) the signal of the turbine is 2 (Fig. 10).

The parameter K_t is shown at different Reynolds number in Fig. 11. As expected, the K_t parameter remains almost constant at about 2100 $V \cdot s/m^3$.

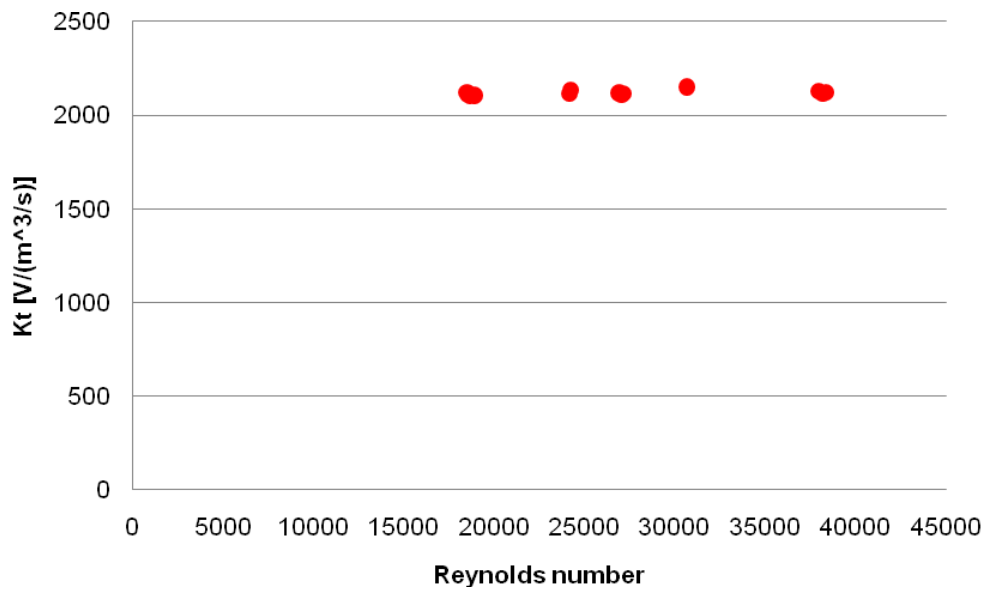


Fig. 11 . Kt vs. Reynolds number

4.1.2 Calibration of the Drag Disk

To calibrate the drag disk the same method has been used. In Fig. 12, the curve of calibration is shown.

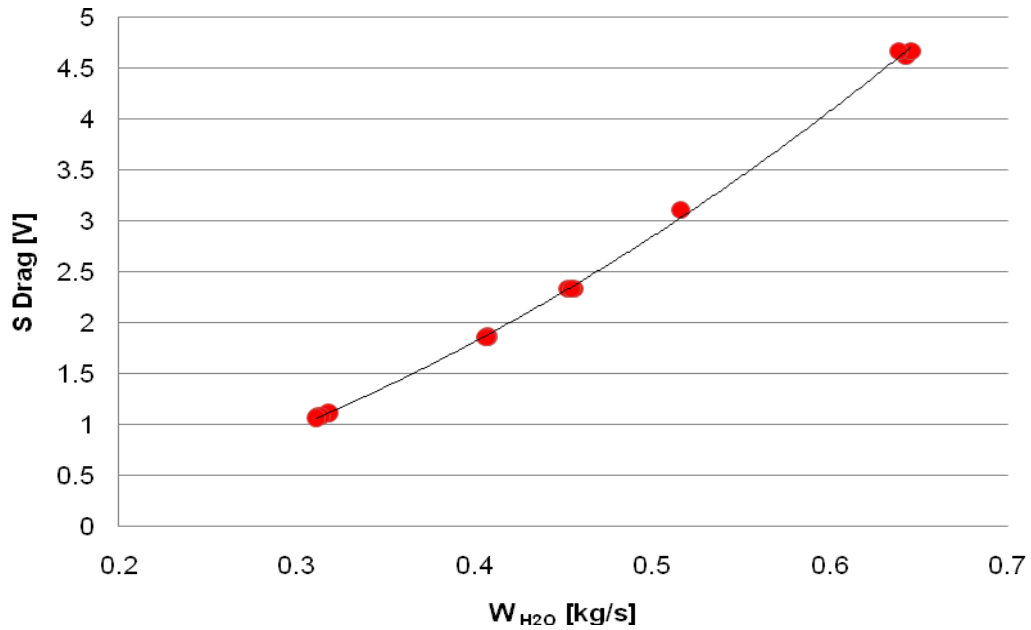


Fig. 12. S Drag [V] vs. mass flow rate of water [kg/s]. Single-phase (water)

In this case, the regression is polynomial of the second degree. This is consistent with the equation,

$$S_d = K_d \cdot F = K_d \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_d \cdot \rho \cdot V^2\right)$$

with the correlation coefficient :

$$R^2 = 0.99939$$

When there is no flow of water, the value of the drag's signal is zero Volts.

As it has been done with the K_t parameter for the turbine calibration, the $K_d \cdot C_d$ parameter is plotted versus the Reynolds number. The parameter remains almost constant (Fig. 13). Then, it can be considered that the $K_d \cdot C_d$ parameter is more or less 23 V/ (kg·m/s²).

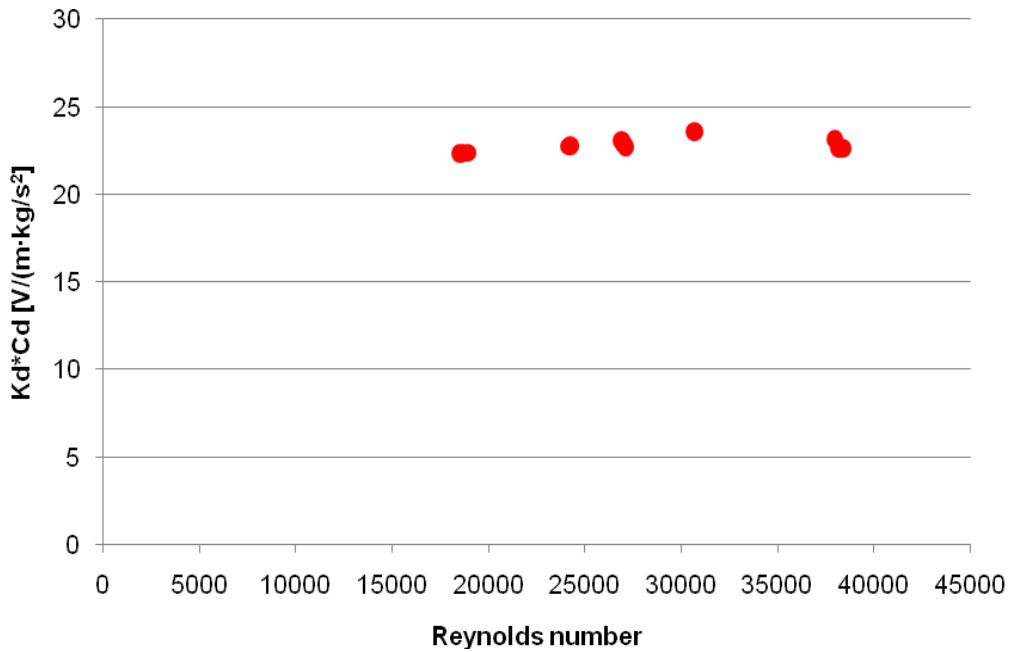


Fig. 13. $K_d \cdot C_d$ vs Reynolds number.

4.2 TWO-PHASE FLOW

4.2.1 Calibration of the Impedance Probe

The next step is to calibrate the impedance probe to be able to measure the void fraction. The method of quick-closing valves is used, and the measured void fraction is compared with the data obtained by the impedance probe. The results are presented in *Fig.14* (the circled point has been considered an outlier and then discharged before computing the line of best fit).

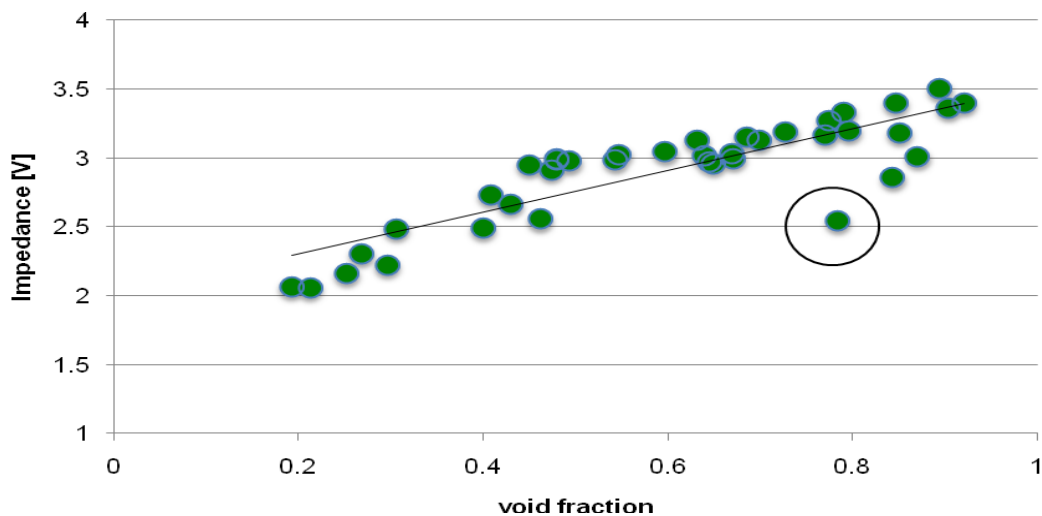


Fig. 14. Impedance vs. void fraction

The regression line gives the correlation:

$$SI_{Impedance}[V] = 1.5505 \cdot \alpha + 2$$

and the correlation coefficient is:

$$R^2 = 0.80227$$

As the Fig. 14 shows, if the proportion of air increases, the void fraction increases; the signal that the impedance probe sends to the computer also increases. The percentage of error is shown in Fig. 15.

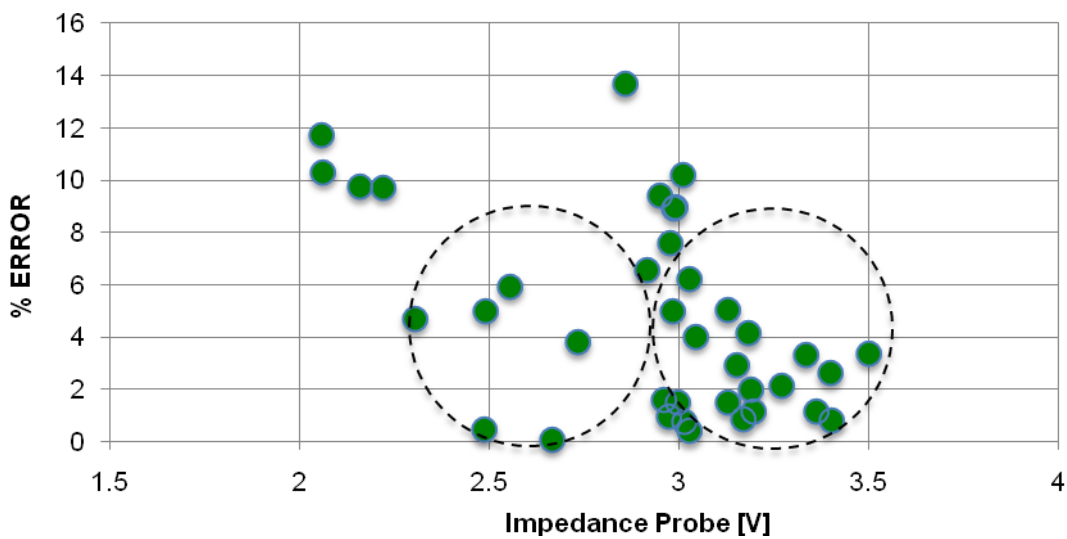


Fig. 15. Percentage of error vs. void fraction

For responses of the impedance probe signal around 2.5V and 3.1-3.3V the error is quite low. If the calibration values are divided into groups depending on the flow pattern, the best fit correlations of the impedance values as a function of the void fraction and the correlation coefficients can be seen in Table 3 and in Fig. 16:

Flow pattern	Expression	R ²
Bubbly/Plug/Intermittent	$SI[V] = 2,9496 \cdot \alpha + 1,4553$	0,8634
Annular	$SI[V] = 1,2631 \cdot \alpha + 2,3049$	0,8632
Slug	$SI[V] = 1,7624 \cdot \alpha + 1,8511$	0,8417
Stratified/Slug (High velocity)	$SI[V] = 6,3363 \cdot \alpha - 2,4034$	0,8888

Table 3. Expressions concerning the response of the impedance and the void fraction

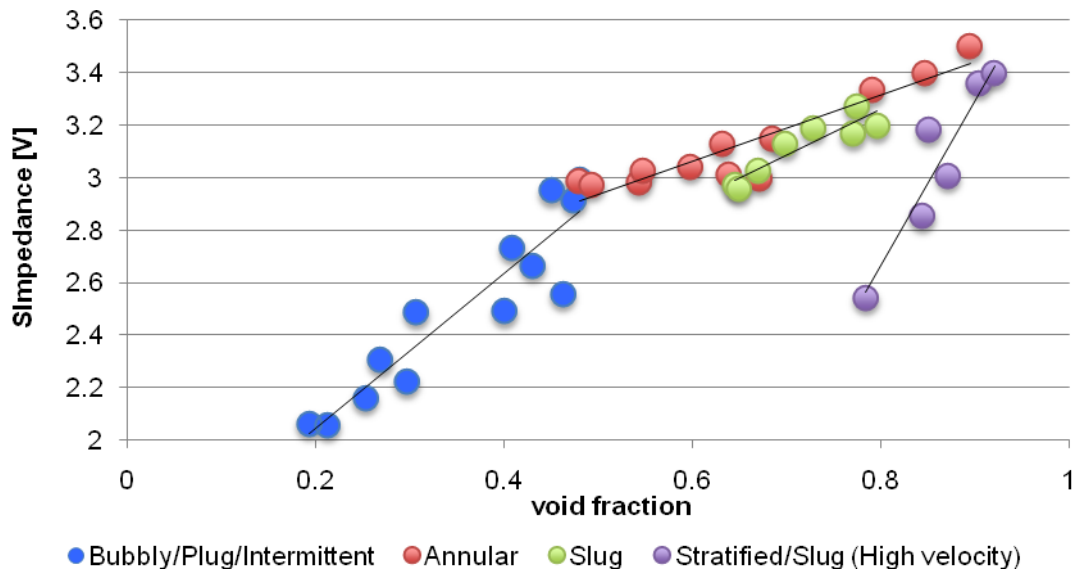


Fig. 16. Impedance [V] vs. void fraction at different flow patterns

Fig. 17 shows a comparison between experimental and theoretical void fraction at different flow pattern..

