

Modellazione di uno Spool Piece per la Stima dei Parametri Caratteristici dei Deflussi Bifase

M. Caramello, M. De Salve, G. Monni, B. Panella - CIRTEN POLITP

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Felice De Rosa

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare

POLITECNICO DI TORINO



Modellazione di uno Spool Piece per la Stima dei Parametri Caratteristici dei Deflussi Bifase

Autori

Marco Caramello

Mario De Salve

Grazia Monni

Bruno Panella

CERSE-POLITO RL 1568/2014

Torino, Settembre 2014

Lavoro svolto in esecuzione dell'Attività LP1. C-2.2
AdP MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico - Piano Annuale di Realizzazione 2013
Progetto B.3.1 "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e
collaborazione ai programmi internazionali per i nucleare di IV generazione".

Indice

Sommario

1. Introduzione
2. Deflussi bifase: parametri caratteristici e misurabilità degli stessi
3. Circuiti sperimentali e strumentazione per la caratterizzazione degli spool pieces
 - 3.1 Sezione di prova verticale
 - 3.1.1 Sonde a impedenza per la misura della frazione di vuoto
 - 3.2 Sezioni di prova orizzontali
 - 3.3 Sistema acquisizione dati
 - 3.4 Calibrazioni in monofase e matrici sperimentali
 - 3.4.1 Calibrazione statica monofase della sonda a impedenza
 - 3.5 Procedura di prova e matrice sperimentale
4. Misura della portata in bifase con i tubi di Venturi (Venturi flow meter)
 - 4.1 Cadute di pressione nei tubi di Venturi
 - 4.2 Modelli di un tubo di Venturi in bifase
5. Modello di un tubo di Venturi con deflusso a fasi separate con misura della frazione di vuoto a monte e nella gola
6. Modello del Venturi in annular flow con misura dello spessore del film
7. Modello di un Venturi secondo Cadalen-Lance [25] con misura della frazione di vuoto nella gola
8. Sensori e tecniche tomografiche per la misura della frazione di vuoto e/o densità
 - 8.1 Tomografia ad impedenza elettrica capacitiva : ECT Method
9. Risultati sperimentali: analisi e confronto con i modelli
 - 9.1 Definizione di un modello semiempirico per la stima delle portate
 - 9.2 Risultati sperimentali e loro analisi
 - 9.3 Confronto dei risultati con la configurazione verticale
 - 9.4 Analisi del comportamento del Venturi in deflusso bifase
 - 9.5 Analisi del comportamento della sonda ECP in deflusso bifase orizzontale
 - 9.5.1 Elettrodi esterni
 - 9.5.2 Elettrodo centrale
 - 9.6 Confronto del comportamento della sonda ECP in deflusso bifase orizzontale e verticale
10. Conclusioni
11. Bibliografia

Allegati

Indice tabelle

- Tab. 1 Valori massimi e minimi dei parametri termoidraulici a valle della generica rottura in SPES3
- Tab. 2 Dati caratteristici delle sonde ad impedenza realizzate da SIET
- Tab. 3 Codici numerici per l'identificazione della coppia degli elettrodi oggetto del processo di misura
- Tab. 4 Leggi di conversione dei segnali elettrici in grandezze fisiche: circuito con sezione di prova orizzontale (2014)
- Tab. 5 Caratteristiche del Venturi
- Tab. 6 Segnali elettrici generati dalle catene di misura nel corso del processo di messa a punto in monofase
- Tab. 7 Grandezze fisiche valutate nel corso delle prove in monofase con sola aria
- Tab. 8a Matrice sperimentale delle prove in bifase (prima serie)
- Tab. 8b Matrice sperimentale delle prove in bifase (seconda serie)
- Tab. 9 Dati caratteristici di tubi di Venturi sperimentati in bifase
- Tab. 10 Correlazioni per la stima della densità di una miscela bifase
- Tab.11 Correlazioni per il fattore di correzione della portata bifase nei dispositivi a strozzamento
- Tab.12a Grandezze fisiche per le prove sperimentali (prima serie)
- Tab.12b Grandezze fisiche per le prove sperimentali (seconda serie)
- Tab.13 Portate medie in massa di aria realizzate e loro variazione percentuale
- Tab.14 Influenza della portata della fase liquida per $f=30$ sulle pressioni differenziali misurate con il Venturi
- Tab. 15a Matrice delle prove sperimentali (prima serie): grandezze elaborate
- Tab.15b Matrice delle prove sperimentali (seconda serie): grandezze elaborate
- Tab.16 Coefficienti empirici per la correlazione (9.7)

Indice figure

- Fig. 1a,b Schema della sezione di prova verticale con installata la sonda ad impedenza SIET (a) Sezione di prova verticale per la caratterizzazione della sonda ad impedenza ed il Venturi reversibile (b).
- Fig. 2 Schema del circuito di prova con sezione di prova verticale.
- Fig. 3 Sezione della sonda SIET con numerazione degli elettrodi.
- Fig. 4 Sezione di prova orizzontale ($D=80$ mm) con sonda ad impedenza SIET e Venturi reversibile.
- Fig. 5 Sonda ad impedenza della SIET disposta nella configurazione orizzontale.
- Fig. 6 Tubo di Venturi reversibile nella configurazione orizzontale.
- Fig. 7 Sistema di scarico del deflusso a valle del tubo di Venturi (configurazione orizzontale).
- Fig. 8 C
ircuito con sezione di prova orizzontale.
- Fig. 9 Taratura monofase con aria del Venturi.
- Fig. 10 Coefficiente di efflusso monofase con aria del Venturi.
- Fig 11a Pressioni differenziali misurate nell'orifizio e Venturi al variare della frequenza dell'inverter.
- Fig.11b Curva di calibrazione per la valutazione della portata d'aria.
- Fig.12a Segnale monofase relativo agli elettrodi esterni per la sonda ECP.
- Fig.12b Risposta della sonda ad impedenza in aria ed acqua.
- Fig. 13 Andamento del titolo in funzione della frazione di vuoto.
- Fig. 14 Mappa di funzionamento del Venturi in regime bifase.
- Fig.15 Perdite di carico irreversibili : influenza della miscela bifase.

Fig.16 Fattore di correzione per la stima della portata gas in funzione del parametro di Martinelli.

Fig.17 Confronto tra la frazione di vuoto misurata e la frazione di vuoto stimata dalle correlazioni (4.30 α_1 e 4.31 α_2).

Fig.18 Confronto risultati sperimentali con correlazioni di Chisholm/ De Leeuw.

Fig. 19 Grado di vuoto sperimentale in funzione delle velocità superficiali della miscela bifase aria-acqua (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

Fig.20 Grado di vuoto sperimentale in funzione del titolo fluidinamico: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale, (c) confronto tra configurazione orizzontale e verticale.

Fig. 21 Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione della portata totale.

Fig.22 Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle velocità superficiali: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale

Fig. 23 Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle cadute di pressione monofase con aria.

Fig.24 Cadute di pressione bifase nel Venturi normalizzate rispetto al monofase con aria in funzione del titolo (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

Fig. 25 Moltiplicatore bifase: confronto tra dati sperimentali in deflusso orizzontale e verticale

Fig. 26 Coefficiente di efflusso del Venturi in deflusso bifase.

Fig. 27 Confronto tra cadute di pressione irreversibili nel Venturi in deflusso verticale ed orizzontale.

Fig.28 Cadute di pressione irreversibili nel Venturi in funzione delle velocità superficiali delle fasi: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

Fig.29 Cadute di pressione irreversibili nel Venturi normalizzate rispetto al monofase con aria in funzione del titolo (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

Fig. 30 Cadute di pressione irreversibili nel Venturi in funzione delle cadute di pressione irreversibili monofase con aria.

Fig. 31: Posizione elettrodi sonda in configurazione orizzontale

Fig. 32 Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni in funzione del grado di vuoto e della portata massica della fase aria.

Fig. 33 Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni posti a 22.5° in funzione del grado di vuoto e della portata massica della fase aria.

Fig. 34 Segnale normalizzato associato alla misura dell' elettrodo centrale in funzione del grado di vuoto.

Fig.35: Segnale elettrodi esterni. Asse x: θ , Asse y: V^* . Simboli vuoti: deflusso verticale anulare. Simboli pieni: deflusso orizzontale stratificato e stratificato anulare.

Fig.36: Segnale elettrodo centrale. Asse x: θ , Asse y: V^* . Simboli vuoti: deflusso verticale anulare. Simboli pieni: deflusso orizzontale stratificato e stratificato anulare.

Fig. 37: Confronto tra matrice sperimentale POLITO (aria-acqua) e SIET (acqua-vapore).

Fig. 38: Posizione elettrodi sonda SIET.

Fig. 39: Confronto tra i segnali normalizzati della sonda POLITO (aria-acqua) e SIET (acqua-vapore) in funzione della frazione di vuoto.

Sommario

Questo rapporto presenta l'attività teorica e sperimentale svolta presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino nello sviluppo della modellazione di uno spool piece (SP) per la stima dei parametri caratteristici di un deflusso bifase sulla base delle caratteristiche dello SP, della procedura di prova e dei risultati ottenuti nel corso delle campagne sperimentali. In particolare si presenta l'attività sperimentale svolta nel corso del 2014 con uno SP in configurazione orizzontale con aria ed acqua. Si è effettuato anche un confronto con i risultati ottenuti con la configurazione verticale.

Lo SP di riferimento è costituito da un tubo di Venturi e da una sonda ad impedenza per la stima della frazione di vuoto. I deflussi di interesse sono quelli ad elevata frazione di vuoto con flow patterns che coinvolgono il moto anulare, il moto anulare –disperso, il moto stratificato. In particolare nel corso della presente attività si è continuata la sperimentazione con uno SP costituito da un tubo di Venturi e dalla sonda realizzata da SIET in una configurazione orizzontale. Sono state effettuate 30 prove nell'intervallo di portata del liquido da zero a 140 l/h (0.0389 kg/s) mentre la portata dell'aria è variata, nelle prove in bifase, da 0.065 kg/s 0.099 kg/s. Nel corso di queste prove il titolo è nel range 0.62 - 0.94. La frazione di vuoto è stata sempre maggiore allo 0.98 e quindi si è in un regime detto di “wet gas”.

I risultati relativi allo SP con Venturi e sonda SIET in configurazione verticale sono stati disseminati con le pubblicazioni: Grazia Monni, Mario De Salve, Bruno Panella, Two-phase flow measurements at high void fraction by a Venturi meter, Progress in Nuclear Energy 77 (2014) 167-175; Monni G, De Salve M, Panella B, Two-Phase Annular Flow in a Vertically Mounted Venturi Flow Meter , HEFAT2014, 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 14 – 16 July 2014, Orlando, Florida.

Lo studio dei flow patterns in una configurazione orizzontale sono stati oggetto del lavoro G. Monni et al., Horizontal two-phase flow pattern recognition, Exp. Therm. Fluid Sci. (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/> che ha permesso di formulare una metodologia che impiega il Wire Mesh Sensor (WMS) per la misura della frazione di vuoto e il riconoscimento dei flow pattern.

La modellazione dello SP è impostata sulla logica di uno approccio meccanicistico nella descrizione dei deflussi in modo che conduca alla stima delle portate delle singole fasi “best estimate”, con l'ausilio di modelli a zero o al più monodimensionali e correlazioni semiempiriche atte a descrivere i fenomeni nella sezione di deflusso.

I nuovi risultati sono presentati in questo documento insieme ai modelli di letteratura riformulati nell'ottica di un impiego sistematico e metodologico nell'uso degli SPs negli impianti di prova tipo SPES3 per la simulazione sperimentale dei reattori nucleari ad acqua di nuova generazione. L'insieme delle attività svolte sulla strumentazione speciale sono state brevemente riprese e discusse alla luce delle esigenze di modellazione ed interpretazione di risultati sperimentali o processi da realizzare con definiti vincoli.