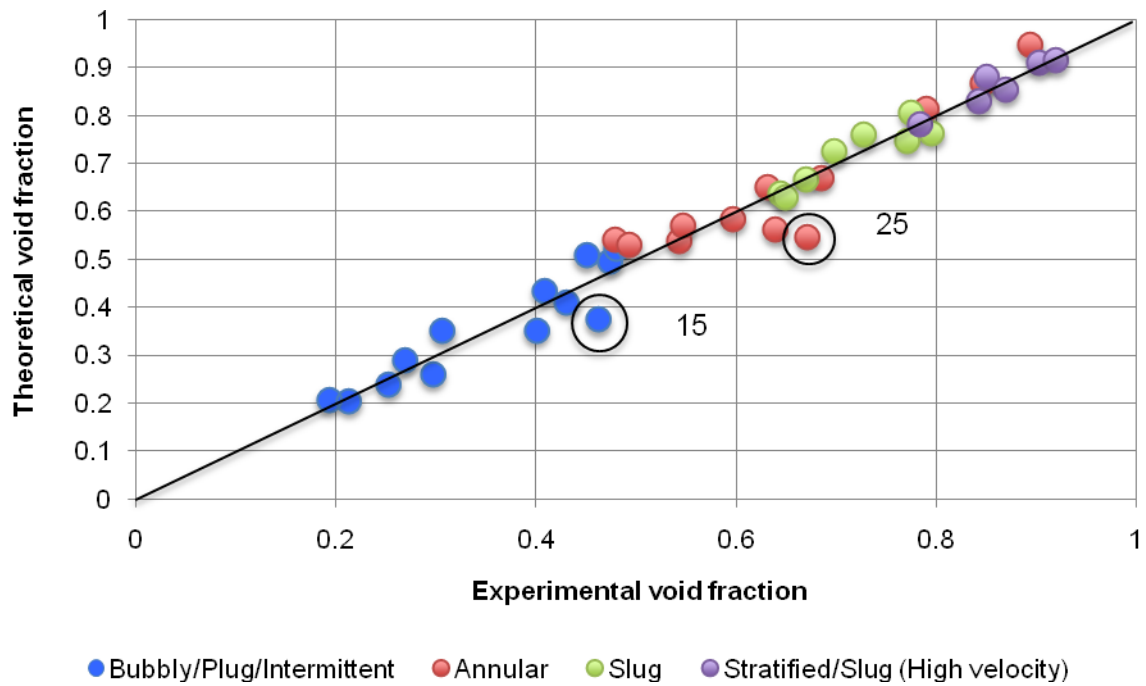


Fig. 17. Experimental void fraction vs. theoretical void fraction at different flow patterns

The highest error of about 20% occurs in Run 15 and Run 25, that are characterised by an intermittent flow, that likely influences the void fraction.

5. TWO PHASE FLOW EXPERIMENTAL RESULTS

5.1 VOID FRACTION

Fig. 18 compares the experimental void fraction values as a function of the quality with the most used alfa- x correlations.

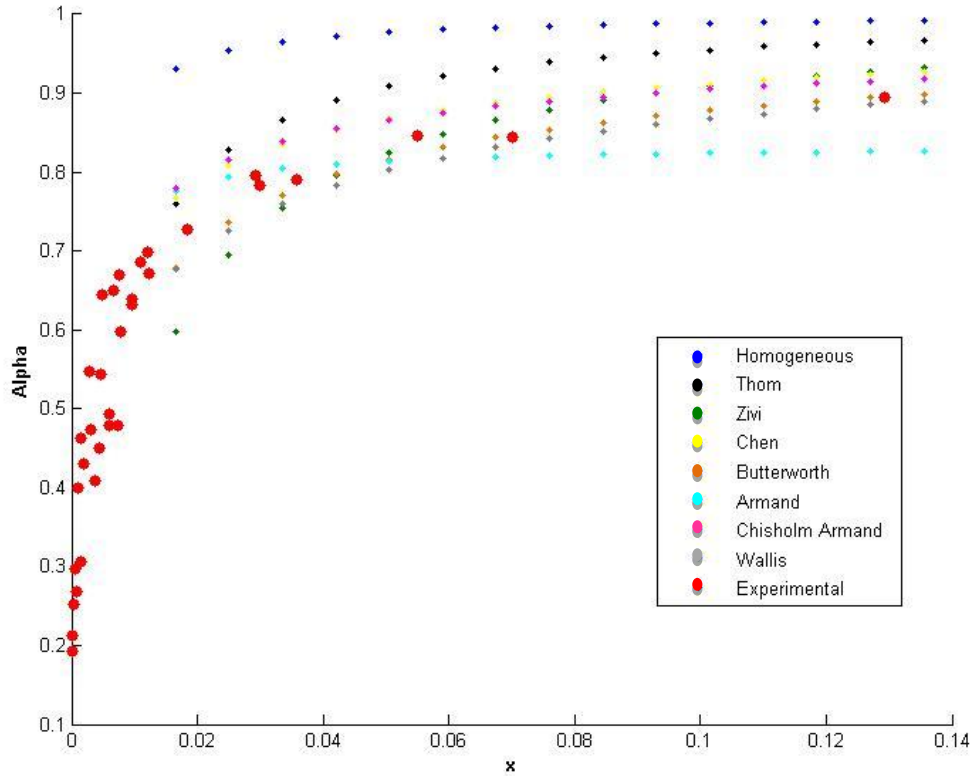


Fig. 18. Experimental data compared with the alfa- x correlations

Fig. 19 shows the comparison between the Wallis correlation and the experimental data. The Wallis correlation is:

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{1-x}{x} \right) \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,72} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0,08} \right]^{-1}$$

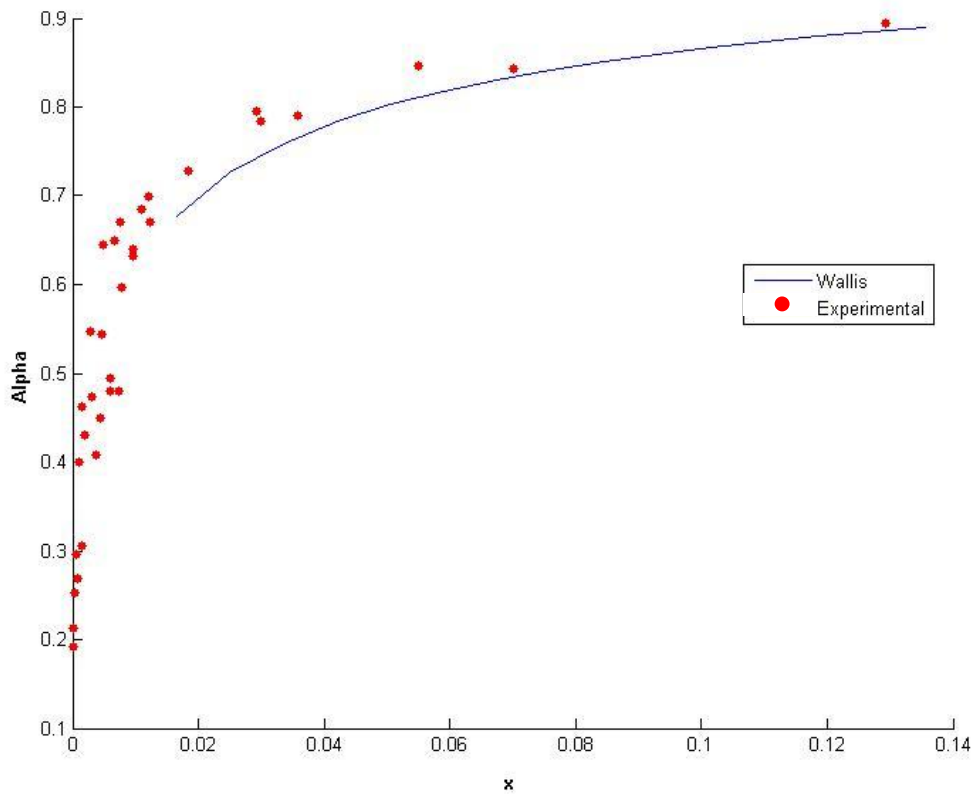


Fig. 19. Experimental data compared with the Wallis correlation

It can be seen that the Wallis correlation fits rather well the experimental data.

5.2 PRESSURE DROP

The total pressure drop Δp_{total} is the sum of the static pressure drop (elevation head) Δp_{static} , the momentum pressure drop (acceleration) Δp_{mom} , and the frictional pressure drop Δp_{frict} :

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{mom} + \Delta p_{friction}$$

The pressure drop (Δp_{total}) has been measured and it is shown in the Fig. 20.

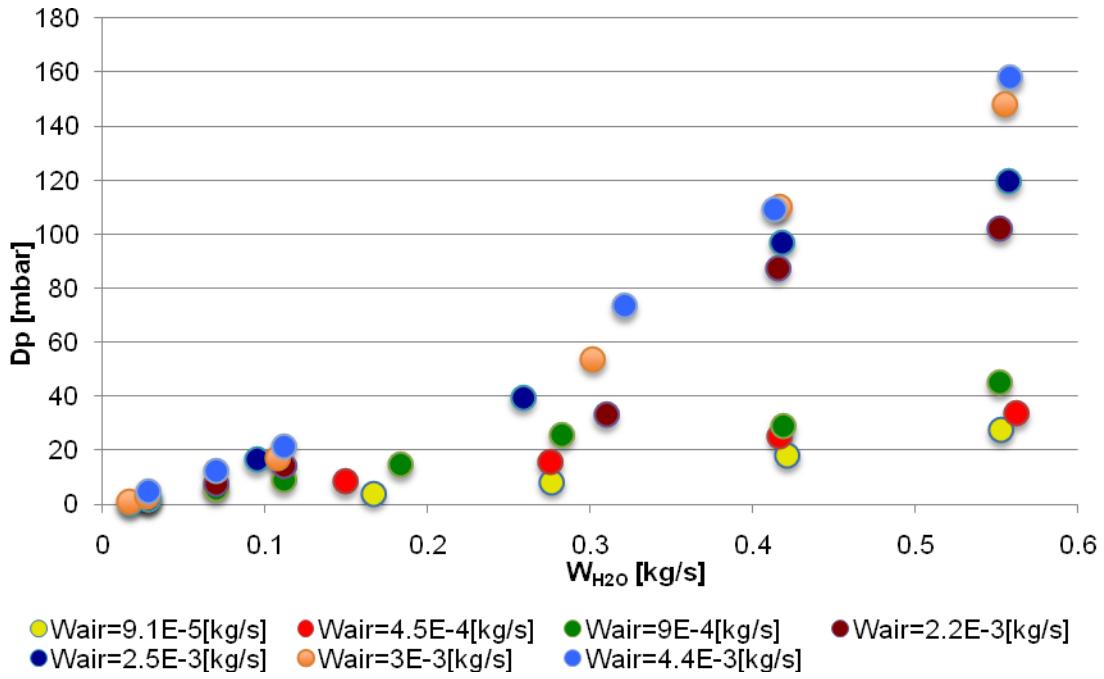


Fig. 20. Experimental Pressure drop [mbar] data vs. water flow rate [kg/s], at different flow pattern

As expected it can be observed a quadratic form of pressure drop as a function of the water flow rate.

$\Delta p_{static} = 0$ for horizontal channels.

The $\Delta p_{friction}$ can be calculated by means of the Friedel correlation (Fig. 21).