1. Introduzione

I simulatori integrali dei reattori nucleari simulano le rotture delle tubazioni con l'installazione di condotti, spesso orizzontali, con l'ausilio di valvole di intercettazione ad apertura rapida o con dischi di rottura. Gli scambi di massa tra monte e valle del componente che simula la rottura richiedono un monitoraggio continuo in termini di pressione, temperatura, portata del fluido, fasi e loro distribuzione. Ciò si realizza con della strumentazione "speciale" spesso realizzata con sistemi detti "spool piece" (SP). Si tratta di dispositivi che generano un set di segnali (proporzionali a delle grandezze fisiche di tipo meccanico, termico, elettrico ecc.) la cui analisi conduce alla stima delle portate e delle energie trasferite tra i volumi a monte e valle della regione che simula la rottura. L'obiettivo principale è quello di stimare le portate in massa delle due fasi con una adeguata accuratezza ed affidabilità.

Purtroppo non è possibile realizzare delle misure dirette della portata a causa della complessità dei deflussi e quindi bisogna considerare i parametri caratteristici dei deflussi bifase (quali frazione di vuoto, distribuzione delle fasi, velocità delle fasi, densità delle fasi). Diviene necessario utilizzare strumenti che generano segnali correlati a grandezze quali la frazione di vuoto, il flusso di quantità di moto, la velocità media delle fasi.

Per interpretare i segnali generati dagli strumenti è necessario formulare dei modelli che permettano di descrivere la fluidodinamica (bifase) nei condotti di misura, i principi di funzionamento degli strumenti insieme alla correlazione segnale elettrico generato – grandezze fisiche del deflusso. Per la validazione è spesso importante un confronto tra le stime effettuate con gli strumenti e le stime effettuate con modelli teorici.

Uno SP di riferimento per la stima dei parametri caratteristici dei deflussi bifase presuppone:

- a) la definizione degli strumenti , dal punto di vista geometrico e costruttivo, installati nello SP;
- b) le lunghezze di calma a monte e a valle di ogni singolo strumento insieme ai diametri di riferimento di queste lunghezze;
- c) le lunghezze ed i diametri dei condotti a monte e valle dello SP;
- d) la caratterizzazione dell'elettronica associata ad ogni strumento dello SP con la legge di conversione grandezza fisica –segnale; si tratta di strumenti progettati per operare in monofase in definiti range di funzionamento;
- e) la giacitura dello SP (verticale, orizzontale, inclinato);
- f) la disponibilità di campagne di prova con deflusso monofase e bifase atte a caratterizzare gli SPs in modo semiempirico e/o verificare o meno le ipotesi che sono alla base dei modelli utilizzati per l'interpretazione dei segnali;
- g) la disponibilità di un adeguato software in grado interpretare i segnali acquisiti sulla base di modelli di riferimento calibrati sulla base di database sperimentali e/o modelli teorici.

Le informazioni di riferimento da associare ai condotti a monte e valle dello SP sono: flow pattern, pressione, temperatura, frazione di vuoto, pressioni differenziali in diverse regioni della sezione di prova, portata in massa e volumetrica delle due fasi e infine la portata totale.

Grandezze quali flusso della quantità di moto, velocità medie delle singole fasi, rapporto di scorrimento, profili della frazione di vuoto, profili di velocità sono da considerare grandezze stimate associate a modelli interpretativi della fisica dei deflussi nello SP.

Nel corso delle precedenti attività sono stati studiati, dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, degli SPs costituiti da una turbina, drag disk e sonda ad impedenza [1], Venturi e Wire Mesh Sensor, Venturi e sonda ad impedenza [2].

Considerando che lo SP interessa delle applicazioni in impianti per la simulazione di transitori incidentali quali lo SPES-3 [3], le condizioni operative che lo SP deve poter gestire ed interpretare sono riportate in tabella 1.

Grandezza	unità di misura	valore minimo	valore massimo
temperatura	°C	temperatura ambiente	220
pressione	MPa	0.1	2
flusso della quantità di moto	Pa	0.	0.9
velocità fase vapore	m/s	6	400
velocità fase liquida	m/s	6	200
velocità media miscela	m/s	6	330
frazione di vuoto	%	60	100

Tab.1: Valori massimi e minimi dei parametri termoidraulici a valle della generica rottura in SPES3.

Si tratta d'intervalli stimati sulla base dell'involuppo dei risultati delle simulazioni degli scenari incidentali da realizzare svolte, per esempio, con codici tipo RELAP5. Nell'attività svolta presso il Dipartimento Energia, che aveva come obiettivo la messa a punto di metodiche di misura e di interpretazione di dati, si è operato a bassa pressione, bassa temperatura con aria ed acqua con miscele ad elevata frazione di vuoto. Sono state esplorate sia giaciture verticali che orizzontali considerando deflussi di tipo anulare/disperso e anulare stratificato.

Gli strumenti di riferimento per la realizzazione degli SPs o più in generale per la strumentazione della sezione di prova sono costituiti da sensori e trasduttori di misura. Si citano :

- trasduttori di pressione assoluta e/o differenziale per la misura della pressione e/o della differenza di pressione tra due punti caratteristici della sezione di misura;
- trasduttori di temperatura accoppiati a sensori quali termocoppie e/o termoresistenze per la misura delle temperature;
- trasduttori di forza nel caso di sensori a bersaglio quali i drag disks;
- trasduttori di numero di giri nel caso dei misuratori a turbina;
- trasduttori di frequenza nel caso di misuratori di velocità del tipo vortex;
- trasduttori di impedenza elettrica nel caso di sonde ad impedenza elettrica per la misura della frazione di vuoto;
- catene di misura per il conteggio di fasci di radiazione ionizzante quali i raggi gamma e neutroni nel caso di dispositivi per la misura della frazione di vuoto.

Ogni catena di misura dello SP è caratterizzata, per ogni grandezza fisica diretta o indiretta, misurata dal valore V del segnale elettrico, da un valore di fondo scala (F.S.) da un valore minimo misurabile (V_{min}), da una sensibilità del processo di trasduzione dS/dV dove S è il segnale elettrico generato, da una accuratezza e da un rapporto segnale/rumore. La catena di misura è quindi caratterizzata da una curva di calibrazione associata ad un definito range. Spesso le curve di calibrazione sono lineari o paraboliche o presentate nella forma di tabelle di conversione.

La caratterizzazione di un deflusso bifase all'interno di un condotto di diametro D e di lunghezza L , da un punto di vista macroscopico, è fatta considerando:

- la distribuzione delle due fasi (flow patterns),
- le due velocità superficiali J_1 e J_g ,
- la pressione p e la temperatura T per ciascuna fase e per la miscela.

Per la misura della frazione di vuoto sono rilevanti le tecniche dette tomografiche. Queste analizzano ed elaborano numerosi segnali elettrici associati a diversi punti di un volume di controllo per lo studio della distribuzione spaziale delle fasi; si riconoscono in questo modo i "flow patterns"[4]. Il riconoscimento dei flow patterns può essere effettuato attraverso l'analisi (statistica) dei segnali generati dai sensori dello SP o solo da uno strumento dello SP. Un esempio è dato dai risultati ottenuti nel corso dell'attività del precedente PAR 2012[5].

Un recente studio svolto con aria ed acqua e con l'accoppiamento di un Venturi ed una sonda ad impedenza di tipo tomografico è dovuto a Meng et al.¹

Per aver un riferimento sullo stato dell'arte della misura della portata con deflussi multifase, in particolare nel settore petrolifero, l' American Petroleum Institute [6] ha commissionato un libro bianco per identificare i problemi, gli standards, le buone pratiche. E' sottolineata l'importanza di evitare, nel processo di misura, la separazione delle fasi, garantire una adeguata accuratezza ed affidabilità oltre che bassi costi e manutenzione. Il processo di misura deve tener conto del tipo di regime che si instaura nel condotto. Il tipo di regime dipende, in generale da:

- portate delle due fasi
- velocità superficiali
- diametro ed inclinazione del condotto
- proprietà fisiche delle due fasi ed in particolare da densità, viscosità delle due fasi e tensione superficiale.

In generale la coppia delle velocità superficiali insieme alla frazione di vuoto (o meglio frazione volumetrica di gas) permette di identificare il tipo di regime (flow pattern).

¹ Z. Meng, Z. Huang, B. Wang, H. Ji, H. Li, Y. Yan, Air-water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor, Flow Measurement and Instrumentation 21 (2010) 268-276.

2. Deflussi bifase: parametri caratteristici e misurabilità degli stessi

Il processo di misura con uno SP e la sua interpretazione richiede una attenta definizione e localizzazione delle grandezze del deflusso da misurare considerando se queste sono misurabili in modo diretto con strumentazione disponibile e convenzionale. La pressione, la temperatura, le pressioni differenziali, le forze esercitate su una superficie sono considerate misurazioni di tipo diretto. La misura di velocità, titoli, frazioni di vuoto, portate, spessori di film liquidi, dimensioni e popolazioni di gocce necessitano di processi di elaborazione di informazioni e quindi processi indiretti di misura.

Si osserva che una misura diretta e “on line” del titolo o flow quality x è difficile e non facilmente praticabile nei deflussi bifase. Infatti richiede una completa separazione delle due fasi e la misura in monofase delle due portate. La determinazione può seguire, in modo indiretto, con l’ausilio di modelli e/o correlazioni di più segnali generati da diversi sensori. In particolare dalla misura di grandezze elettriche associate alla miscela gas / liquido (resistività elettrica, costante dielettrica ecc.) può seguire il titolo x o meglio la frazione di vuoto.

Un recente studio (2011) sulla caratterizzazione teorica e sperimentale di uno SP è dovuto ad Hasan e Lucas [7].

In questo studio un tubo di Venturi con incorporata una sonda a conduttanza è sperimentato in un regime anulare con gas umido (wet gas) in una configurazione verticale.

Un altro studio sulla misura della portata bifase in un condotto orizzontale, precedente a quello di Hasan e Lucas [7], è dovuto a dos Reis e Golstein [8]. In questo studio un “Venturi Nozzle” è accoppiato ad una sonda ad impedenza capacitiva ed è stato sperimentato e modellizzato in modo da stimare la portata ed identificare i flow patterns considerando i modelli omogeneo e a fasi separate con rapporto di scorrimento S (slip) costante e non.

I recenti studi effettuati presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino [9,10], effettuati nel contesto del precedente e presente PAR hanno premesso di mettere in evidenza come la misura delle perdite di carico irreversibili in un Venturi, insieme alla caduta di pressione ingresso-gola del Venturi permette di stimare la portata delle due fasi con adeguata precisione soprattutto per la fase gas.

Considerando le proprietà termofisiche delle due fasi il deflusso bifase può essere rappresentato con l’ausilio dei numeri di Froude Fr densimetrici per le fasi gas Fr_g e liquida Fr_l :

$$Fr_g = \frac{J_g}{\sqrt{gD}} \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)} \quad (2.1)$$

$$Fr_l = \frac{J_l}{\sqrt{gD}} \sqrt{\left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g} \right)} \quad (2.2)$$

dove:

J_g è la velocità superficiale per la fase gas

J_l è la velocità superficiale per la fase liquida

ρ_g è la densità per la fase gas

ρ_l è la densità per la fase liquida

D è il diametro del condotto

g è l’accelerazione di gravità.

Si osserva che i due numeri di Froude definiti dalle (2.1) e (2.2) sono rappresentativi delle portate nella misura in cui è nota la geometria e la densità delle due fasi.

Le densità delle due fasi si valutano, misurata la pressione p e la temperatura T nel volume di controllo di interesse, dalle proprietà termofisiche delle due fasi a partire da correlazioni o tabelle.

Le velocità superficiali sono semplicemente il rapporto tra la portata in massa Q_m per ogni fase (liquida l o gas g) e il prodotto densità della fase ρ e sezione A del condotto :

$$J_g = \frac{Q_{m,g}}{\rho_g A} \quad (2.3)$$

$$J_l = \frac{Q_{m,l}}{\rho_l A} \quad (2.4)$$

Il rapporto tra i due numeri di Froude è rappresentativo delle condizioni di prova essendo:

$$\frac{Fr_g}{Fr_l} = \left(\frac{J_g}{J_l} \right) \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{x}{1-x} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (2.5)$$

per gli aspetti connessi al titolo o “flow quality” x :

$$x = \frac{Q_{m,g}}{Q_{m,g} + Q_{m,l}} \quad (2.6)$$

e alle densità delle due fasi.

L’inverso rapporto tra i due numeri di Froude (2.5), nel documento dell’ API [6] è denominato, in modo improprio, numero di Lockart Martinelli:

$$X_L = \left(\frac{J_l}{J_g} \right) \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} = \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (2.7)$$

Nell’ottica di caratterizzare un deflusso bifase con grandezze medie associata alla sezione del condotto, la miscela bifase può essere idealizzata separando le due fasi ed associando alla fase gas la frazione di vuoto areica α :

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (2.8)$$

rapporto tra la sezione occupata dalla fase gas rispetto alla sezione del condotto.

Dalle portate in massa delle due fasi e sulla base della frazione di vuoto seguono le velocità medie delle due fasi:

$$u_1 = \frac{Q_{ml}}{\rho_l(1-\alpha)A} \quad (2.9)$$

$$u_g = \frac{Q_{mg}}{\rho_g\alpha A} \quad (2.10)$$

Il deflusso è quindi caratterizzabile con il rapporto di scorrimento S:

$$S = \frac{u_g}{u_1} \quad (2.11)$$

Si osserva che nella messa a punto di una campagna sperimentale finalizzata alla caratterizzazione di uno SP con un deflusso bifase con imposte e naturalmente note le portate in massa delle due fasi, la misura della pressione e temperatura della miscela all'ingresso dello SP permette di caratterizzare il deflusso grazie alle relazioni (2.1, 2.2, 2.3 e 2.7) in modo semplice e chiaro in termini di velocità superficiali, numeri di Froude e titolo (2.6).

Nel condotto di alimentazione dello SP, in un regime di moto anulare, è importante lo spessore del film liquido δ . Esso può essere stimato sperimentalmente con l'ausilio di sonde a conduttanza elettrica del tipo di quelle sviluppate da Damsohn e Prasser [11]. Si tratta di circuiti stampati da incorporare sulla superficie del condotto. Il segnale associato allo spessore del film liquido consente anche di caratterizzare le oscillazioni dell'interfaccia liquido-gas.

Le caratteristiche del film alla parete (spessore, velocità e quindi portata) è da studiare in termini di oscillazioni dello spessore, velocità del film, stabilità, fenomeni d'interazione con il core gassoso attraverso la formazione di gocce e loro trascinarsi. Questi fenomeni sono responsabili degli sforzi di taglio all'interfaccia, delle cadute di pressione, dei fenomeni di formazione e trasporto di gocce dal film al core gassoso e viceversa. Un deflusso bifase in regime anulare con uno spessore medio del film δ presenta un core gassoso con gocce disperse trascinate dal gas. Si ha la necessità di caratterizzare il core in termini di diametro medio d_d delle gocce, di concentrazione della popolazione di gocce o meglio di frazione di vuoto associata al solo core gassoso.

Le diverse indagini teoriche e sperimentali finalizzate alla misura della portata ed effettuate sui dispositivi sperimentali in questi ultimi anni hanno portato alla conclusione che lo SP più interessante e promettente per la misura della portata bifase nei deflussi bifase ad alta frazione di vuoto è costituito da un tubo di Venturi con incorporati dei trasduttori di misura:

- della frazione di vuoto (ad impedenza o a radiazioni ionizzanti) all'ingresso della regione convergente, nella regione della gola, all'uscita della regione diffusiva;
- temperature all'ingresso e nella gola del Venturi;
- pressione all'ingresso del Venturi;
- pressioni differenziali tra l'ingresso e la gola, tra l'ingresso e l'uscita del Venturi e tra la gola e l'uscita del Venturi.

I segnali associati ai precedenti sensori/trasduttori sono da utilizzare all'interno di modelli semiempirici che permettono di riconoscere il tipo di regime nel condotto oltre che le portate delle due fasi. Si osserva che in generale i deflussi bifase sono caratterizzati da una complessità di tipo stocastico e quindi l'accuratezza del processo di misura è da rappresentare in termini statistici (densità di probabilità della distribuzione delle misure, scarto quadratico medio, ecc.)

che permettano di identificare il campo di funzionamento ed il modello più adeguato per l'interpretazione dei risultati.

3. Circuiti sperimentali e strumentazione per la caratterizzazione degli spool pieces

Nel corso dell'attività sperimentale dei precedenti PAR [1,2] ed anche in quest'ultimo sono stati realizzati diversi circuiti di prova con aria-acqua con il fine di caratterizzare le prestazioni degli strumenti dello SP con deflussi monofase e bifase.

L'impianto che permette di installare la sezione di prova dello spool ed i condotti di riferimento è costituito:

- da un sistema per l'alimentazione dell'acqua,
- da un sistema per l'alimentazione dell'aria,
- dalla strumentazione necessaria per le misure di portata dei fluidi monofase (aria ed acqua), delle pressioni e delle temperature,
- dai sistemi per la miscelazione dell'aria e dell'acqua,
- dai sistemi per l'intercettazione dei deflussi utilizzati per la misura della frazione di vuoto,
- dai sistemi per la separazione delle due fasi e per lo scarico dei fluidi.

La sezione di prova e il relativo SP è possibile installarlo nella configurazione orizzontale o verticale.

L'alimentazione dell'aria è assicurata da una soffiante. La portata d'aria, regolata tramite un inverter, è misurata, in uscita dalla soffiante, tramite un orifizio calibrato, avente un'incertezza dichiarata del 2% F.S.. Nell'esercizio dell'inverter e della soffiante si impone la frequenza di esercizio f . E' inoltre misurata la temperatura del fluido, in modo da correggere il valore di densità in funzione di questa grandezza. In alternativa a questo sistema è possibile alimentare l'aria utilizzando la rete dell'aria compressa del laboratorio che è disponibile a 6-7 bar, previa misura della portata con adeguati rotametri per aria. I campi di funzionamento utilizzati sono: 50-300 l/h, 500-5000 l/h, 6300 e 63000 Nl/h valori nominali alla pressione atmosferica con esercizio dei rotametri a pressione (misurata) di 6 bar.

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 banco di rotametri aventi i seguenti range di misura: 0-100 l/h; 100-400 l/h. Per portate più elevate di acqua sono stati utilizzati dei misuratori di portata di liquido ad ultrasuoni, elettromagnetici oppure a turbina.

La configurazione del circuito consente l'utilizzo di acqua di rete o di acqua demineralizzata.

3.1 Sezione di prova verticale

Il circuito di prova è costituito da un condotto verticale in Plexiglass [2, 9], avente lunghezza totale di circa 4000 mm. Tra due valvole di intercettazione a sfera è installato lo SP formato da: sonda ad impedenza realizzata dalla SIET [12] ed un tubo di Venturi reversibile. A monte della prima valvola di intercettazione si ha una sezione d'ingresso ($L = 400$ mm e $D_i = 80$ mm) in cui vengono miscelate le due portate. Lo SP è composto dalla sonda ad impedenza ($L = 1210$ mm e $D_i = 80$ mm) e dal Venturi con i suoi tratti di calma (lunghezza totale pari a 1290 mm).

La sezione di prova 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. Il circuito è dotato di prese di pressione che consentono di misurare la pressione assoluta e la pressione differenziale in vari punti tra le due valvole d'intercettazione. Una vasta attività sperimentale [13] è stata condotta con questa sezione di prova (fig. 1 e 2) per caratterizzare le prestazioni della sonda ad impedenza realizzata da SIET (ECT1) [12] e per caratterizzare il comportamento del Venturi [9,10]. I segnali di portata e pressione vengono acquisiti utilizzando la scheda National Instruments DAQ system (NI USB-6218) tramite un programma sviluppato in ambiente LabView®.

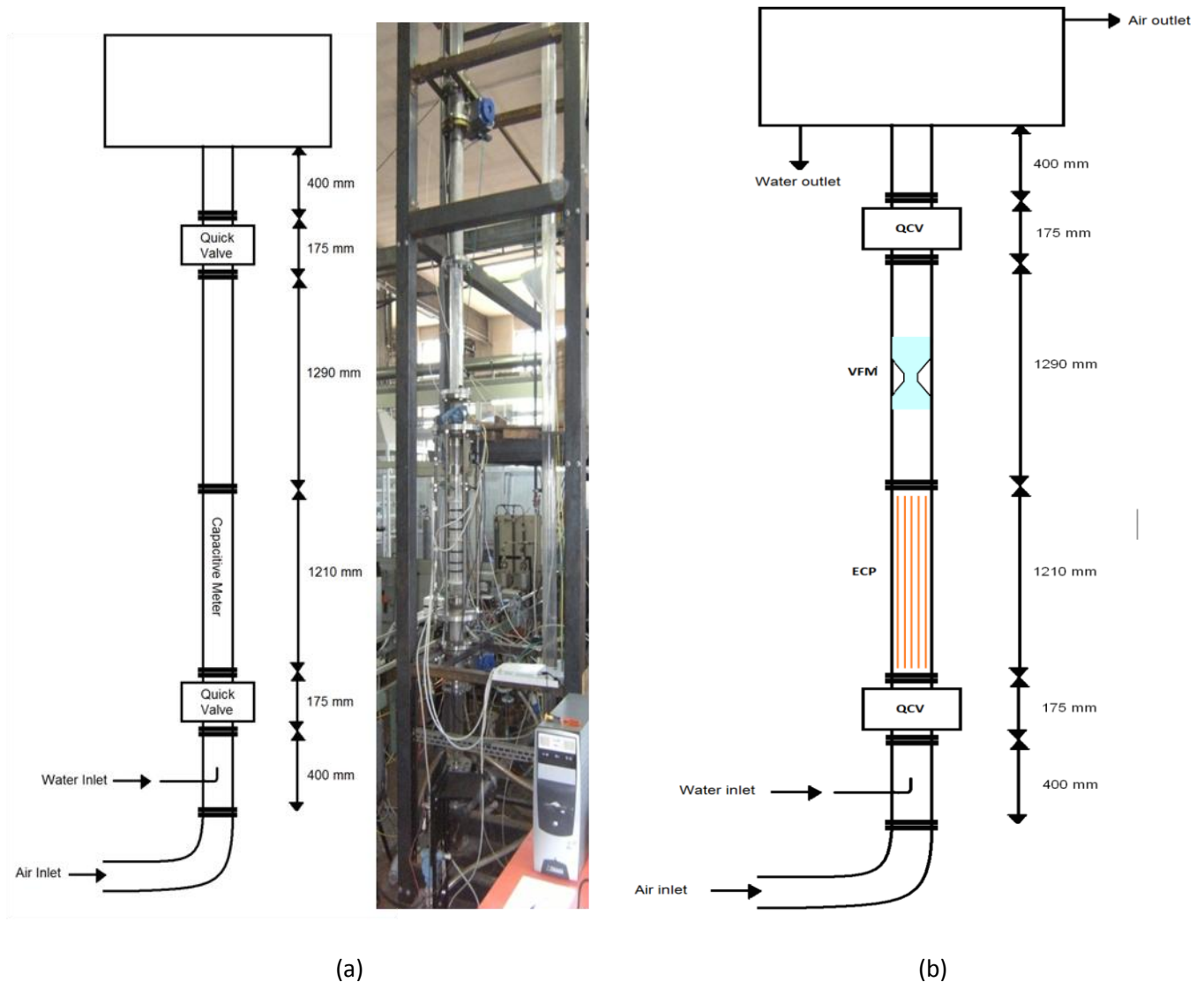


Fig. 1 a,b Schema della sezione di prova verticale con installata la sonda ad impedenza SIET e foto (a); sezione di prova verticale per la caratterizzazione della sonda ad impedenza ed il Venturi reversibile (b).