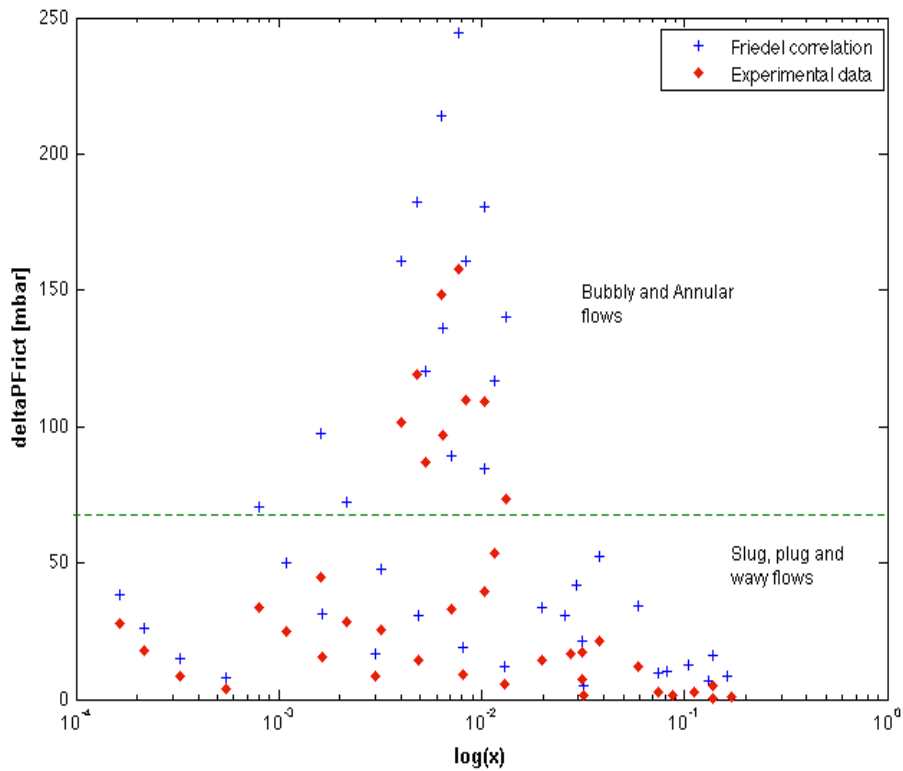


Fig. 21. ΔP_{frict} [mbar] vs. $\log(x)$

The Friedel correlation overestimates the value of the pressure drop; in *Fig. 22* the comparison between the calculated and experimental data is presented. Concerning the flow patterns, it is interesting to notice that the pressure drop is much higher for flow patterns such as Plug and Bubbly flows than for Slug, Wavy and Annular flows (approximately 50-100 mbars).

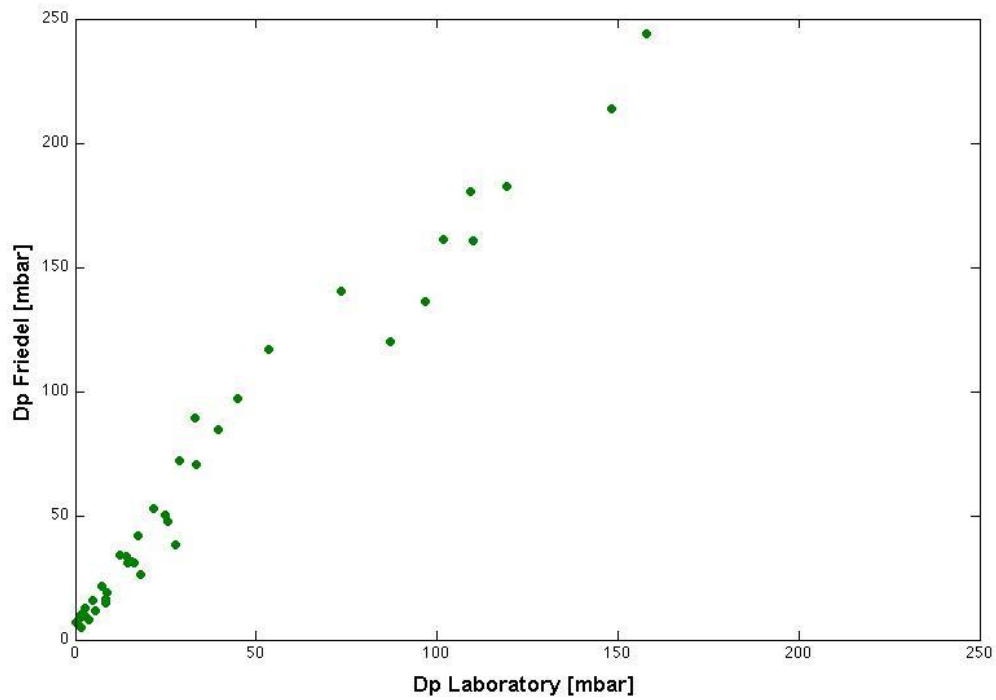


Fig. 22. Dp Friedel vs. Dp laboratory

5.3 FLOW PATTERN MAPS

Table 4 shows the observed flow-patterns in each Run.

	Q water [l/h]	Q air [l/h]	Flow pattern observed
1	100	2734	Stratified with slow slug
2	250	2723	Stratified with slug (faster)
3	400	2738	Stratified with slug (faster)
4	100	6720	As Run 3
5	250	6720	As Run 3
6	400	6720	Slug/annular wavy
7	100	13243	Annular intermittent/slug
8	250	13024	Annular wavy
9	400	13252	Annular wavy
10	600	274	Plug
11	995	272	Plug/bubbly
12	1516	274	Bubbly
13	1989	272	Bubbly/dispersed
14	538	1350	Intermittent
15	992	1353	Intermittent
16	1502	1357	Intermittent/bubbly
17	2024	1351	Dispersed/bubbly
18	660	2710	Slug
19	1017	2710	Slug-intermittent
20	1507	2703	Bubbly/intermittent
21	1988	2680	Bubbly
22	1115	6626	Slug-annular
23	1496	6626	Intermittent-bubbly
24	1988	6626	Annular-intermittent-bubbly
25	1155	12927	Annular-intermittent
26	1487	13024	Annular
27	2010	13100	Bubbly-intermittent
28	930	8053	Bubbly
29	1505	8064	Annular-intermittent
30	2007	8064	Bubbly-intermittent
31	1087	10602	Annular-intermittent
32	1499	10617	Annular-intermittent
33	2000	10602	Annular-intermittent
34	60	7546	Stratified
35	100	7423	Stratified/slug
36	340	7546	Slug
37	60	9647	Stratified wavy/slug
38	100	9815	Stratified wavy
39	390	9815	Slug

Table 4. Observed flow patterns

In the flow pattern maps it is not always possible to specify the difference between some kind of flow patterns, especially when an intermittent flow occurs.

5.3.1 Hewitt and Roberts Map

Fig. 23 and Table 5 compare the experimental flow patterns of Table 4 with Hewitt-Roberts Map.

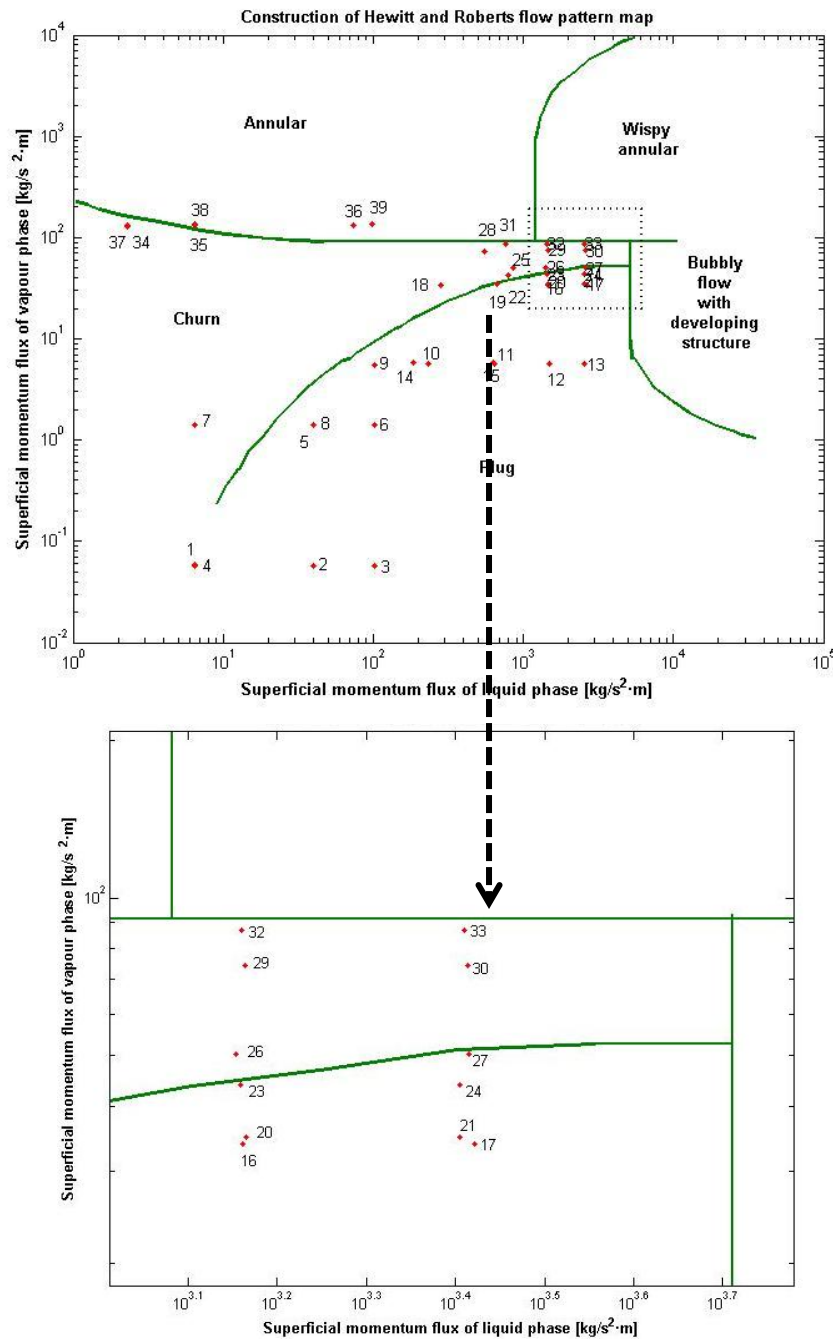


Fig. 23. Flow-pattern map of Hewitt and Roberts compared with experimental data

In order to make it clearer, the data has been classified in a table so as to compare the flow patterns observed with the flow patterns predicted from the map. *Fig. 23* and *Table 5* show the comparison.

	Q water [l/h]	Q air[l/h]	Flow pattern observed	Flow pattern map
1	100	2734	Stratified with slow slug	Plug-Churn
2	250	2723	Stratified with slug (fast)	Plug
3	400	2738	Stratified with slug (fast)	Plug
4	100	6720	Stratified with slug (fast)	Plug-Churn
5	250	6720	Stratified with slug (fast)	Plug
6	400	6720	Slug/annular wavy	Plug
7	100	13243	Annular intermittent/slug	Churn
8	250	13024	Annular wavy	Plug
9	400	13252	Annular wavy	Plug
10	600	274	Plug	Plug
11	995	272	Plug/bubbly	Plug
12	1516	274	Bubbly	Plug
13	1989	272	Bubbly/dispersed	Plug
14	538	1350	Intermittent	Plug
15	992	1353	Intermittent	Plug
16	1502	1357	Intermittent/bubbly	Churn
17	2024	1351	Dispersed/bubbly	Churn
18	660	2710	Slug	Churn
19	1017	2710	Slug-intermittent	Plug-Churn
20	1507	2703	Bubbly/intermittent	Churn
21	1988	2680	Bubbly	Churn
22	1115	6626	Slug-annular	Plug
23	1496	6626	Intermittent-bubbly	Churn
24	1988	6626	Annular-intermittent-bubbly	Churn
25	1155	12927	Annular-intermittent	Plug
26	1487	13024	Annular	Plug
27	2010	13100	Bubbly-intermittent	Plug-Churn
28	930	8053	Bubbly	Plug
29	1505	8064	Annular-intermittent	Plug
30	2007	8064	Bubbly-intermittent	Plug
31	1087	10602	Annular-intermittent	Plug
32	1499	10617	Annular-intermittent	Plug
33	2000	10602	Annular-intermittent	Plug
34	60	7546	Stratified	Churn
35	100	7423	Stratified/slug	Annular
36	340	7546	Slug	Annular
37	60	9647	Stratified wavy/slug	Churn
38	100	9815	Stratified wavy	Annular
39	390	9815	Slug	Annular

Table 5. Comparison between the observed flow pattern and the Hewitt and Roberts map

5.3.2 Mandhane Map

Fig. 24 and Table 6 show the comparison of the experimental flow patterns with the Mandhane Map.