In fig. 2 si riporta in forma schematica il circuito di riferimento nella configurazione verticale:

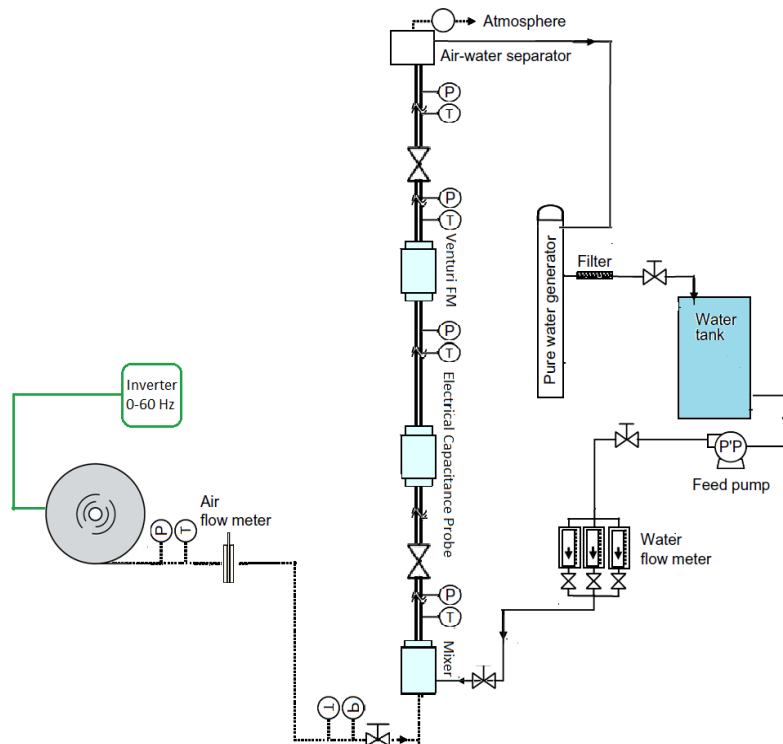


Fig. 2 Schema del circuito di prova con sezione di prova verticale.

3.1.1 Sonde a impedenza per la misura della frazione di vuoto

Per la messa a punto di metodologie per l'analisi dei risultati sperimentali e teorici oltre che per lo sviluppo di modelli di interpretazione dei segnali sperimentali sono state effettuate, nel corso degli anni, numerose prove con aria- acqua presso il Politecnico di Torino e con acqua vapore presso la SIET [3].

La SIET ha progettato [12] e realizzato delle sonde capacitive per la misura e studio della frazione di vuoto in grado di operare sia a caldo (ECT2) che a freddo (ECT1). In tabella 2 si riportano i dati geometrici di riferimento.

La sonda ECT1 utilizzata presso il dipartimento Energia di POLITO [12, 13], ha una lunghezza del tubo, in materiale isolante, pari a 600 mm per poter supportare gli elettrodi lunghi 400 mm 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 fissati 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).

Tipologia Strumento/Sonda	Sonda a caldo ECT2	Unità di misura	Sonda a freddo ECT1
materiale condotto	Pirex		plexiglass
diametro D	3	Pollici	80 mm
lunghezza sonda	600	mm	600 mm
spessore parete	5	mm	5 mm
pressione massima di esercizio	1.5	MPa	0.2
temperatura massima di esercizio	200	°C	60
numero elettrodi metallici sulla superficie esterna del pirex	16		8
elettrodi centrali	0	1	
lunghezza elettrodi	450	mm	400 mm
larghezza elettrodi	5	mm	5 mm
distanza angolare tra gli elettrodi	22.5	°	22.5°

Tab. 2 Dati caratteristici delle sonde ad impedenza realizzate da SIET

In fig. 3 si riporta la sezione della sonda ad impedenza della SIET utilizzata da POLITO con la numerazione degli elettrodi.

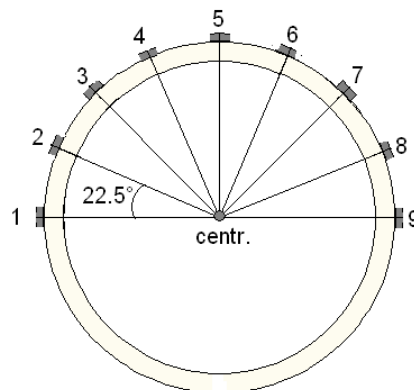


Fig. 3 Sezione della sonda SIET con numerazione degli elettrodi.

Per quanto riguarda l'elettronica ed i segnali della sonda ad impedenza i segnali elettrici inviati e ricevuti dalla scheda di acquisizione sono gestiti in ambiente LabView®. 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 5Vpp) e riceve il segnale in uscita.

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.

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.

Per identificare la coppia degli elettrodi oggetto del processo di misura, ad ogni coppia è associato un codice numerico univoco di identificazione come riportato in tabella 3.

		ECCITANTE								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ricevente	1	513	514	516	520	528	544	576	640	768
	2	1025	1026	1028	1032	1040	1056	1088	1152	1280
	3	2049	2050	2052	2056	2064	2080	2112	2176	2304
	4	4097	4098	4100	4104	4112	4128	4160	4224	4352
	5	8193	8194	8196	8200	8208	8224	8256	8320	8448
	6	16385	16386	16388	16392	16400	16416	16448	16512	16640
	7	32769	32770	32772	32776	32784	32800	32832	32896	33024
	8	65537	65538	65540	65544	65552	65568	65600	65664	65792
	9	131073	131074	131076	131080	131088	131104	131136	131200	131328
	10	262145	262146	262148	262152	262160	262176	262208	262272	262400

Tab. 3 Codici numerici per l'identificazione della coppia degli elettrodi oggetto del processo di misura

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 si esclude per eliminare l'influenza di un disturbo introdotto dall'elettrodo centrale (caratterizzate da valori di output più elevati).

Per ogni prova sono effettuati 36 cicli di misura in modo da valutare l'andamento medio del segnale delle varie combinazioni e la relativa variazione standard. Per un buon funzionamento della sonda è importante utilizzare acqua demineralizzata [13].

I segnali associati ad ogni coppia di elettrodi, utilizzati per la stima della frazione di vuoto sono rappresentati dal valore RMS della differenza di potenziale acquisita tra i due elettrodi ad elevata frequenza. Si tratta di un segnale che è normalizzato considerando i segnali associati a tutto liquido V_L e a tutto vapore V_V nota la dipendenza dalla temperatura.

Sono quindi, fissata la coppia di elettrodi (i,j), note le funzioni:

$$\begin{aligned} V_{L,i,j}(T) &= V_L(T) \\ V_{V,i,j}(T) &= V_V(T) \end{aligned} \quad (3.1)$$

ed in presenza di un miscela bifase il valore normalizzato:

$$V^*(\alpha, d, T) = \frac{V - V_V}{V_L - V_V} \quad (3.2)$$

dove α è la frazione di vuoto, d è la distanza circonferenziale tra la coppia di elettrodi. Sono considerati omologhi le coppie di elettrodi che presentano la stessa distanza circonferenziale d .

Il valore normalizzato V^* vale 1 in presenza di tutto liquido e zero in presenza di tutto vapore o gas.

La (3.2) è stata ampiamente utilizzata per la caratterizzazione della risposta della sonda realizzata da SIET nelle prove sperimentali svolte presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino con aria –acqua demineralizzata.

3.2 Sezioni di prova orizzontali

Il circuito di prova predisposto nel corso del PAR-2013 è costituito dalla soffiante, sistema di alimentazione dell'acqua demineralizzata, miscelatore aria- acqua, valvole a ghigliottina per l'intercettazione, sonda SIET in configurazione orizzontale, Venturi reversibile, sistema di efflusso dell'acqua e dell'aria. In fig. 4 si osserva la foto della sezione di prova (D=80 mm) con le valvole di intercettazione a ghigliottina. La foto di fig. 5 illustra la sonda SIET, installata in orizzontale, con gli otto elettrodi disposti lungo la semicirconferenza che permette di osservare l'effetto della gravità nella stratificazione del deflusso. La foto di fig. 6 illustra il tubo di Venturi reversibile mentre la foto di fig. 7 illustra il sistema di scarico del deflusso a valle della valvola di intercettazione.

Per la misura della portata di aria erogata dalla soffiante si utilizza un orifizio con Diametro D= 65 mm, diametro della sezione minima d=30.193 mm, coefficiente di efflusso C valutato in accordo alla normativa: C=0.605. Il tubo di Venturi è caratterizzato dal diametro D=80 mm, diametro della gola d=40 mm, C=1.

La costante caratteristica K è valutata, per i due dispositivi orifizio e Venturi, con la relazione:

$$K = \frac{A_d}{(1 - (d/D)^4)^{0.5}} \quad (3.3)$$

e vale rispettivamente 0.000444 e 0.001298 m².

I trasduttori di misura per la pressione assoluta, la pressione differenziale dell'orifizio e del Venturi sono caratterizzati da leggi lineari o paraboliche che tengono conto del fondo scala degli strumenti, dell'uscita in corrente (4 -40) mA e della resistenza di conversione del segnale a corrente a tensione. Si sono costruite curve di taratura dei trasduttori di pressione differenziale imponendo con un battente d'acqua delle pressioni differenziali note alla catena di misura.



Fig. 4 Sezione di prova orizzontale (D=80 mm) con sonda ad impedenza SIET e Venturi reversibile.

In regime bifase la frazione di vuoto è stimata con l'ausilio delle valvole di intercettazione a chiusura rapida. Si stima la massa intrappolata nella sezione di prova o attraverso processi di drenaggio della massa intrappolata oppure attraverso processi di ripristino della massa nella sezione di prova sino ad un definito livello a partire dalla massa intrappolata. Con quest'ultima procedura si stima la frazione di vuoto con buona precisione. Il volume della sezione di prova è pari a $V_t=15.1 \text{ dm}^3$.

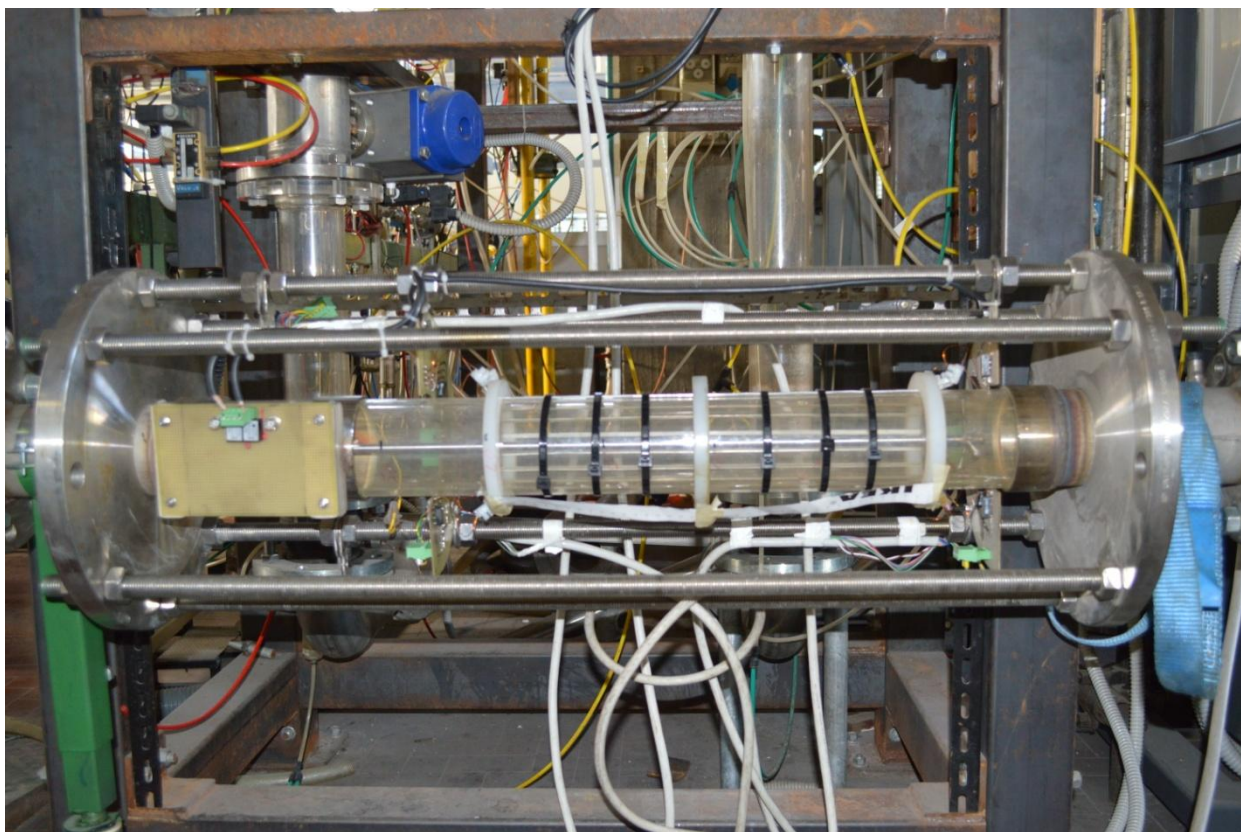


Fig. 5 Sonda ad impedenza della SIET disposta nella configurazione orizzontale.

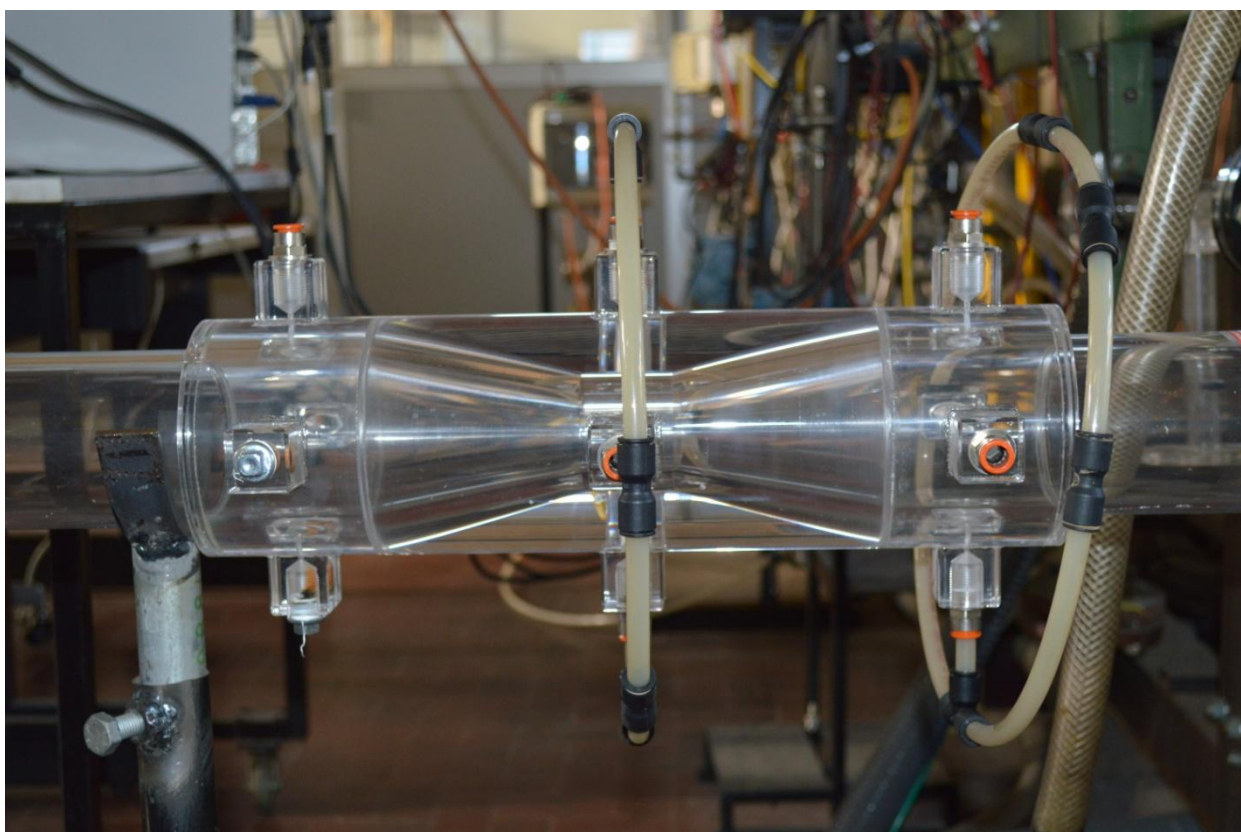


Fig. 6 Tubo di Venturi reversibile nella configurazione orizzontale.



Fig. 7 Sistema di scarico del deflusso a valle del tubo di Venturi (configurazione orizzontale).

In fig. 8 si riporta in forma schematica il circuito di riferimento per le prove con giacitura orizzontale.

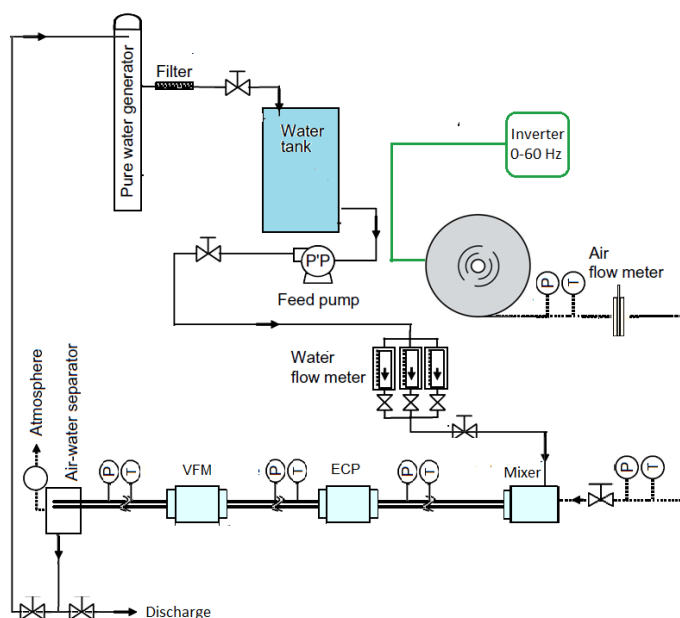


Fig. 8: Circuito con sezione di prova orizzontale.

3.3 Sistema acquisizione dati

I segnali degli strumenti per la misura:

- delle portate monofase a monte della miscelazione,
- di pressione assoluta e temperatura nella sezione di prova,
- di pressione differenziale nel Venturi (*inlet-throat*),
- delle cadute di pressione irreversibili del Venturi (*inlet-outlet*),

vengono acquisiti, tramite scheda DAQ, in ambiente LabView® per 30 s utilizzando una frequenza di acquisizione di 1250 Hz.

Per quanto riguarda la sonda ECP i segnali inviati e ricevuti dalla scheda di acquisizione sono gestiti tramite un programma indipendente, in ambiente LabView®, sincronizzato però con le misure degli altri segnali.

Tramite il programma viene definita la sequenza delle varie combinazioni di elettrodi (81), il numero di campioni di lettura per ogni coppia di elettrodi (2000) e la frequenza di campionamento (250 kHz).

Viene registrato in uscita il valore medio RMS relativo ai 2000 *samples* letti per ogni combinazione.

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 alla lettura dei 9 segnali relativi alle misure tra elettrodi esterni e elettrodo centrale.

La scansione di ogni coppia di elettrodi richiede un tempo di misura di 33 ms, così che il tempo totale della scansione risulta pari a circa 2.7 s.

Per ogni prova sono stati effettuati 10 cicli di misura in modo da valutare l'andamento medio del segnale delle varie combinazioni e la relativa deviazione standard.

I segnali vengono quindi elaborati in ambiente Matlab®. Per quel che concerne il modello dello SP, si utilizzano i segnali mediati (media aritmetica) sui 30 secondi di acquisizione; un'analisi degli andamenti temporali dei segnali degli strumenti, viene eseguita al fine di determinare le deviazioni standard dei segnali e la loro variazione rispetto al caso monofase.

3.4 Calibrazioni in monofase e matrici sperimentali

I trasduttori di pressione differenziale utilizzati nel corso delle campagne di misura, tutti caratterizzati da una uscita in corrente 4-20 mA, sono stati verificati e per ognuno di essi si è costruita la curva di calibrazione segnale elettrico in Volt pressione differenziale applicando dei battenti di colonna d'acqua ai trasduttori e correlando la pressione differenziale al segnale elettrico. In tabella 4 si riportano le leggi di conversione dei segnali S espressi in volt in grandezze fisiche ottenute ed utilizzate per l'elaborazione dei dati grezzi.

Trasduttore	Legge di conversione S in V	Unità di misura
Pressione assoluta SP	$P=1.077*S-0.0522$	Bar
Pressione differenziale orifizio soffiante SO	$dp=310.46*S-312.36$	mBar
Pressione differenziale Tubo di Venturi SV	$dp=24.759*S-49.254$	mBar
Pressione differenziale irreversibile. Sv, irr	$dp=19.523*S^2-40.86*S+23.251$	mBar

Tab. 4 Leggi di conversione dei segnali elettrici in grandezze fisiche: circuito con sezione di prova orizzontale (2014)

Il tubo di Venturi utilizzato nello SP, in un esercizio monofase è stato caratterizzato nella precedente attività [2].

Le caratteristiche geometriche e di funzionamento del Venturi utilizzato nel presente studio sono riportate in tabella 5. Nell' *ALLEGATO I* è riportato il disegno tecnico dello strumento.

Il Venturi corto, utilizzato nel presente studio, è stato progettato e fatto costruire in plexiglass secondo i criteri delle norme UNI, con un angolo divergente pari all'angolo del tratto convergente ($\theta=21^\circ$, Venturi simmetrico). Rispetto al Venturi classico il Venturi di tipo corto si distingue per la scelta di avere un angolo del tratto divergente superiore ai 15° ; questa scelta riduce i costi di fabbricazione ma comporta cadute di pressione irreversibili maggiori a causa dei fenomeni di distacco della vena fluida. La scelta di installare un misuratore simmetrico consente comunque la misura della caduta di pressione in entrambi i versi di deflusso e rappresenta una scelta obbligata nei casi in cui si possa presentare un reflusso o un inversione di portata.

Caratteristiche Venturi		
D_1	80	mm
D_2	40	mm
B	0.5	-
$\vartheta_{convergente} = \vartheta_{divergente}$	21	°
$L_{tot_Venturi}$	340	mm
$L_{upstream}$	628	mm
$L_{downstream}$	628	mm

Tab. 5 Caratteristiche del Venturi

Il comportamento dello strumento in deflusso monofase con aria (fig. 9) è stato analizzato per ricavare il coefficiente di efflusso (C) dello strumento. Il coefficiente monofase con aria è stato calcolato in base alle misure sperimentali di portata e pressione differenziale:

$$Q = \left[CA_2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho(1-\beta^4)}} \right] F_a Y \quad (3.4a)$$

dove:

- Q Portata Volumetrica
- C Coefficiente di efflusso (adimensionato e specifico del tipo di misuratore)
- A_2 Area sezione ristretta
- $\Delta p = p_1 - p_2$ Caduta di pressione nel misuratore (misurata tra ingresso e sezione contratta)
- p_1 Pressione ingresso
- p_2 Pressione nella sezione ristretta A_2
- $\beta = D_2/D_1$ Rapporto tra diametri (diametro in A_2 / diametro del tubo)
- ρ Densità del fluido.

Considerando F_a e Y pari a uno:

$$C = \frac{Q}{F_a \cdot Y \cdot A_2} \cdot \left(\frac{\rho(1-\beta^4)}{2\Delta p} \right)^{0.5} \quad (3.4b)$$

La curva ricavata è riportata in Fig. 10 in funzione del numero di Reynolds.

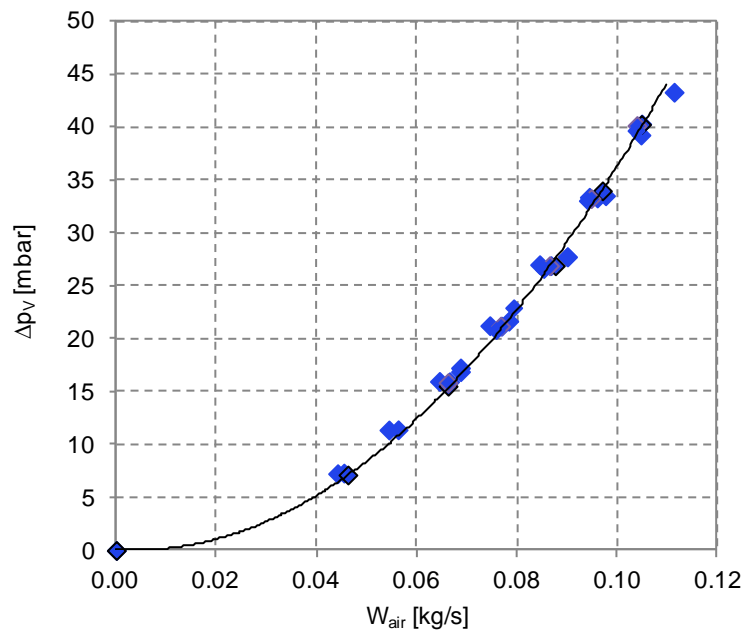


Fig. 9. Taratura monofase con aria del Venturi.