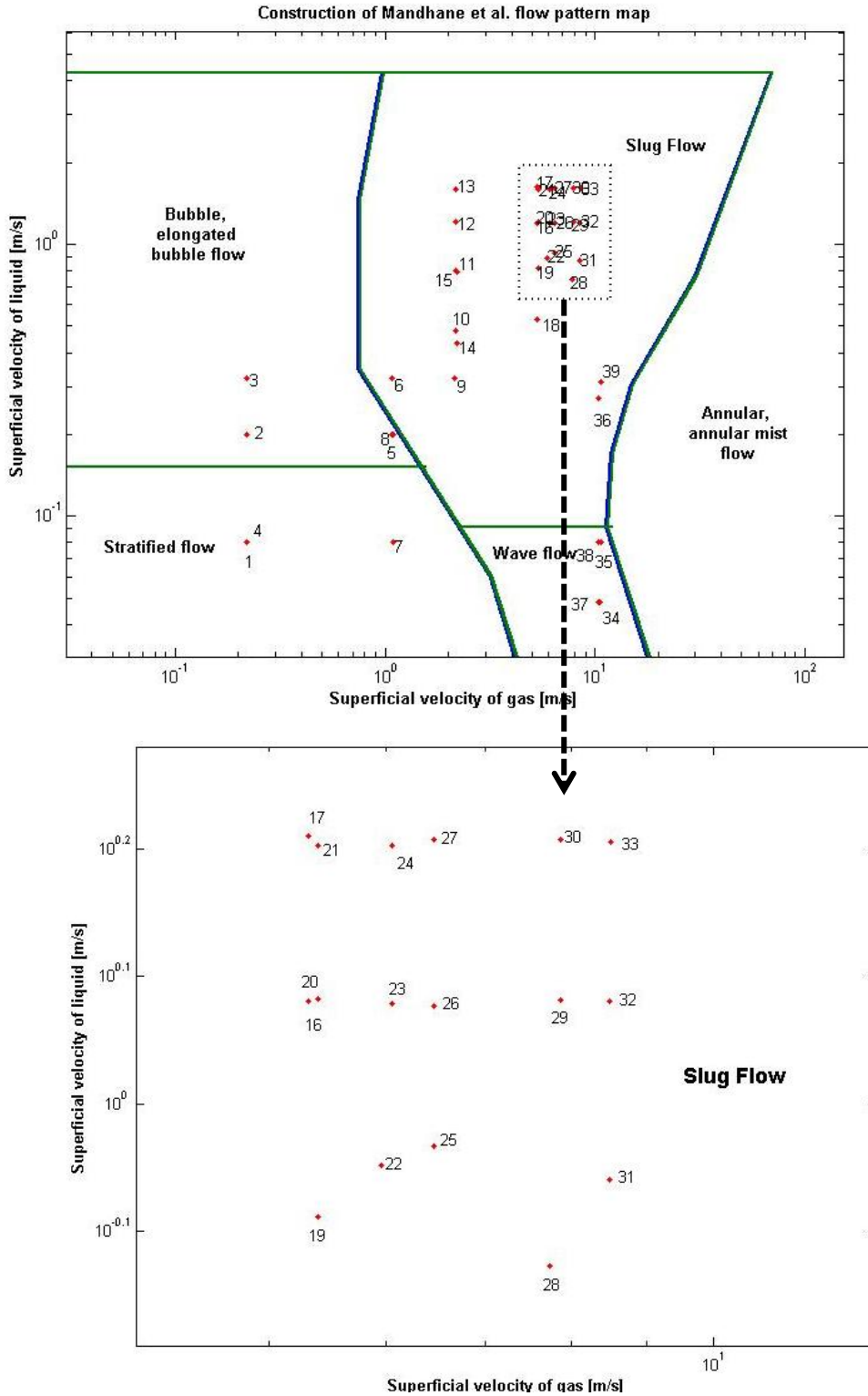


Fig. 24 . Flow-pattern map of Mandhane compared with experimental data

	Q water [l/h]	Q air[l/h]	Flow pattern observed	Flow pattern map
1	100	2734	Stratified with slow slug	Stratified
2	250	2723	Stratified with slug (faster)	Bubble, elongated bubble
3	400	2738	Stratified with slug (faster)	Bubble, elongated bubble
4	100	6720	Stratified with slug (fast)	Bubble, elongated bubble
5	250	6720	Stratified with slug (fast)	Slug
6	400	6720	Slug/annular wavy	Stratified
7	100	13243	Annular intermittent/slug	Bubble, elongated bubble
8	250	13024	Annular wavy	Slug
9	400	13252	Annular wavy	Slug
10	600	274	Plug	Slug
11	995	272	Plug/bubbly	Slug
12	1516	274	Bubbly	Slug
13	1989	272	Bubbly/dispersed	Slug
14	538	1350	Intermittent	Slug
15	992	1353	Intermittent	Slug
16	1502	1357	Intermittent/bubbly	Slug
17	2024	1351	Dispersed/bubbly	Slug
18	660	2710	Slug	Slug
19	1017	2710	Slug-intermittent	Slug
20	1507	2703	Bubbly/intermittent	Slug
21	1988	2680	Bubbly	Slug
22	1115	6626	Slug-annular	Slug
23	1496	6626	Intermittent-bubbly	Slug
24	1988	6626	Annular-intermittent-bubbly	Slug
25	1155	12927	Annular-intermittent	Slug
26	1487	13024	Annular	Slug
27	2010	13100	Bubbly-intermittent	Slug
28	930	8053	Bubbly	Slug
29	1505	8064	Annular-intermittent	Slug
30	2007	8064	Bubbly-intermittent	Slug
31	1087	10602	Annular-intermittent	Slug
32	1499	10617	Annular-intermittent	Slug
33	2000	10602	Annular-intermittent	Slug
34	60	7546	Stratified	Wave
35	100	7423	Stratified/slug	Wave
36	340	7546	Slug	Slug
37	60	9647	Stratified wavy/slug	Wave
38	100	9815	Stratified wavy	Wave
39	390	9815	Slug	Slug

Table 6. Comparison between the observed flow pattern and Mandhane map

5.3.3 Taitel and Yemada Map

The last flow pattern map that has been analysed is the Taitel and Yemada map. To introduce the data in the map, the Martinelli parameter X, the gas Froude number FrG and the parameters T and K have to be calculated for each point with the relations:

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \cdot \frac{u_G^s}{\sqrt{D \cdot g \cdot \cos \alpha}}$$

$$K = F \cdot Re_L^s{}^{1/2} = F \cdot \left[\frac{D \cdot u_L^s}{\nu_L} \right]^{1/2}$$

$$T = \left[\frac{|(dP/dx)_L^s|}{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \cos \alpha} \right]^{1/2}$$

$$X_{tt} = \left[\frac{(dP/dx)_L^s}{(dP/dx)_G^s} \right]^{1/2}$$

All the parameters plotted (X, FrG, K and T) have been calculated for each Run (Fig. 25 a,b,c).

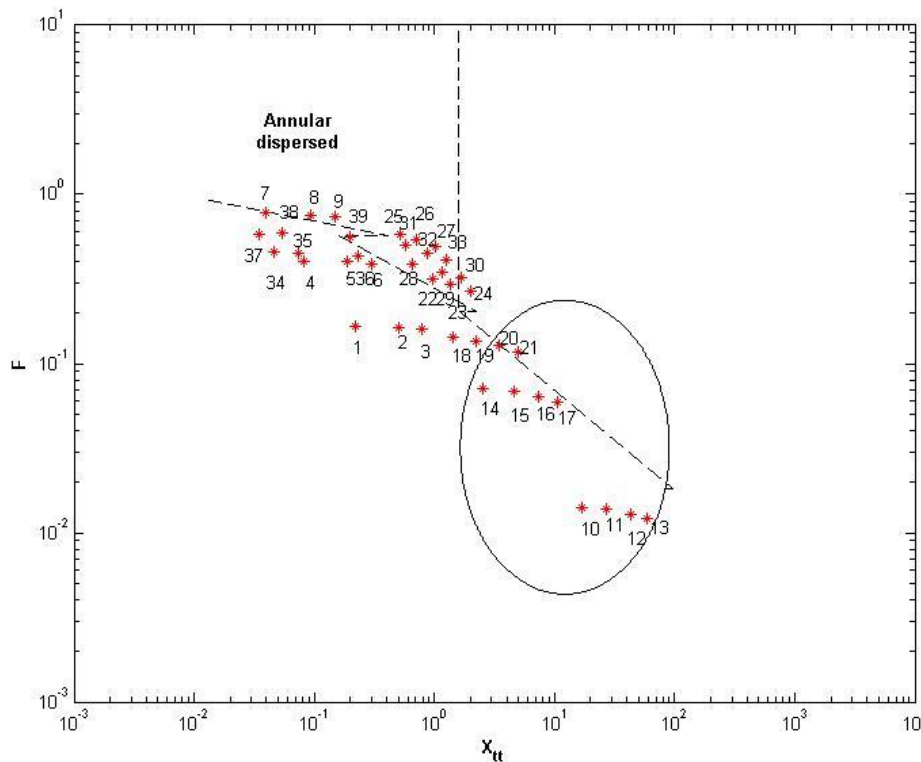


Fig. 25a. Flow-pattern map of Taitel and Yemada compared with experimental data (F,Xtt)

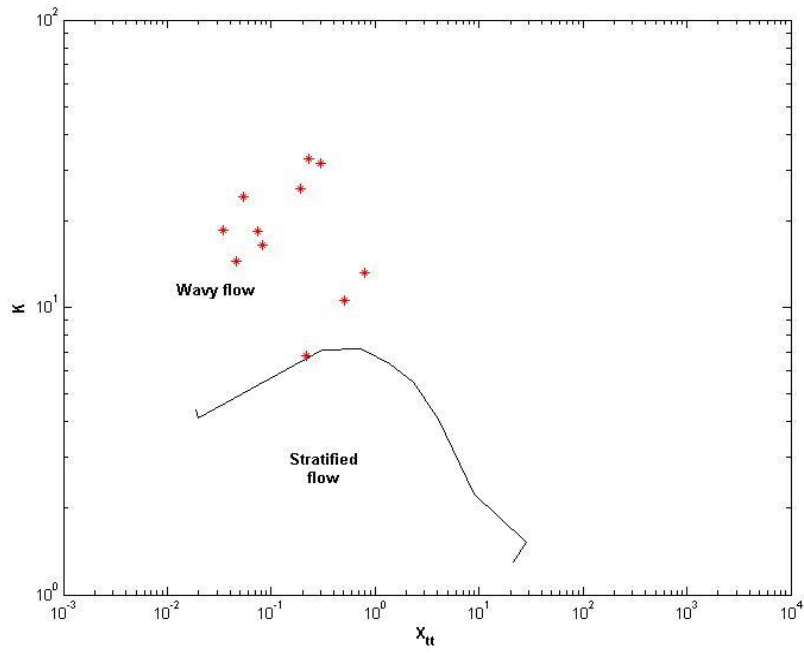


Fig. 25b. Flow-pattern map of Taitel and Yemada compared with experimental data (K, X_{tt})

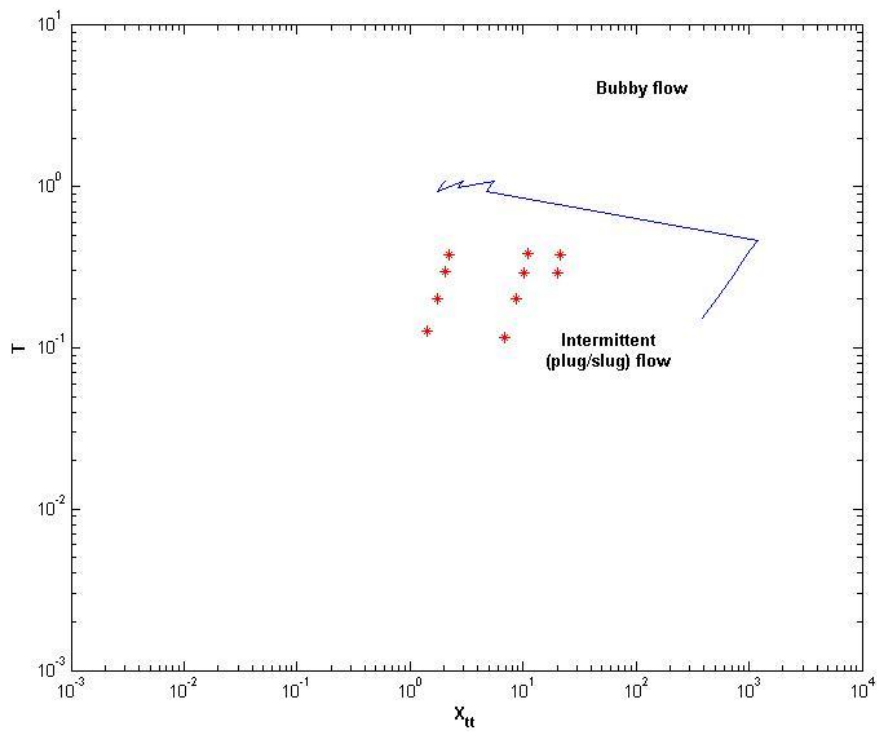


Fig. 25c. Flow-pattern map of Taitel and Yemada compared with experimental data (T, X_{tt})

	Q water [l/h]	Q air [l/h]	Flow pattern observed	Flow pattern maps
1	100	2734	Stratified with slow slug	Wavy flow
2	250	2723	Stratified with slug (faster)	Wavy flow
3	400	2738	Stratified with slug (faster)	Wavy flow
4	100	6720	As Run 3	Wavy flow
5	250	6720	As Run 3	Wavy flow
6	400	6720	Slug/annular wavy	Annular dispersed
7	100	13243	Annular intermittent/slug	Annular dispersed
8	250	13024	Annular wavy	Annular dispersed
9	400	13252	Annular wavy	Annular dispersed
10	600	274	Plug	Intermittent (plug/slug)
11	995	272	Plug/bubbly	Intermittent (plug/slug)
12	1516	274	Bubbly	Intermittent (plug/slug)
13	1989	272	Bubbly/dispersed	Intermittent (plug/slug)
14	538	1350	Intermittent	Intermittent (plug/slug)
15	992	1353	Intermittent	Intermittent (plug/slug)
16	1502	1357	Intermittent/bubbly	Intermittent (plug/slug)
17	2024	1351	Dispersed/bubbly	Intermittent (plug/slug)
18	660	2710	Slug	Annular dispersed
19	1017	2710	Slug-intermittent	Annular dispersed
20	1507	2703	Bubbly/intermittent	Intermittent (plug/slug)
21	1988	2680	Bubbly	Intermittent (plug/slug)
22	1115	6626	Slug-annular	Annular dispersed
23	1496	6626	Intermittent-bubbly	Annular dispersed
24	1988	6626	Annular-intermittent-bubbly	Annular dispersed
25	1155	12927	Annular-intermittent	Annular dispersed
26	1487	13024	Annular	Annular dispersed
27	2010	13100	Bubbly-intermittent	Annular dispersed
28	930	8053	Bubbly	Annular dispersed
29	1505	8064	Annular-intermittent	Annular dispersed
30	2007	8064	Bubbly-intermittent	Annular dispersed
31	1087	10602	Annular-intermittent	Annular dispersed
32	1499	10617	Annular-intermittent	Annular dispersed
33	2000	10602	Annular-intermittent	Annular dispersed
34	60	7546	Stratified	Wavy flow
35	100	7423	Stratified/slug	Wavy flow
36	340	7546	Slug	Wavy flow
37	60	9647	Stratified wavy/slug	Wavy flow
38	100	9815	Stratified wavy	Wavy flow
39	390	9815	Slug	Annular dispersed

Table 7. Comparison of the observed flow pattern with Taitel and Yemada map

5.4 ANALYSIS OF THE MAPS

By comparing the three maps plotted with the experimental data, it appears that in the Taitel and Yemada map most of the points fit quite well, so it could be considered the reference map, but further study should be carried out to decide which one is definitely better.