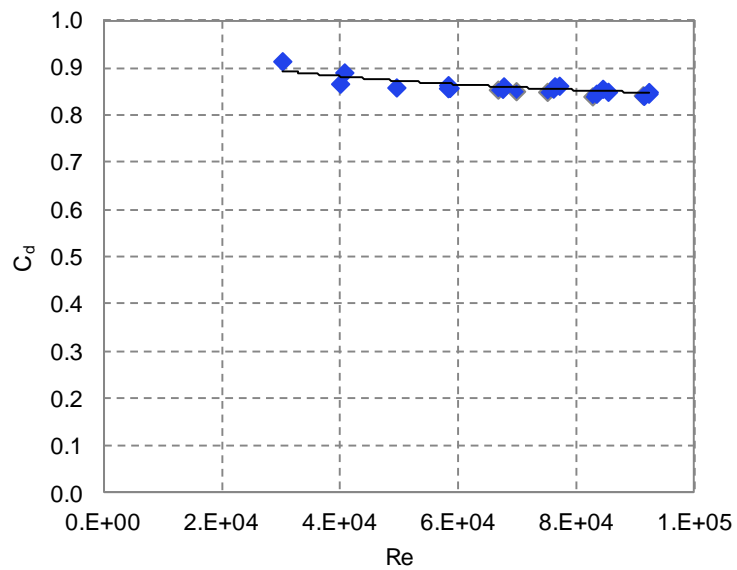


Fig. 10: Coefficiente di efflusso sperimentale monofase con aria per il Venturi.

La dipendenza dal numero di Reynolds può essere approssimata da una legge del tipo:

$$C = a \cdot Re^b \quad (3.5)$$

dove i parametri a e b vengono ricavati da tarature sperimentali e C assume un valore costante, pari a 0.84, per numeri di Reynolds maggiori di $7 \cdot 10^4$.

Il numero di Re è stato calcolato come:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (3.6)$$

Il valore assunto dal coefficiente di deflusso nel caso monofase è da attribuire a fenomeni di distacco della vena fluida nella sezione convergente- divergente; nel caso bifase, la presenza di un interfaccia tra i due fluidi rende l'interpretazione del significato del coefficiente di efflusso più complessa. Inoltre il valore di densità di miscela risulta essere fortemente correlato con il valore del coefficiente in quanto indice della distribuzione delle fasi all'interno dello strumento e della frazione massica delle fasi.

Le prove in monofase per l'orifizio e il Venturi al variare della frequenza dell'inverter hanno portato ai risultati grezzi di tabella 6.

f inverter HZ	Tin Air [C]	Tin TS [C]	T VFM [C]	Tamb C	SO [V]	SP [V]	SV [V]	Svirr [V]
0	47	33	29	24	1.0037	0.954545	2.00058	0.99913
30	72	42	39	24	1.342125	0.959675	2.58477	1.460885
40	82	50	45	24	1.620715	0.965995	3.044405	1.714245
50	97	64	57	24	1.92171	0.974095	3.629035	1.92179
40	89	58	53	24	1.617565	0.967395	3.041775	1.710525
30	77	48	45	24	1.34211	0.95899	2.58426	1.44992

Tab. 6 Segnali elettrici generati dalle catene di misura nel corso del processo di messa a punto in monofase.

I valori convertiti sono riportati in tabella 7:

f inverter	Tin Air [C]	Tin TS [C]	T VFM [C]	Tamb C	dP O [mBar]	P [bar]	dp V [mBar]	dp irr [mBar]
0	47	33	29	24	0.00	0.975845	0	2.774845
30	72	42	39	24	104.32	0.98137	14.74232043	6.481293
40	82	50	45	24	190.81	0.988177	26.1224234	12.05219
50	97	64	57	24	284.25	0.9969	40.59727757	18.48324
40	89	58	53	24	189.83	0.989684	26.05730723	11.95226
30	77	48	45	24	104.31	0.980632	14.72969334	6.296778

Tab. 7 Grandezze fisiche valutate nel corso delle prove in monofase con sola aria

Il valore della perdita di carico irreversibile dp irr (2.77 mBar) che si osserva per f=0 è un errore sistematico associato alla catena di misura.

Interessante è l'andamento delle grandezze misurate con la frequenza imposta dall'inverter (fig. 11a). Gli andamenti parabolici delle pressioni differenziali indicano come la portata monofase erogata dalla soffiante varia con legge circa lineare con la frequenza dell'inverter.

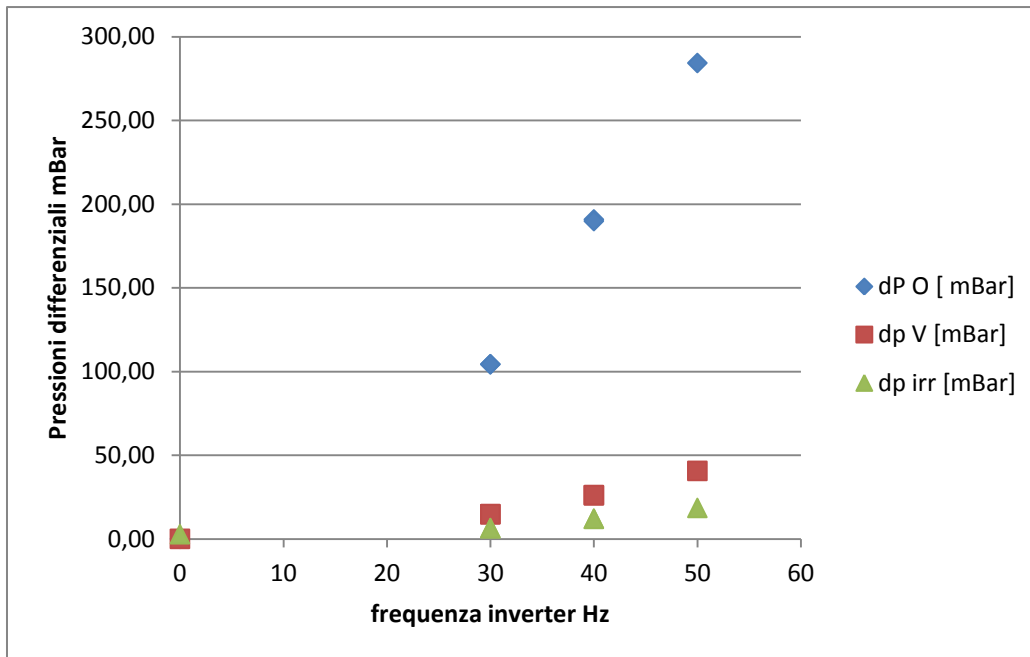


Fig. 11a Pressioni differenziali misurate nell'orifizio e Venturi al variare della frequenza dell'inverter.

La portata d'aria che fluisce attraverso l'orifizio è stimata, sulla base della pressione differenziale dell'orifizio, con la:

$$Q_{m,a} = C\sqrt{2\rho_g\Delta p} \quad (3.7)$$

con ρ_g funzione della pressione e temperatura in kg/s, Δp in Pascal e $C=0.0044$ in $(\text{kg/s}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa})^{0.5})$. La portata è variata sino a circa 0.1 kg/s . In fig. 11b si riporta la curva di calibrazione associata all'orifizio per il processo di misura della portata di aria in massa.

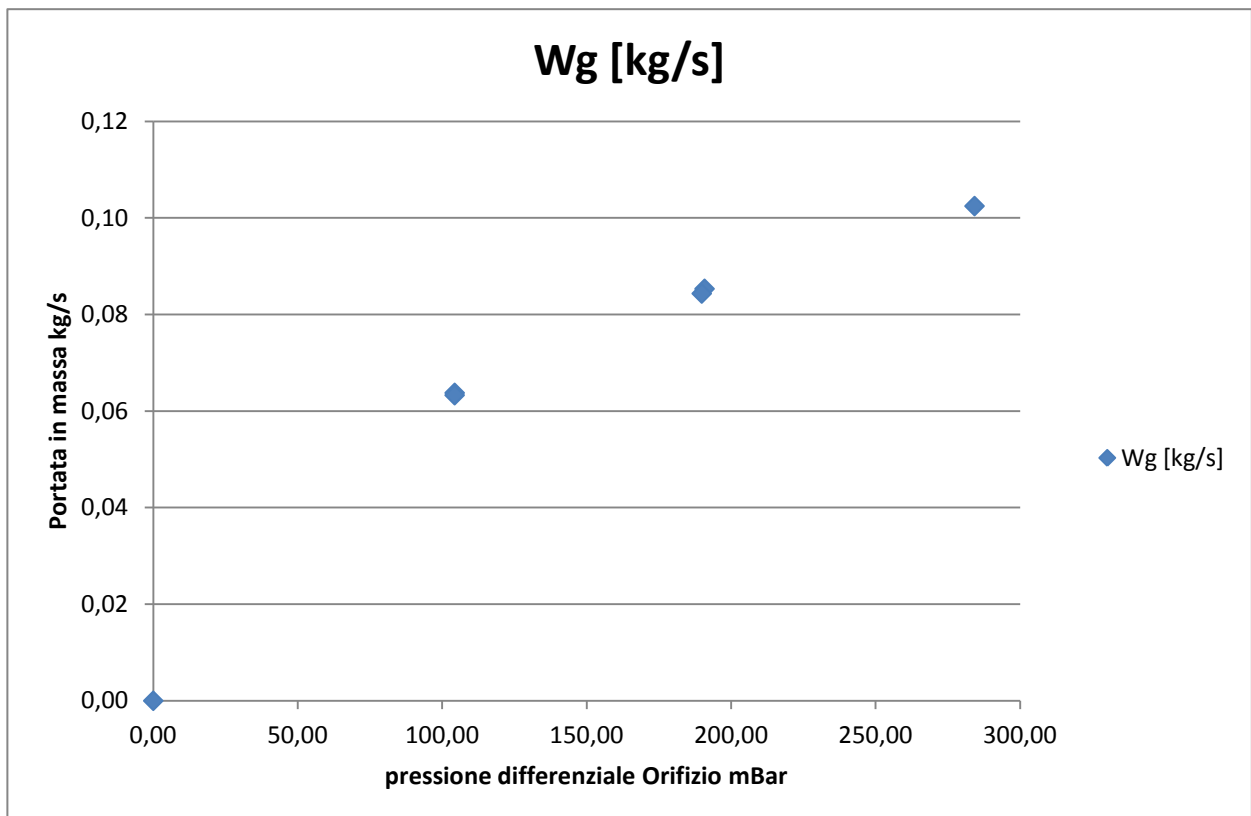


Fig. 11b : Curva di calibrazione per la valutazione della portata d'aria.

3.4.1 Calibrazione statica monofase della sonda a impedenza

La risposta della sonda in condizioni statiche monofase aria e acqua (demineralizzata) viene eseguita preliminarmente per stabilire il range di variazione delle misure e la sensibilità dello strumento.

In Fig. 12a è riportato il valore di RMS misurato tra gli elettrodi a $i=1$ e $j=2-9$, in funzione della distanza angolare θ , per aria e acqua, nonché la variazione angolare del loro rapporto RMS_i/RMS_g . Il valore di RMS misurato dipende oltre che dalla capacità dei fluidi anche dal valore di resistenza elettrica in funzione della frequenza di eccitazione, anche in presenza di acqua demineralizzata.

Le misure effettuate nella sezione di prova orizzontale hanno confermato i risultati qui mostrati.