5.5 RESPONSE OF THE DEVICES

It should be remembered that in the two-phase experimental campaign the air flow rates range is between 0.0632 and 3.06 kg/s and the water flow rate range is between $1.67 \cdot 10^{-5}$ and $5.6 \cdot 10^{-4}$ kg/s.

As regards the response of the devices such as turbines or drag disks, *Figs. 26 and 28* show the signals of the turbine and the drag disk at different flow rates.

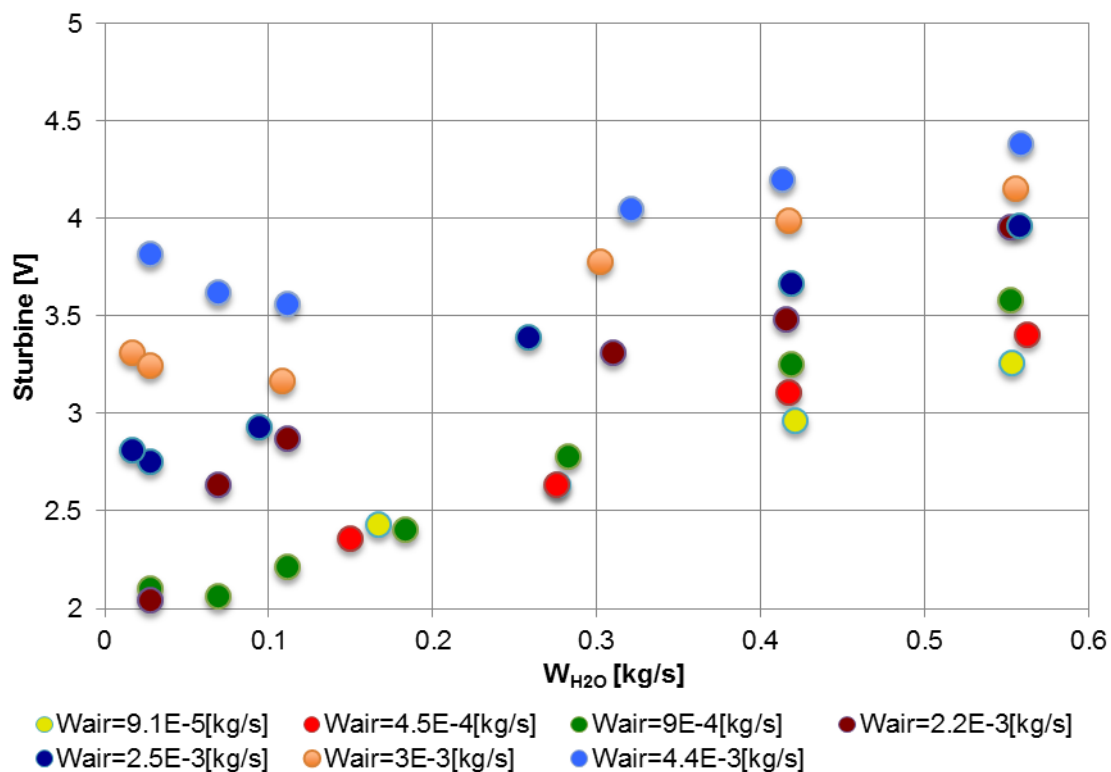


Fig. 26. Sturbine [V] vs. mass flow rate of water [kg/s], at different air mass flow rates [kg/s]

Fig. 26 shows that the response of the turbine depends on the percentage of air/water mass flow ratio, that is on the void fraction: a non-linear behaviour occurs at lower water flow rate or, in other words, the turbine has been designed to work at higher water flow rate. According to the *ANNEX*, the turbine is designed to work between $Q_{H_2O} = 900$ - 13600 l/h or $W_{H_2O} = 0.25$ - 3.8 kg/s. However, these values correspond to a water single-

phase flow and not to two-phase flow conditions. It is interesting to find a limit line that separates the linear and non-linear region in each case. Such water flow rate limit values are shown in the *Table 8*.

W_{air} [kg/s]	W_{H2O} limit [kg/s]
9,1E-5	-
4,5E-4	-
9.00E-04	0,05
2,2E-3	0,1
2,5E-3	0,15
3.00E-03	0,2
4,4E-3	0,2

Table 8. Linear and non-linear region of the turbine

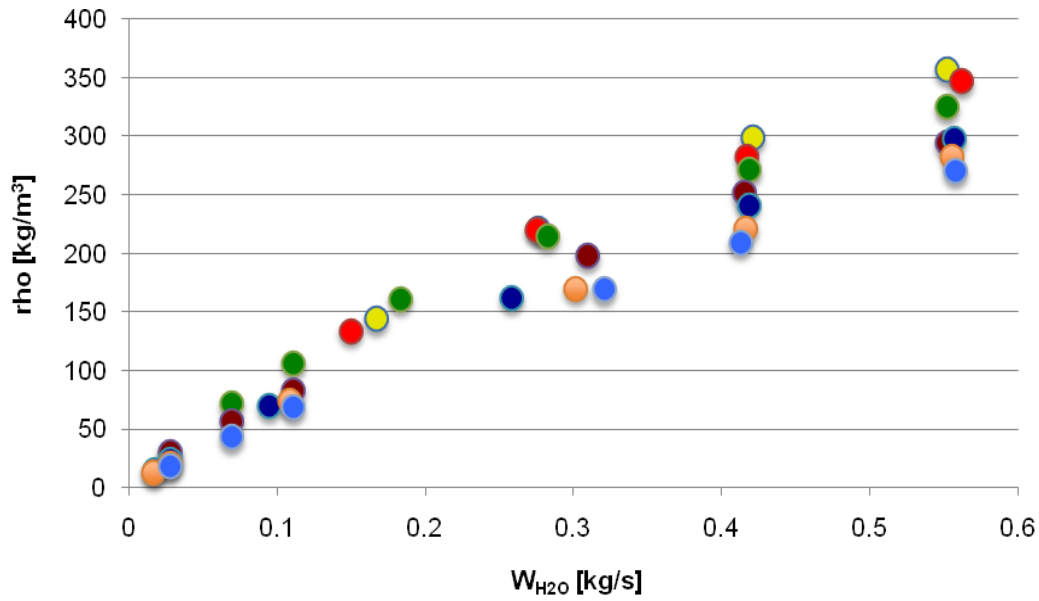
Inside the linear region, the response of the turbine in function of the water flow rate can be expressed as follows:

$$S_t = K_t \cdot Q_{TOT} = K_t \cdot \frac{W_{TOT}}{\rho_{TP}} = K_t \cdot \frac{(W_{air} + W_{H2O})}{\rho_{TP}}$$

and it is possible to calculate K_t for each group of points, taking in account that one of the characteristics of the turbine is that the K_t value must be constant.

In addition, it should be noticed that in the linear region at higher air flow rates, keeping constant the water flow rate, the response of the turbine is greater. This phenomenon is due to the difference of velocity between the two phases. The air has got much more velocity than the water inside the tube, so when there is more water its effect of slowing down the rotation of the turbine is higher than at lower water flow rate. So the response of the turbine depends on the flow pattern.

In *Fig. 27* the density of the mixture as a function of the water flow rate at different air flow rate is shown.

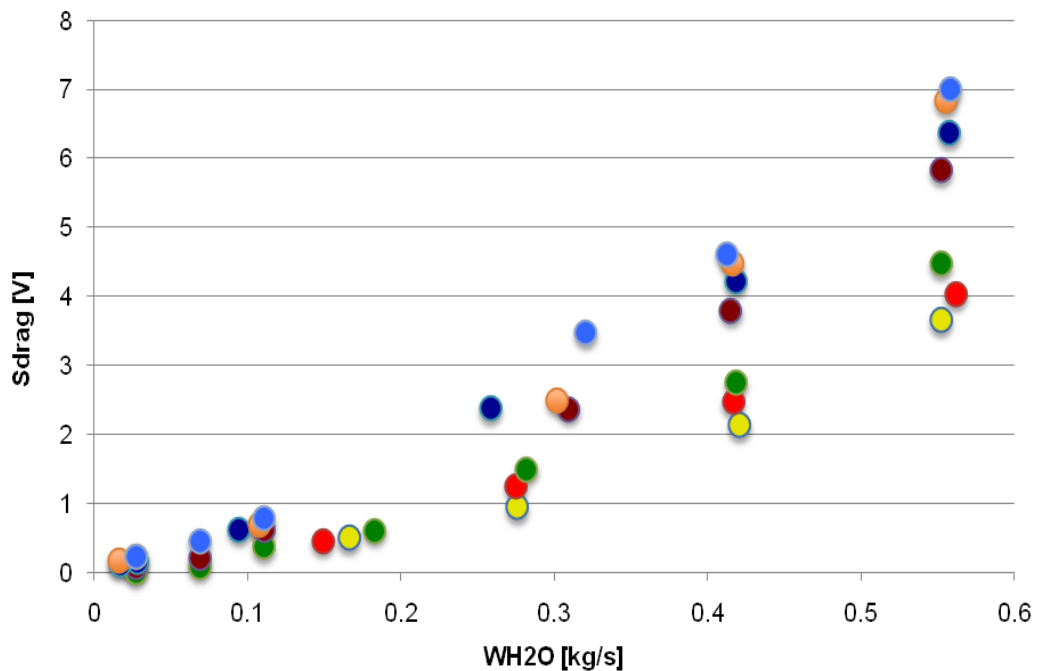


● Wair=9.1E-5[kg/s] ● Wair=4.5E-4[kg/s] ● Wair=9E-4[kg/s] ● Wair=2.2E-3[kg/s]
● Wair=2.5E-3[kg/s] ● Wair=3E-3[kg/s] ● Wair=4.4E-3[kg/s]

Fig. 27. Density of the mixture [kg/m³] vs. water flow rate [kg/s], at different air flow rates [kg/s]

Fig. 27 shows a linear behaviour of the density [kg/m³] as a function of the water flow rate so that at higher water flow rate, the density of the mixture is higher.

Concerning the drag disk response, the following graph (Fig. 28) can be obtained.



● Wair=9.1E-5[kg/s] ● Wair=4.5E-4[kg/s] ● Wair=9E-4[kg/s] ● Wair=2.2E-3[kg/s]
● Wair=2.5E-3[kg/s] ● Wair=3E-3[kg/s] ● Wair=4.4E-3[kg/s]

Fig. 28. Sdrag [V] vs. water flow rate [kg/s], at different air flow rates [kg/s]

The first difference, if compared with the turbine response, is that all points follow a quadratic regression that crosses the origin, that is consistent with the relation

$$S_d = K_d \cdot F = K_d \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A_d \cdot \rho \cdot V^2\right)$$

where the momentum flux is defined by

$$\rho \cdot V^2 = \alpha \cdot \rho_g \cdot V_g^2 + (1 - \alpha) \cdot \rho_l \cdot V_l^2$$

At higher air flow rate, the signal of the drag disk is higher, keeping constant water flow rate, although at low water flow rate a higher dispersion exists. However in the response of the drag disk, the velocity and the void fraction of each phase affect the signal of this device. By keeping constant the air flow rate, at higher water flow rate the difference between the responses of the signal is higher. If one looks at the highest water flow rate (≈ 0.55 kg/s) for the two extremes of W_{air} (≈ 0.0045 kg/s and 0.00009 kg/s) one finds that there is a multiplying factor of 50. While, at the lowest water flow rate ($\approx 0,02$ kg/s) although there is more or less the same multiplying factor between the two extremes of W_{air} , the water flow rate and therefore the velocity of water decreases about 27,5 times. In Fig. 29 the momentum flux is presented as a function of the water flow rate.

$$\rho \cdot V^2 = \alpha \cdot \rho_g \cdot V_g^2 + (1 - \alpha) \cdot \rho_l \cdot V_l^2$$

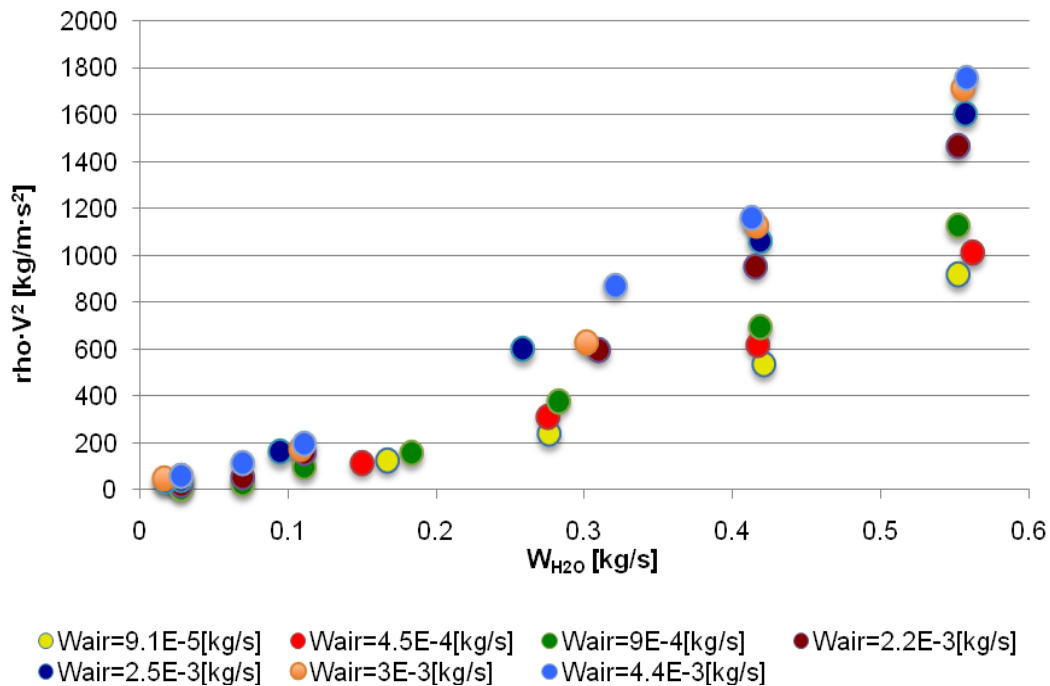


Fig. 29. ρV^2 [kg/m·s²] vs water flow rate [kg/s], at different air flow rates [kg/s]

As it can be seen a quadratic relation between the momentum flux and the water flow rate exists, that is consistent with the previous correlation.