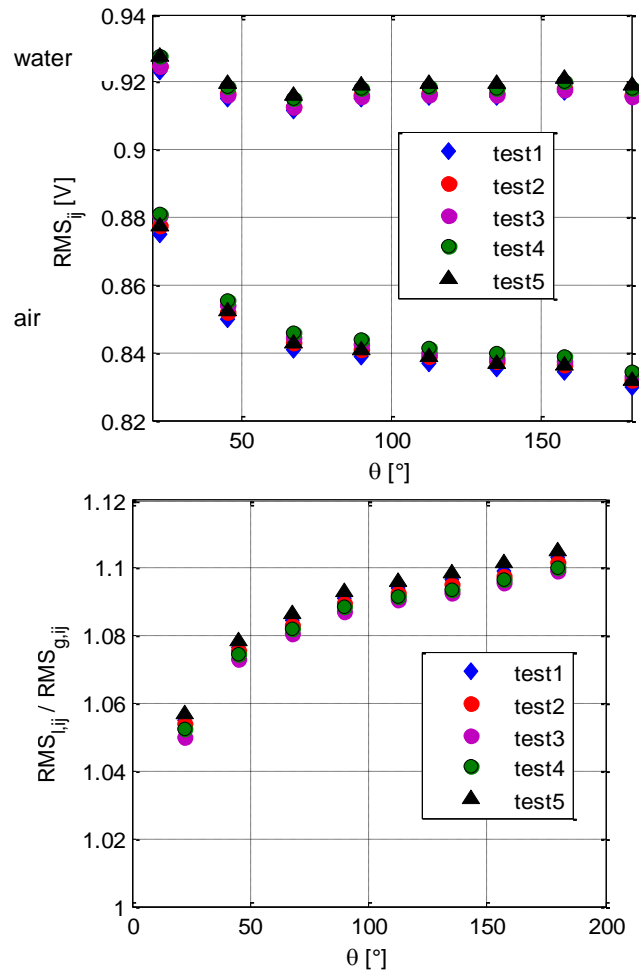


Fig. 12a Segnale monofase relativo agli elettrodi esterni per la sonda ECP.

Il rapporto teorico tra segnale con acqua e aria si riduce nel caso pratico a un valore compreso tra 1.05 e 1.1 in funzione dell'angolo di misura. La dipendenza angolare è maggiore nei segnali misurati in presenza di sola aria, mentre risulta limitata nel caso monofase acqua.

Per quanto riguarda l'elettrodo centrale il segnale relativo a ogni prova è calcolato come la media aritmetica dei 9 segnali delle misure relative gli elettrodi esterni.

L'analisi del segnale ha messo in evidenza una maggiore sensibilità dell'elettrodo alle proprietà del fluido (l'elettrodo centrale a diretto contatto con il fluido, subisce l'attenuazione di un solo spessore di plexiglass) e una maggiore dispersione del segnale. In questo caso il rapporto RMS_l / RMS_g risulta pari a 1.6 ± 0.1 .

Per le prove realizzate nella presente campagna sperimentale i valori di riferimento per la normalizzazione del segnale sono riportati in fig. 12b.

La distanza angolare è conteggiata a partire dall'elettrodo numero 1 posizionato sulla direttrice più alta del condotto orizzontale mentre l'elettrodo numero 9 è posizionato sulla direttrice più bassa del condotto. La distanza tra due elettrodi vicini è di 22° .

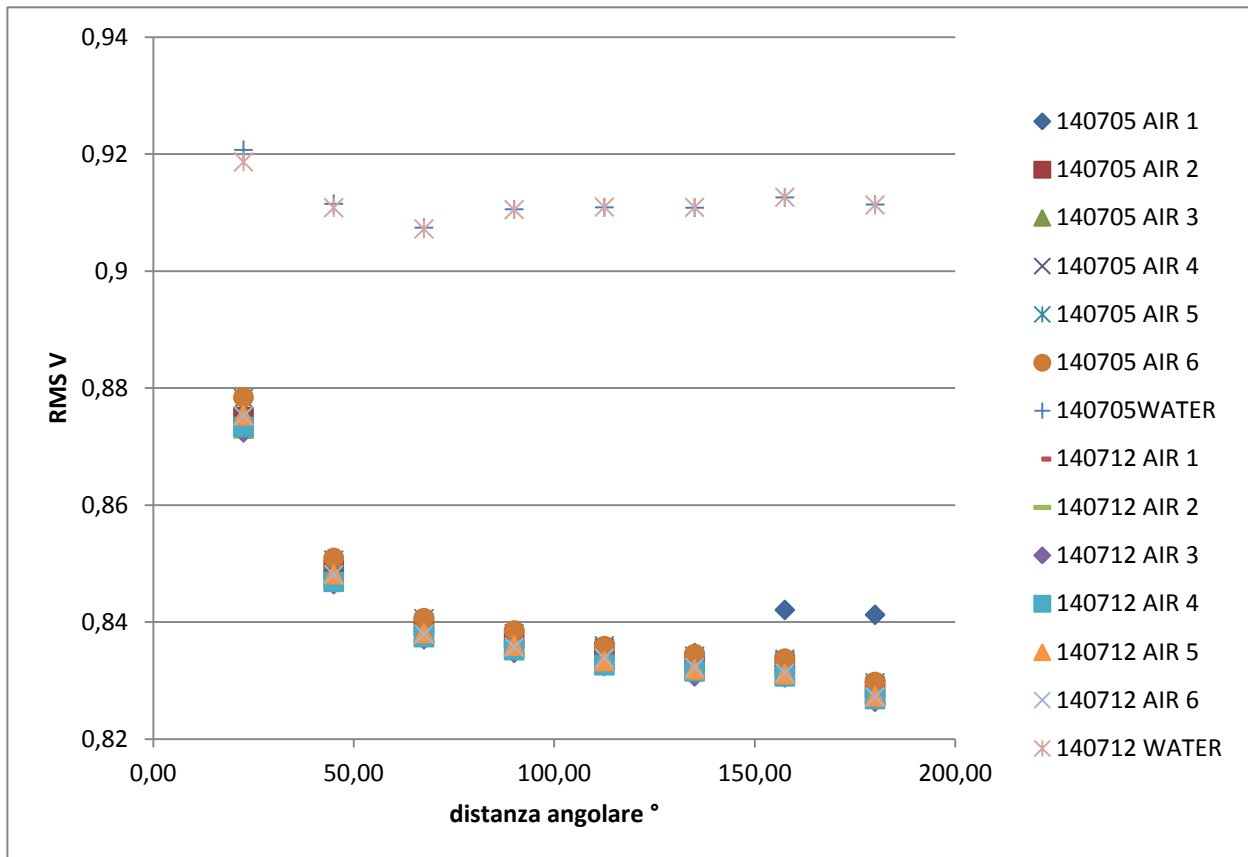


Fig. 12b Risposta della sonda a impedenza con aria e acqua.

La misura del segnale monofase con aria e acqua viene eseguita prima di ogni set di prove bifase, e il segnale bifase viene normalizzato in modo tale da considerare le variazioni del segnale monofase e rendere quindi le diverse prove confrontabili:

$$V_{ij}^* = \frac{RMS_{TP-ij} - RMS_{l-ij}}{RMS_{g-ij} - RMS_{l-ij}} \quad (3.8)$$

3.5 Procedura di prova e matrice sperimentale

Le prove in bifase sono caratterizzate da una procedura di prova in cui si impone la frequenza di esercizio della soffiante e la portata di acqua introdotta nella sezione di prova attraverso il miscelatore e si acquisiscono anche i segnali dell'orifizio, del Venturi, della sonda a impedenza. Segue la fase di misura la frazione di vuoto attraverso l'intercettazione delle valvole.

Nella procedura di prova adottata vengono misurati, in primo luogo, i valori di riferimento monofase acqua e aria, utilizzati per normalizzare i segnali della sonda; si procede quindi con le misure in deflusso bifase.

Sono imposte le portate in massa dell'aria e dell'acqua. Il grado di vuoto è misurato utilizzando il metodo della pesata intercettata tra le valvole a chiusura rapida (QCV). Le prove in deflusso bifase, nella configurazione verticale, sono state eseguite in un range di velocità superficiali compreso tra 14 e 18 m/s e tra 0.0008 e 0.0050 m/s per aria e acqua rispettivamente, con un titolo fluidodinamico corrispondente compreso tra 0.78 e 0.96. Nella configurazione orizzontale

le prove sono state eseguite in un range compreso tra 11 e 18 m/s e tra 0.0008 e 0.008 m/s per fase gassosa e liquida rispettivamente, range che ha permesso di realizzare un deflusso fortemente stratificato e anulare-stratificato.

In *ALLEGATO II* è riportata la matrice sperimentale delle prove bifase in configurazione verticale e orizzontale.

La matrice sperimentale dei dati grezzi delle prove in bifase è riportata nelle tabelle 8a e 8b.

Gli elementi di non riproducibilità delle prove sono prevalentemente da imputare alle variazioni della temperatura dell'aria e alle incertezze di misura associate agli strumenti.

N°prova	f invertir	Ql (l/h)	Tin Air [C]	Tin TS [C]	T VFM [C]	Tamb C	S-Orifice [V]	Sp assoluta [V]	SDp V [V]	SDp V [V]	SDp Virr [V]	α
1	30	14	79	26	23	23	1.356	0.973	1.356	2.666	1.642	0.995
2	30	30	76	24	23	23	1.345	0.969	1.345	2.642	1.700	0.991
3	30	75	75	24	23	23	1.336	0.968	1.336	2.624	1.682	0.987
4	30	100	75	24	23	23	1.331	0.969	1.331	2.612	1.688	0.985
5	30	140	74	24	23	23	1.328	0.970	1.328	2.606	1.723	0.979
6	40	16	85	26	24	23	1.569	0.976	1.569	3.107	1.853	0.997
7	40	30	87	26	24	23	1.566	0.975	1.566	3.101	1.882	0.996
8	40	75	88	26	24	23	1.557	0.975	1.557	3.083	1.917	0.992
9	40	100	89	27	25	23	1.549	0.977	1.549	3.065	1.979	0.989
10	40	140	90	27	25	23	1.540	0.977	1.540	3.048	2.022	0.987
11	50	14	106	30	28	24	1.830	0.981	1.830	3.649	2.095	0.998
12	50	30	107	30	28	24	1.844	0.982	1.844	3.679	2.139	0.998
13	50	75	107	29	28	24	1.856	0.987	1.856	3.703	2.200	0.997
14	50	100	108	29	28	24	1.873	0.987	1.873	3.739	2.247	0.996
15	50	140	110	29	28	24	1.879	0.987	1.879	3.751	2.297	0.995

Tab. 8a Matrice sperimentale delle prove in bifase (prima serie)

N°prova	f invertir	Ql (l/h)	Tin Air [C]	Tin TS [C]	T VFM [C]	Tamb C	S-Orifice [V]	Sp assoluta [V]	SDp V [V]	SDp V [V]	SDp Virr [V]	α
1	30	14	75	25	26	24	1.339	0.962	2.591	2.591	1.612	0.997
2	30	30	71	25	24	24	1.334	0.963	2.598	2.598	1.741	0.990
3	30	75	71	24	24	24	1.330	0.965	2.616	2.616	1.686	0.985
4	30	100	66	24	24	24	1.328	0.965	2.637	2.637	1.716	0.982
5	30	140	66	24	24	24	1.328	0.968	2.662	2.662	1.759	0.978
6	40	14	76	26	24	24	1.606	0.969	3.051	3.051	1.872	0.998
7	40	30	77	26	25	24	1.603	0.973	3.070	3.070	1.909	0.997
8	40	75	78	26	26	24	1.598	0.973	3.092	3.092	1.937	0.993
9	40	100	78	26	25	24	1.594	0.976	3.095	3.095	1.965	0.990
10	40	140	76	26	25	24	1.589	0.974	3.153	3.153	2.021	0.988
11	50	14	89	29	28	24	1.896	0.978	3.647	3.647	2.093	0.998
12	50	30	84	28	27	24	1.887	0.983	3.663	3.663	2.151	0.997
13	50	75	88	28	28	24	1.911	0.983	3.693	3.693	2.205	0.996
14	50	100	88	28	27	24	1.899	0.986	3.725	3.725	2.240	0.996
15	50	140	85	27	26	24	1.890	0.988	3.775	3.775	2.292	0.995

Tab. 8b Matrice sperimentale delle prove in bifase (seconda serie)

4. Misura della portata in bifase con i tubi di Venturi (Venturi Flow Meter)

La misura della portata monofase di un deflusso tutto gassoso o tutto liquido è spesso realizzabile, a basso costo, attraverso la misura della pressione differenziale nei tubi di Venturi o più in generale attraverso dispositivi a strozzamento (orifizi). In questi la pressione differenziale misurata è proporzionale al quadrato della portata.