5.6 VOID FRACTION

As regards the void fraction that can be obtained from the impedance probe signal, *Fig. 30* shows the void fraction vs. the water flow rate, at different air flow rate.

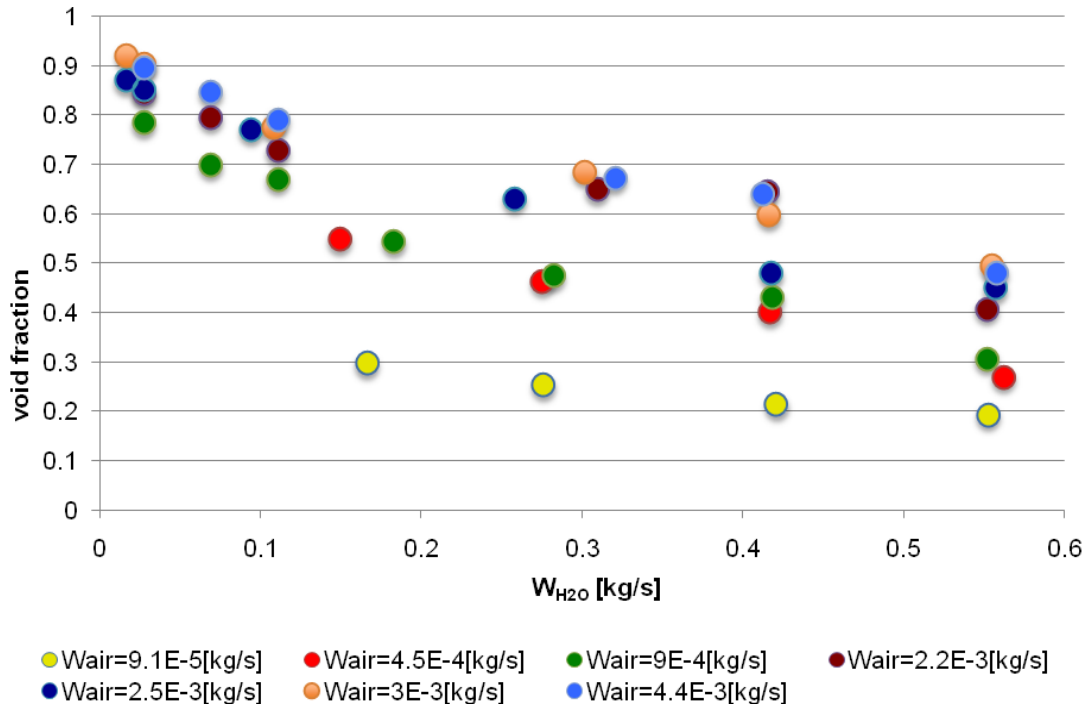


Fig. 30. Void fraction vs. water flow rate [kg/s], at different air flow rates[kg/s]

As it was expected, at higher water flow rate the void fraction is lower, keeping constant the air flow rate, that is consistent with the relation

$$\alpha_{volumetric} = \frac{V_G}{V_G + V_L}$$

It has to be stressed that it is difficult to have an accurate measure of this parameter, due to the calibration method of the quick-closing valves, when the flow pattern is intermittent (i.e. churn or slug), so it has unsteady properties and the mean void fraction is evaluated using a statistic approach. This fact can be observed at the highest air flow rate (blue points).

Fig. 31 presents the void fraction versus the flow quality.

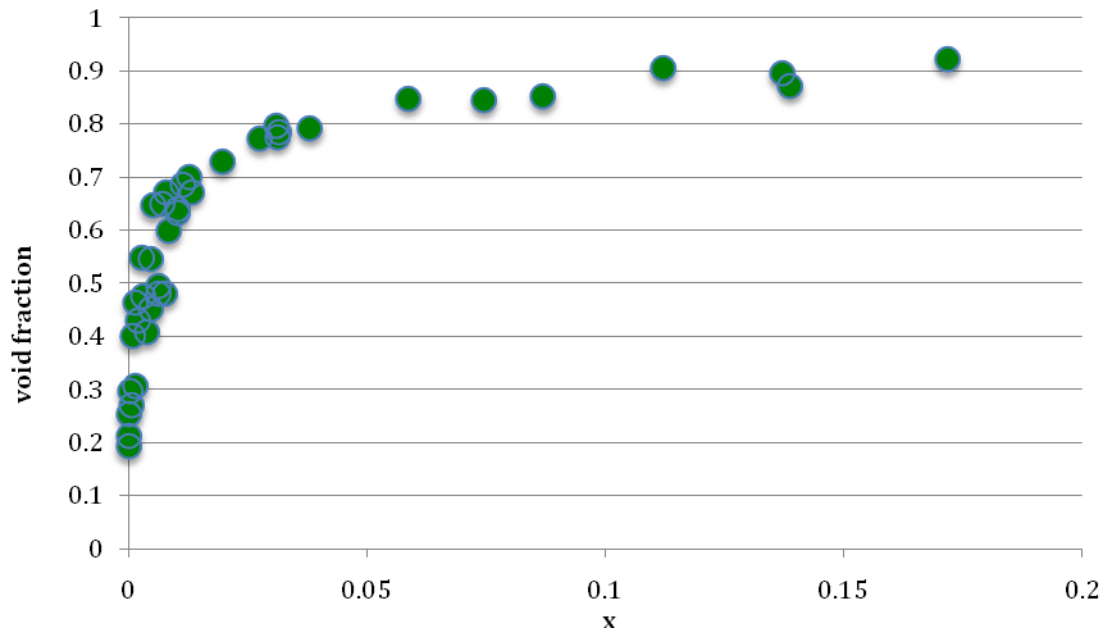


Fig. 31. Void fraction vs. flow quality

The experimental results have provided data points for $0.2 < \alpha < 0.9$. As superficial liquid velocity increases, the increase in liquid holdup causes the void fraction versus superficial gas velocity curves to shift lower. In *Fig. 31* bubble and slug flows correspond to low flow quality with void fraction range $0.2 < \alpha < 0.55$ and $0.45 < \alpha < 0.78$ respectively. Annular flow is in the high flow quality region with a void fraction of $0.7 < \alpha < 0.9$.

5.6 SPOOL PIECE MAPS

The spool piece maps (Figs. 32, 33 and 34) present the correlation between the electrical signal of the turbine, drag disk and impedance probe and the void fraction.

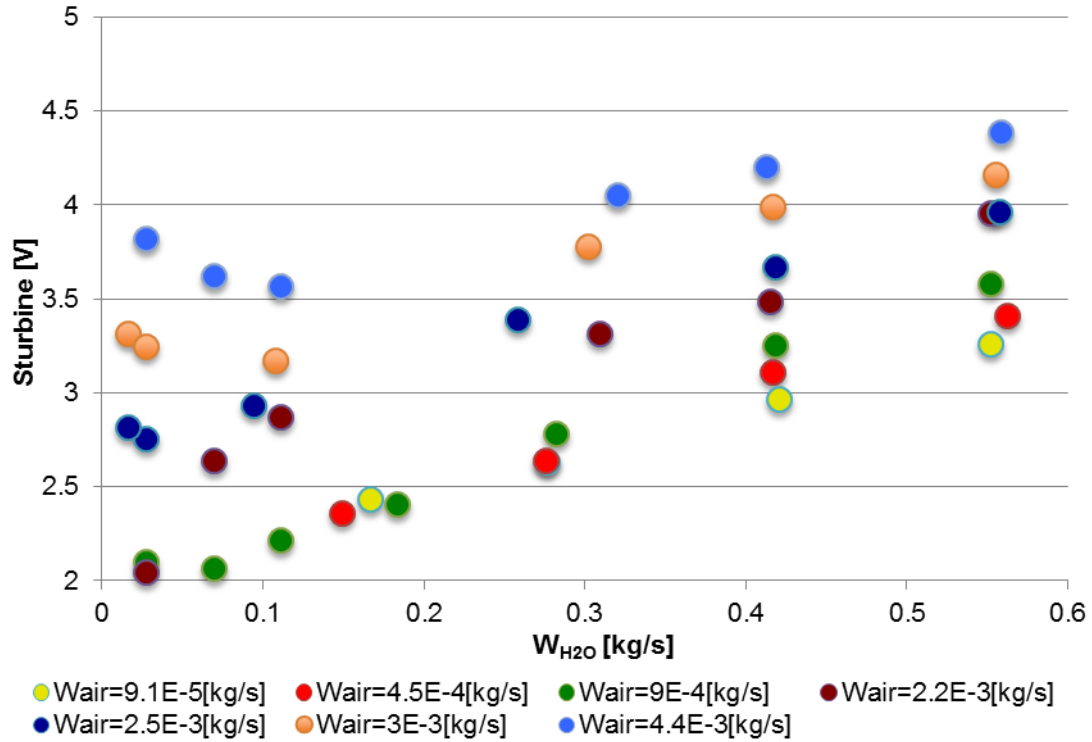


Fig. 32. Sturbine [V] vs W_{H2O} [kg/s]

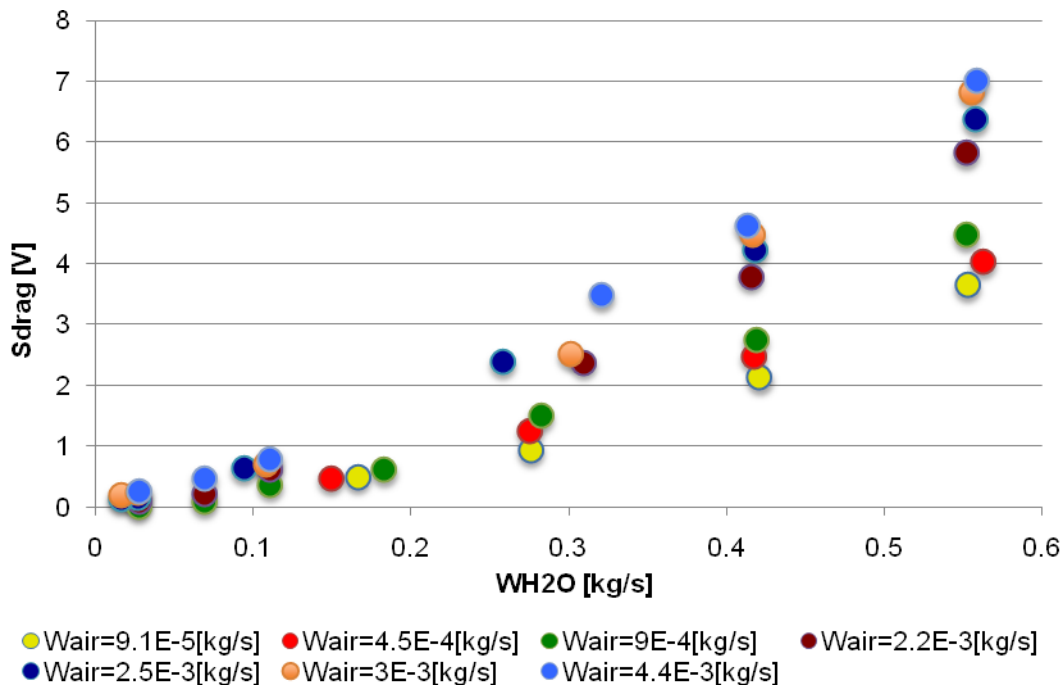


Fig. 33. Sdrag [V] vs W_{H2O} [kg/s]

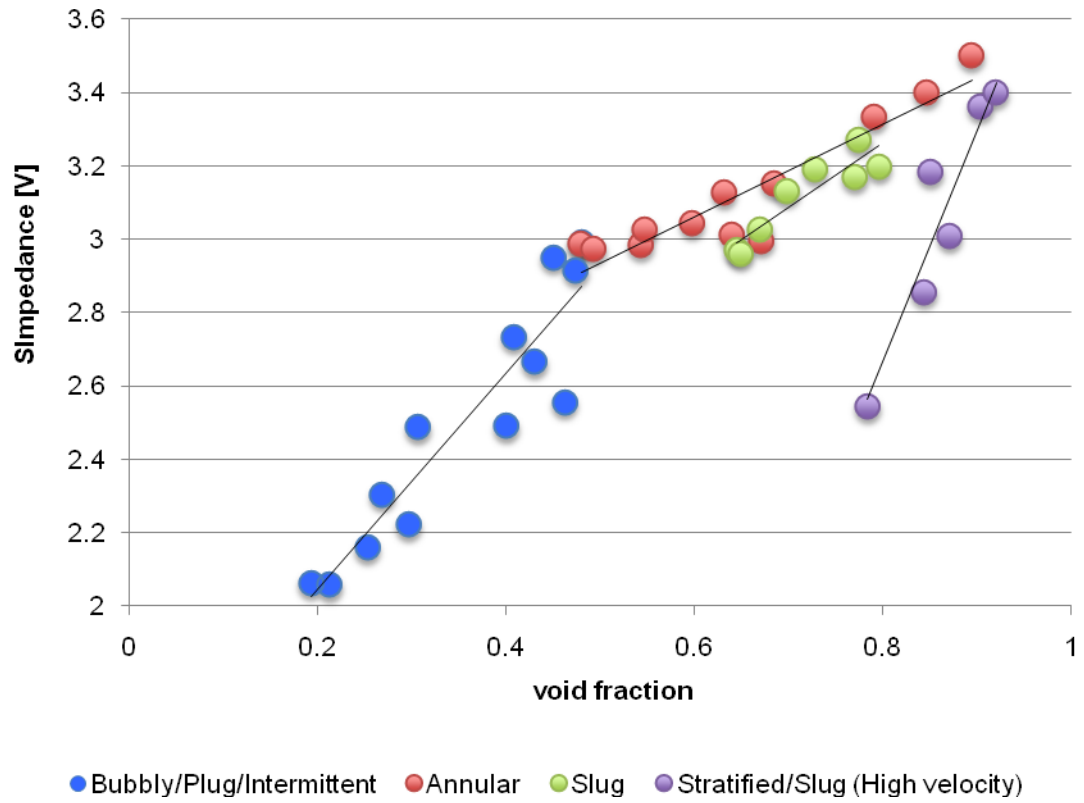


Fig. 34. Simpedance [V] vs. Alpha (void fraction)

5.7 AYA's MODEL

The AYA's model has been used to calculate the mass flow rate and other parameters of two-phase flows. The theoretical model is based on the assumptions concerning the characteristics of a drag disk and a turbine meter. That model has been used to analyse the data.

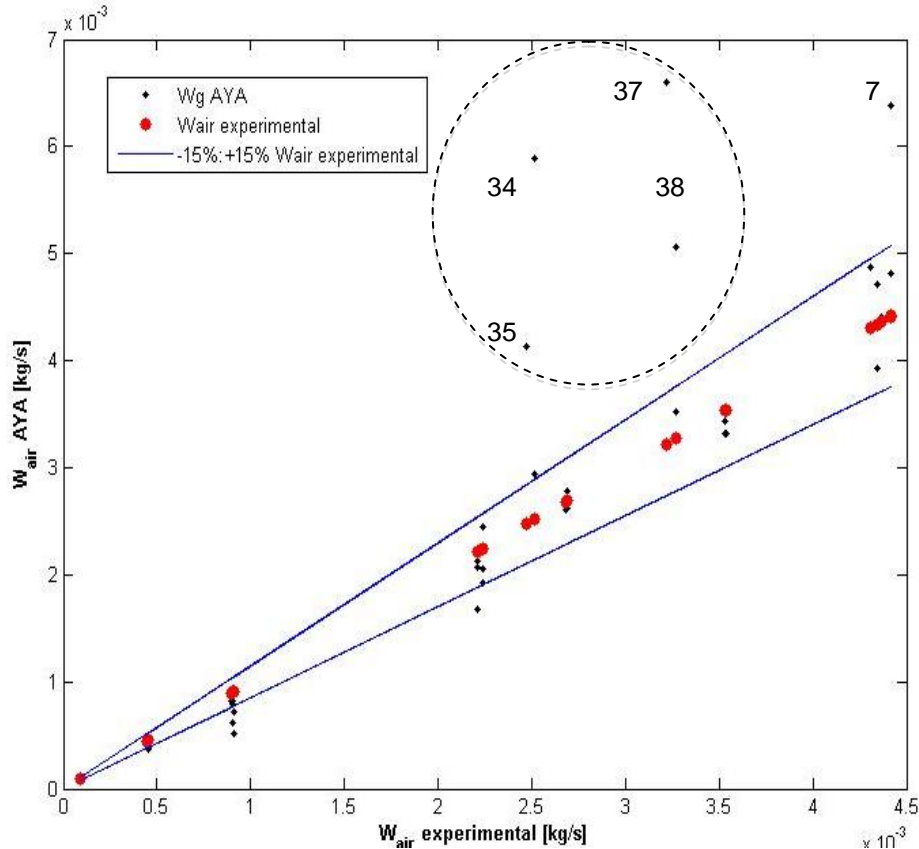


Fig. 35. Experimental Wair vs. AYA's model Wair

Fig. 35 shows that most of the points calculated with the AYA's model are in the range of 15 % of error, which means that the data has been obtained correctly. However, some points are outside that range: as the group of circled points was measured the same day, it was something wrong during the experiment, likely due to some problems in the laboratory air network.

Fig. 36 shows the water mass flow rate predicted by the Aya's model versus the experimental values.

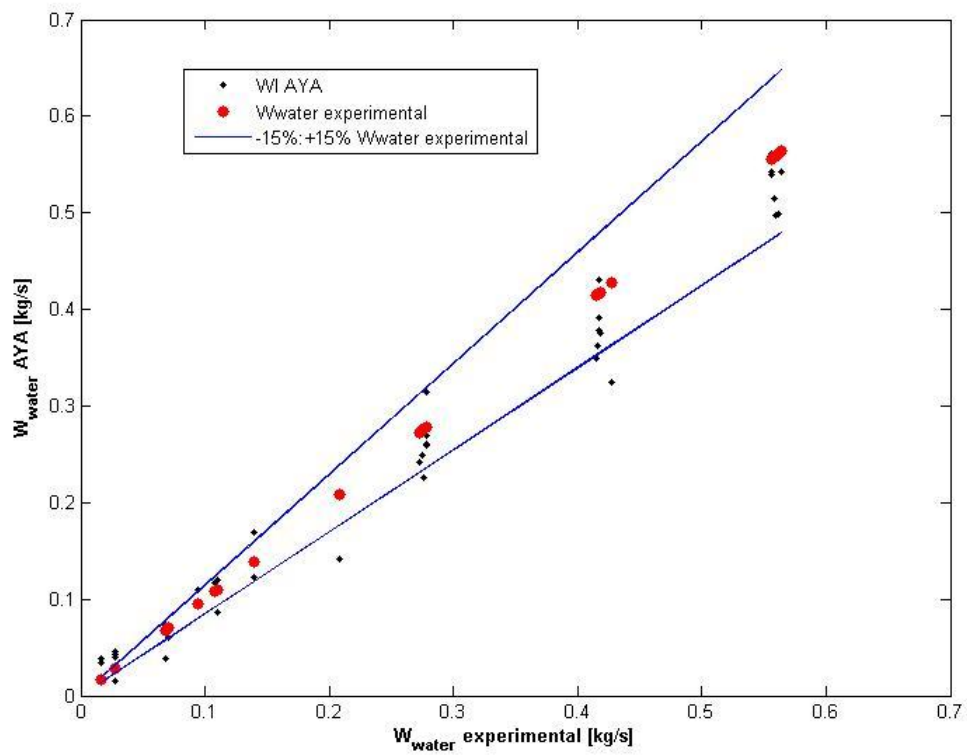


Fig. 36. Experimental W_{water} vs. AYA's model W_{water}

Most of the points calculated with AYA's model are in the range of 15 % of error.

CONCLUSIONS

The aim of this study is the experimental and theoretical analysis of horizontal air-water flow using a Spool Piece consisting of a turbine, a drag disk and an impedance probe; the pressure and the temperature have also been measured.

The experimental data have been used to set up an operating map of the Spool Piece, able to evaluate the mass flow rates of the phases in the mixture and the relative errors, and to predict the flow pattern and other parameters that are important to characterise the flow.

The quite wide range of both air and water flow rates has allowed to get enough information about parameters such as the pressure, the pressure drops, the responses of three devices (turbine, drag disk and impedance probe) and about the signal interpretation, the void fraction and flow pattern depending on mass flow rates.

The insertion of the impedance probe, calibrated under the tested conditions, allows to get the value of the void fraction and avoids to perform the corrections of the electric signals of the Spool Piece to take into account the pressure effects, as it has been made in the previous work (M. De Salve, G. Monni, B. Panella (2010)).

The observed flow patterns have been compared with the flow pattern maps and a possible methodology for the interpretation of the response of the impedance probe as function of the flow pattern has been proposed.

The existence of a non-linear region in the response of the turbine with single phase flow at low water flow rate has been shown; by extending the measurement range in the non-linear region, in two-phase flow, a different behavior and performance of the Spool Piece has been noticed. Also, high frictional torques in the turbine rotor reduce the measurement range of the Spool Piece. The study of the turbine performance close the non-linear region is needed in order to improve the knowledge of the response of the device.

The present analysis highlighted the strong influence of the electronics of the instruments in the behaviour of the Spool Piece; in particular, considerable differences have been marked in the response of the turbine flow meter, using analog signal conditioning (M. De Salve, G. Monni, B. Panella (2010)) or digital signal conditioning (present work).

In any case, the Spool Piece Map allows to obtain the mass flow rate of the phases and is useful in two-phase flow applications.

BIBLIOGRAPHY

- S. S. Agrawal, G. A. Gregory, and G. W. Govier. An analysis of horizontal stratified two phase flow in pipes. 1973.
- A. Achilli, M. Greco. Two-phase flow measurement for SPES3 facility: spool piece mathematical correlations.
- Aya I. A Model to Calculate Mass flow rates and Other quantities of Two phase flow in a Pipe with a densitometer, a drag disc, and a turbine meter, ORNL TM-47591, 1975.
- O. Baker. Design of pipe lines for simultaneous flow of oil and gas. Oil and Gas J., 53:185–190, 1954.
- N.C.J. Chen and D. K. Felde. Two-Phase Mass Flux Uncertainty Analysis for Thermal-Hydraulic Test Facility Instrumented Spool Pieces, 1982.
- D. Chisholm. Two-phase flow in pipelines and heat exchangers.
- D. Chisholm. Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels. Int. J. Heat Mass Transfer, 1973.
- J. G. Collier and J. R. Thome. Convective boiling and condensation. Oxford University Press, Oxford, 1984.
- D. B. Collins and M. Gacesa, Measurement of Steam Quality in Two-Phase Upflow with *Venturimeters and Orifice Plates*, Trans. ASME, J. Basic Eng. 3, 11-21 (1971).
- M. De Salve, G. Monni, B. Panella. Analisi delle prestazioni di uno *Spool Piece* in deflusso orizzontale bifase aria-acqua . SPOOL PIECE costituito da TURBINA e DRAG DISK. Report ENEA Luglio 2011
- J. Dies. Física de los reactores nucleares.
- A. E. Dukler, Moye Wick III, and R. G. Cleveland. Frictional pressure drop in two-phase flow: an approach through similarity analysis. AIChE Journal, 1964.
- G.W. Govier, and K. Aziz, "The Flow of Complex Mixtures in Pipes," Van Nostrand Reinhold, New York, 1972.
- L. Friedel. Improved friction drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow. *Paper E2*, Ispra, Italy, 1979.
- L. Friedel. Pressure drop during gas/vapor-liquid flow in pipes. Int. Chemical Engineering, 1980.
- M. Furrer, Strumentazione, metodi ed analisi impiegati per la misura della portata in massa in regime bifase, Rapporto ENEA NQCM 1TS4B 86038, Maggio 1986
- J.E. Hardy (1982), *Mass flow measurements under PWR reflood conditions in downcomer and at a core barrel vent valve location*, NUREG/CR-2710
- G. Hetsroni (1982), *Handbook of multiphase systems*, McGraw-Hill Book Co
- C.S. Hoogendorn, "Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes," 1959.
- S. Kamath and R.T Lahey (1980), *A turbine-meter evaluation model for two phase transient*, Journal of Heat Transfer.
- S.I. Kosterin, "An Investigation of the Influence of Diameter and Inclination of a Tube on the Hydraulic Resistance and Flow Structure of Gas-Liquid Mixtures," Izvest. Akad, Nauk. USSR, , 1949.

- R. W. Lockhart and R. C. Martinelli. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component in pipes. Chem. Eng. Process, 1949.
- G. Monni. State of art and selection of techniques in multiphase flow measurements. 2010.
- Jesus Moreno Quiben. Experimental and analytical study of two-phase pressure drops during evaporation in horizontal tubes.
- J.M. Mandhane, G.A. Gregory and K. Aziz. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes.
- J. W. Murdock, *Two-Phase Flow Measurement with Orifices*, Trans. ASME, J. Basic Eng. 84, 419-33 (1962).
- M. K. Nicholson, K. Aziz, and G. A. Gregory. Intermittent two-phase flow in horizontal pipes: Predictive methods. Can. J. Chem. Eng., 1978.
- Porteous A. Prediction of the upper limit of the slug flow regimes., 1969.
- Nick A. Radovcich, Raphael Moissis. The transition from two phase bubble flow to slug flow. 1962.
- S.Z. Rouhani, *Application of the Turbine Type Flowmeters in Measurement of Steam Quality and Void*, RPL-683, AB Atomenergi, Studvik (September 1963).
- S. Z. Rouhani and E. Axelsson. Calculation of void volume fraction in the subcooled and quality boiling regions. Int. J. Heat Mass Transfer, 1970.
- S.Z. Rouhani and M.S. Sohel, "Two-Phase Flow Pattern: A Review of Research Result," Progress in Nuclear Energy, 1983.
- T. W. F. Russel, A. W. Etchells, R. H. Jensen, and P. J. Arruda. Pressure drop and holdup in stratified gas-liquid flow. AIChE Journal, 1974.
- C.W. Solbrig, J. Reimann (1980), *Behaviour of a drag disk turbine transducers in steady-state two phase flow*. IEEE Transactions on Nuclear Science
- X. Sun, S. Kuran, M. Ishii. Bubbly-to-slug flow regime transition in a vertical annulus. Experiments in Fluids 37 (2004).
- Y. Taitel and A. E. Dukler. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE Journal, 1976.
- Y. Taitel and A. E. Dukler. A theoretical approach to the Lockhart-Martinelli correlation for stratified flow. Int. J. Multiphase Flow, 1976.
- T. N. Tandon, H. K. Varma, and Gupta C. P. A void fraction model for annular two-phase flow. Int. J. Heat Mass Transfer, 1985.
- J. R. S, Thom (1964), *Prediction of Pressure Drop During Forced Circulation Boiling of Water*, Int. J. Heat Mass Transfer 2, 709-24 .
- J. R. Thome and J. el Hajal. Two-phase flow pattern map for evaporation in horizontal tubes, 2002.
- K.C. Turnage and P.A. Jallouck. Advanced two-phase instrumentation program quarterly progress report for April-June 1978.
- Wael H. Ahmed. Capacitance sensors for void-fraction measurements and flow pattern identification in air oil two-phase flow.
- G. B. Wallis. Annular two-phase flow. J. Basic Engineering, 1970.

J. Weisman and S.Y. Kang, "Flow Pattern Transitions in Vertical and Upwardly Inclined Lines," , 1981.

Annex

A.1. Turbine. Equipment application sheet

H **HOFFER FLOW CONTROLS, INC.**
The Turbine Flowmeter Company™

107 Kitty Hawk Lane • P.O. Box 2145 • Elizabeth City, North Carolina 27906-2145
 1-800-628-4584 • (252) 331-1997 • FAX (252) 331-2886

EQUIPMENT APPLICATION SHEET Page ___ of ___

Customer: S.M.E.R.I. Date: 5-19-10
 Purchase Order: HO/293/2010 Job No.: 59926
 Product: Water Flow Range: _____ to _____
 Temp. Range: _____ to _____ Pressure Range: _____ to _____

Flowmeter: HO1X1-4-60-C-1MX310-MS-CE S/N: 133794
 Flow Range: 3.998 to 60.172 GPM K'Factor: 843.01 Pulses/Gal

Electronics Model: CAT1-1-7-D-CE S/N: 133796
 Input Pwr.: 8-24 VDC Fuse: _____ Output Pwr.: _____
 Dwg. Number(s): _____

K-Factor of Metering System: 843.01 Pulses / Gal
 F(Max) = 841.8 Hz at 60 GPM Offset Freq. _____
 S.F.: _____ S.F. Mwpl: _____ Totalizer Units: _____
 Flow Rate Units: GPM Range Select: _____ Dec. Pos.: _____
 Pulse Output: _____ Duration: _____ Pulse Scaling: _____
 Pulse Output K'Factor: [900 e/n - 135000 e/n] Time Base: _____
 Analog Span: 4 ma = 4 GPM to 20 ma = 60 GPM 1 GPM = 0

Hi Alarm Set Point: _____ Low Alarm Setpoint: _____
 Pressure Excitation: _____ Pressure Span: _____ to _____ 1300
 Pressure Range: _____ to _____ Full Scale Pressure: _____
 Temperature Excitation: _____ Temperature Span: _____ to _____
 Temperature Range: _____ to _____ Full Scale Temperature: _____
 Pipe Diameter: _____ Inner Diameter: _____ Schedule: _____
 Positioning: Centerline _____ Critical _____ Insertion Depth _____
 Obstruction Factor: _____ Profile Factor(Centerline) [K2.9]

H OFFER FLOW CONTROLS, INC. The Turbine Flowmeter Company™

107 Kitty Hawk Lane • P.O. Box 2145 • Elizabeth City, North Carolina 27906-2145
1-800-628-4584 • (252) 331-1997 • FAX (252) 331-2886



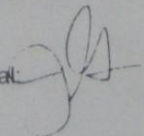
Flowmeter Calibration Report

Model:	HO1X1-4-60-C-1MX3/O-MS-CE	Date:	5/18/2010	Stand	3
Customer:	S.M.E.R.I. SRL	Fluid:	WATER		
Account:	2098	Test range (gpm):	3.998 to 60.172		
Cust. PO:	HO/293/2010	Linearity (%):	+/- 0.14		
Job Number:	59926	K' Average (pulses/gal)	843.010		
Meter S/N:	133794				
Coil:	PC13-74S 130MV				

	Frequency Hz	Flowrate GPM	Roshko # Hz/cSt 70F	Strouhal # pul/gal 70F	Fluid Temp Deg. F	Kin. Visc. cSt
1	56.133	3.998	57.396	842.411	73.736	0.978
2	56.161	4.000	57.424	842.411	73.723	0.978
3	101.244	7.198	103.676	843.984	73.829	0.977
4	141.975	10.092	147.641	844.179	74.922	0.962
5	214.509	15.255	224.179	843.828	75.275	0.957
6	282.174	20.089	294.725	842.887	75.234	0.958
7	348.951	24.831	366.240	843.320	75.579	0.953
8	425.022	30.234	447.469	843.596	75.801	0.950
9	566.107	40.307	596.356	842.818	75.843	0.949
10	704.045	50.186	739.846	841.856	75.668	0.952
11	844.238	60.171	855.874	841.841	75.557	0.953
12	844.254	60.172	883.111	841.841	75.315	0.956

We certify that all test equipment used in calibrations are traceable to NIST,
and that our quality assurance system is certified to ISO 9001-2008.

Operator: MRR

Final Approval: 

A.3. Drag disk. Equipment application sheet

Ramapo TARGET E

Tab. 3 Continuazione
 RAMAPO INSTRUMENT CO., INC. • MONTVILLE, N.J. 07045 • (201) 263-8800 • TELEX: 13-8892

DATA SHEET
 Mark W Flow Meter

CUSTOMER Techmark Corporation for DATE 10/24/85
 REFERENCE P.O.No. TME-1257-F-RPO
 MODEL Mark V-1-SJRUX SERIAL NO. 31195 SIZE 1"
 MATERIALS: Sensing Element Inconel X-750 Seal Grafoil
 Housing T304 S.S. Flange _____ Target T303 S.S.
 LINE CONNECTIONS Threaded Pipe Housing 1" MNPT
 NATURAL FREQUENCY (in air) 125 Hz; TARGET TYPE* ACR-484 E
 VISCOSITY AT CALIBRATION 1.0 cps SPECIFIC GRAVITY 1.00
 FLOW RANGE 30 - 300 Liters/Minute FLUID Water
 REYNOLDS NO. (R_D) RANGE, AT CALIBRATION 30,747 - 307,470
 PRESSURE RATING 5000 psi Maximum Pressure Sensing Element
Element #RU-59642
Schedule 160
 TEMPERATURE RANGE - 65 to + 650 °F
 BRIDGE RESISTANCE, Input 353.5 ohms, Output 353.5 ohms.
 FORCE FACTOR 0.595 mV/l/kg
 EXCITATION VOLTAGE Recommended 7½ Maximum 15 Volts AC or DC
 FULL SCALE OUTPUT; standard piping (see "Installation")
2.012 Millivolts/Volt Excitation at 300 Liters/Minute
 @ 70°F
 FULL SCALE OUTPUT; short straight run
 _____ Millivolts/Volt Excitation at _____, with
 straight run pipe diameters _____ upstream, _____ downstream
 Calibration Resistor _____ ohms across Pins A - 3 (or 1 - 2)
 yields an output signal of _____ mV/V
 Accuracy ½ % of full scale
 Data based on: () force calibration, (X) flow calibration

ELECTRICAL CONNECTIONS:
 Terminals B or 2 --- Bridge Output (+)
 A or 1 --- Bridge Excitation (+) C or 3 --- Bridge Output (-)
 D or 4 --- Bridge Excitation (-) E or 5 --- Case Ground

ZERO SHIFT TEMPERATURE EFFECT SPAN

75°F - 650°F = +.015 mV/V 75°F to 650°F = -.15% ±.1%/100°F

*Target type number is its diameter in thousandths of an inch. Final Acceptance Arthur P. Phog

A.4. Experimental matrix

	W_{H_2O} [kg/s]	W_{air} [kg/s]	x [-]	α [-]	Sturb. [V]	Sdrag [V]	SImp [V]	Pabs [bar]	Dp [mbar]
1	2.78E-02	9.11E-04	3.18E-02	0.784	2.102	0.016	2.543	1.032	1.686
2	6.94E-02	9.08E-04	1.29E-02	0.699	2.065	0.095	3.129	1.028	5.626
3	1.11E-01	9.13E-04	8.15E-03	0.670	2.216	0.377	3.028	1.111	8.933
4	2.78E-02	2.24E-03	7.46E-02	0.844	2.045	0.085	2.856	1.053	2.685
5	6.94E-02	2.24E-03	3.12E-02	0.796	2.635	0.212	3.197	1.066	7.323
6	1.11E-01	2.24E-03	1.98E-02	0.728	2.870	0.628	3.190	1.182	14.227
7	2.78E-02	4.41E-03	1.37E-01	0.894	3.822	0.242	3.500	1.079	5.000
8	6.94E-02	4.34E-03	5.88E-02	0.847	3.623	0.465	3.399	1.134	12.265
9	1.11E-01	4.42E-03	3.82E-02	0.791	3.566	0.788	3.333	1.197	21.585
10	1.67E-01	9.14E-05	5.48E-04	0.296	2.432	0.504	2.221	1.449	3.932
11	2.76E-01	9.08E-05	3.29E-04	0.253	2.633	0.945	2.159	1.503	8.281
12	4.21E-01	9.12E-05	2.16E-04	0.213	2.965	2.132	2.057	1.698	18.075
13	5.53E-01	9.08E-05	1.64E-04	0.193	3.260	3.651	2.062	1.901	27.577
14	1.50E-01	4.50E-04	3.00E-03	0.548	2.361	0.465	3.026	1.357	8.460
15	2.76E-01	4.51E-04	1.63E-03	0.462	2.636	1.253	2.555	1.494	15.649
16	4.17E-01	4.52E-04	1.08E-03	0.400	3.109	2.473	2.490	1.720	25.004
17	5.62E-01	4.50E-04	8.01E-04	0.269	3.407	4.030	2.303	1.987	33.477
18	1.83E-01	9.03E-04	4.91E-03	0.544	2.407	0.616	2.984	1.373	14.578
19	2.83E-01	9.03E-04	3.19E-03	0.474	2.779	1.504	2.914	1.527	25.418
20	4.19E-01	9.01E-04	2.15E-03	0.430	3.255	2.751	2.665	1.728	28.627
21	5.52E-01	8.93E-04	1.62E-03	0.306	3.579	4.475	2.486	2.037	44.731
22	3.10E-01	2.21E-03	7.10E-03	0.649	3.312	2.371	2.959	1.684	33.081
23	4.15E-01	2.21E-03	5.29E-03	0.645	3.486	3.791	2.972	1.931	87.220
24	5.52E-01	2.21E-03	3.98E-03	0.408	3.957	5.823	2.733	2.339	101.767
25	3.21E-01	4.31E-03	1.33E-02	0.671	4.051	3.481	2.996	1.908	73.576
26	4.13E-01	4.34E-03	1.04E-02	0.639	4.199	4.618	3.014	2.202	109.150
27	5.58E-01	4.37E-03	7.76E-03	0.480	4.386	6.996	2.990	2.708	157.962
28	2.58E-01	2.68E-03	1.03E-02	0.631	3.391	2.385	3.128	1.670	39.405
29	4.18E-01	2.69E-03	6.39E-03	0.480	3.668	4.226	2.988	2.054	96.690
30	5.58E-01	2.69E-03	4.80E-03	0.450	3.961	6.372	2.950	2.432	119.305
31	3.02E-01	3.53E-03	1.16E-02	0.685	3.777	2.504	3.151	1.716	53.609
32	4.17E-01	3.54E-03	8.43E-03	0.597	3.991	4.481	3.044	2.143	109.928
33	5.56E-01	3.53E-03	6.32E-03	0.494	4.158	6.825	2.975	2.609	148.212
34	1.67E-02	2.52E-03	1.39E-01	0.870	2.815	0.136	3.009	1.194	0.280
35	2.78E-02	2.47E-03	8.71E-02	0.851	2.756	0.164	3.182	1.198	1.682
36	9.44E-02	2.52E-03	2.77E-02	0.771	2.929	0.634	3.169	1.296	16.447
37	1.67E-02	3.22E-03	1.72E-01	0.920	3.310	0.182	3.400	1.195	0.966
38	2.78E-02	3.27E-03	1.12E-01	0.904	3.245	0.225	3.362	1.195	2.803
39	1.08E-01	3.27E-03	3.14E-02	0.775	3.170	0.693	3.269	1.299	17.226