La giacitura può essere sia orizzontale che verticale. In presenza di un deflusso bifase ad elevata frazione volumetrica di gas si parla di gas umido (Wet Gas) e la risposta del trasduttore di pressione deve essere corretta per tener conto della presenza della frazione liquida del deflusso.

In tabella 9 si riportano i dati caratteristici di tubi di alcuni tubi Venturi sperimentati da alcuni autori in regime bifase. In generale è opportuno discriminare tra la regione convergente (lunghezza L_c), la gola (lunghezza L_t) e la regione di diffusione (lunghezza L_d). Sono anche importanti le lunghezze di calma a monte e a valle LM ed LV.

Autore	LM mm	D mm	L_c mm	D_1 mm	L_2 mm	d mm	L_t mm	L_d mm	D mm	LVm m
Hasan-Lucas [7]	110	80	15.56	53.90	24	48	75	182.88	80	80
dos Reis [8]	54	34	45.86	17		17	15	122	34	
Monni [9], [10]	485	80	100	40		40	40	100	80	485
Monni tipo TV, SN 64021 [2]	500	26				10.251			26	490
Monni-Venturi corto [2]		80				34.939				
Paladino e Malisca ²	1200	44	63.3			22	22	84.3	44	500

Tab. 9 Dati caratteristici di tubi di Venturi sperimentati in bifase

Un tubo di Venturi, dal punto di vista geometrico è caratterizzato :

- dal rapporto β definito dal rapporto dei diametri:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (4.1)$$

- dallo standard di riferimento per il posizionamento delle prese di pressione, lunghezze delle regioni convergente L_c , divergente L_d , a sezione costante l_t , lunghezze dei tratti di calma L_m , L_v ;
- dagli angoli della regione convergente e divergente α_c ed α_d .

In accordo allo standard ISO 5167 il semiangolo della regione convergente è 10.5° mentre il semiangolo del diffusore è 7.5° .

In un deflusso monofase o più in generale per un deflusso omogeneo, la portata in massa fluente in un Venturi Q_{mt} è descritta, in accordo con la normativa, con relazioni del tipo:

² E.E Paladino, C.M. Mariska, Computational modeling of bubbly flows in differential pressure flow meters, Flow Measurement and Instrumentation 22 (2011) 309-318

$$Q_{mt} = C_D \frac{\pi d^2}{4} \varepsilon \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2\rho_t \Delta p_t} \quad (4.2)$$

dove:

C_D è il coefficiente di efflusso,

ε è il coefficiente di compressibilità del fluido,

ρ_t è la densità del fluido,

Δp_t è la pressione differenziale del Venturi tra le prese di pressione monte e la gola,

β è il rapporto tra il diametro della gola e quello del condotto.

I coefficienti C_D ed ε caratterizzano il tubo di Venturi o i dispositivi a strozzamento per quanto riguarda il coefficiente di efflusso o efflusso e la comprimibilità del fluido dal punto di vista degli standards normativi.

Introducendo il parametro K definito dalla :

$$K = C_D \frac{\pi d^2}{4} \varepsilon \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (4.3)$$

che in generale è una funzione del numero di Reynolds oltre che dalla geometria, si ha:

$$Q_{mt} = K \sqrt{2\rho_t \Delta p_t} = A_t k_t \sqrt{2\rho_t \Delta p_t} \quad (4.4)$$

dove :

$$A_t = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.5)$$

A_t è la sezione del Venturi in corrispondenza della gola. Dalla (4.3) e (4.4) segue:

$$k_t = \frac{K}{A_t} = C_D \varepsilon \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (4.6)$$

Quindi per un deflusso monofase di solo gas o solo liquido si ha per le portate in massa:

$$Q_{mg} = A_t k_g \sqrt{2\rho_g \Delta p_g} \quad (4.7a)$$

$$Q_{ml} = A_t k_l \sqrt{2\rho_l \Delta p_l} \quad (4.7b)$$

Supponendo di realizzare una miscela bifase con le portate di gas e liquido previste dalle (4.7a e 4.7b) si ha, per il rapporto tra la portata del liquido e quella del gas, la relazione:

$$\frac{Q_{ml}}{Q_{mg}} = \frac{1-x}{x} = \frac{k_l}{k_g} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \sqrt{\frac{\Delta p_l}{\Delta p_g}} \quad (4.8)$$

dalla quale segue:

$$X_{\text{mod}} = \sqrt{\frac{\Delta p_l}{\Delta p_g}} = \frac{k_g}{k_l} \left(\frac{Q_{ml}}{Q_{mg}} \right) \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{k_g}{k_l} \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (4.9)$$

Questo rapporto è definito da Hasan e Lucas [7] come parametro di Lockhart- Martinelli modificato.

Le ricerche di Steven [14], [15] sulla misura della portata bifase ad elevata frazione volumetrica di gas (> 95 % , “Wet Gas”), con tubi di Venturi e “plate orifices”, fanno riferimento al parametro di Lockhart-Martinelli definito dalla :

$$X_{LM} = \frac{Q_{ml}}{Q_{ng}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (4.10)$$

Questa definizione coincide con la (4.9) per $k_g=k_l$.

E' utile osservare che nella terminologia di Whalley [16] il parametro di Martinelli è utilizzato nello studio delle cadute di pressione nei condotti in regime bifase. Considerando le portate effettive di liquido e di gas nel condotto, con riferimento ai gradienti della caduta pressione per attrito lungo il condotto di diametro d si ha:

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_g} \quad (4.11)$$

Come riportato da Whalley , sulla base della formulazione di Chisholm, per i moltiplicatori bifase, nel caso di un deflusso omogeneo si ha:

$$X^2 = \frac{\Delta p_l}{\Delta p_g} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_l} \quad (4.12)$$

Si deduce che:

$$X_{ML} = \sqrt{X^2} = \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (4.13)$$

Spesso il parametro Martinelli è correlato con i parametri della miscela (titolo, densità e viscosità) con la:

$$X_{LM} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (4.14)$$

Per la stima della portata, in un condotto interessato da un deflusso di tipo anulare o più in generale ad elevata frazione di vuoto (< 95 %), frequentemente si utilizza la (4.4) con K costante, la densità riferita alla sola fase gassosa e la portata stimata con la:

$$Q_{mg,app} = K\sqrt{2\rho_g \Delta p_t} \quad (4.15)$$

Si tratta di una portata apparente che, per essere ricondotta alla portata della fase gas, è necessario correggere con opportuni fattori o meglio funzioni correttive che tengano conto di altri parametri. In condizioni monofase in fase solo gas e con riferimento alla portata in massa effettiva per il gas si ha:

$$Q_{mg} = K\sqrt{2\rho_g \Delta p_g} \quad (4.16)$$

Il rapporto tra le due portate (4.15) e (4.16) definisce il fattore correttivo Φ_g

$$\Phi_g = \frac{Q_{mg,app}}{Q_{mg}} = \sqrt{\frac{\Delta p_t}{\Delta p_g}} \quad (4.17)$$

Il problema della misura è ricondotto alla formulazione di opportune correlazioni per il fattore correttivo Φ_g sulla base di ulteriori dati sulle caratteristiche del deflusso e segnali generati dal processo di misura.

4.1 Cadute di pressione nei tubi di Venturi

Per la caratterizzazione della fluidodinamica dei condotti tipo Venturi in regime bifase si ritiene utile considerare l'esperienza acquisita nello studio dei fenomeni e delle prestazioni dei Venturi-scrubbers molto utilizzati nell'impiantistica dell'industria chimica. I condotti con geometria del tipo "tubi di Venturi" sono utilizzati con deflussi bifase negli scrubbers per realizzare processi di trasporto di massa tra le due fasi [17]. La caratterizzazione delle perdite di carico Δp tra l'ingresso e la sezione minima (gola) è descritta da correlazioni semiempiriche del tipo:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_g u_{gt}^2}{2} \quad (4.18)$$

dove:

u_{gt} è la velocità della fase gas nella sezione minima

ρ_g è la densità della fase gas

ζ è il coefficiente per la stima delle perdite di carico:

$$\zeta = k_1 + k_2 \left(\frac{J_1}{J_g} \right) \quad (4.19)$$

Dove

J_1 e J_g sono le velocità superficiali per le due fasi,

k_1, k_2 sono parametri empirici.

Si osserva che l'analisi dei dati sperimentali realizzati nelle diverse campagne di prova, qualunque sia la geometria, non può prescindere dalla caratterizzazione dell'apparato con i coefficienti empirici k_1 , k_2 e ζ .

Oltre alla caduta di pressione descritta dalla (4.18), che caratterizza la parte convergente del Venturi, interessano anche le cadute di pressione irreversibili associate all'intero Venturi o alla parte divergente.

Per rappresentare le perdite di carico irreversibili si possono usare correlazioni del tipo:

$$dp_{\text{irr}} = k_1 (\rho_g J_g^{k_2}) \left(\frac{J_1}{J_g} \right)^{k_3} + k_4 \quad (4.20)$$

Per il Venturi utilizzato in questo studio in configurazione verticale e moto verso l'alto i coefficienti di riferimento che descrivono le perdite di carico irreversibili sono:

$$k_1=0.2696, k_2=2; k_3=0.13 \text{ e } k_4=-2.9786.$$

Una approfondita caratterizzazione deve anche considerare, definita la geometria, le dimensioni delle gocce, i fenomeni di trascinamento (drag), la formazione del film liquido alle pareti, la giacitura.

Rilevanti sono :

- a) le perdite di carico per attrito alla parete e all'interfaccia;
- b) le perdite di carico per accelerazione per la fase gas (perdite reversibili);
- c) le perdite per accelerazione associate alla fase liquida (gocce);
- d) le perdite di carico gravitazionali.

La portata in massa fluente nel condotto è da stimare attraverso la misura della pressione differenziale tra monte e la sezione contratta ed eventualmente attraverso la misura della pressione differenziale tra monte e valle del Venturi. Utile può essere la pressione differenziale nella regione divergente.

Per discriminare un deflusso monofase da uno bifase si può procedere con l'uso di modelli numerici che, data la geometria, permettono di confrontare le perdite di carico stimate con quelle misurate con un approccio di tipo parametrico.

Per migliorare l'accuratezza del processo di misura le risposte degli strumenti, in definiti campi di funzionamento, sono da analizzare sulla base dei fenomeni che si osservano nell'interazione tra le due fasi e delle differenze di comportamento dello strumento rispetto al caso monofase in modo da introdurre le opportune correzioni e migliorare il processo di misura. Importante è il ruolo delle velocità delle fasi liquida e gassosa all'ingresso dello SP oltre che del flow pattern.

Un recente studio di Salque et. al. [18] ha messo in evidenza, nella misura di deflussi bifase ad elevata frazione di vuoto ed in regime anulare, l'importanza del rateo di produzione di gocce nei tubi di Venturi ed anche le proprietà fisiche (viscosità e tensione superficiale). E' importante caratterizzare l'entrainment che dipende dall'angolo θ della regione convergente.

Secondo Azzopardi e Golan (1984) [19] l'entrainment è una funzione dell'angolo della regione convergente θ . Secondo Fernandez-Alonso (1999) [20] Azzopardi e Golan sovrastimano l'entrainment ed essi propongono una nuova correlazione per la stima dell'entrainment basata sul numero di Weber del film e su un numero di Weber critico funzione dell'angolo di convergenza della sezione critica.

L'entrainment, definito come una frazione della portata del film liquido che entra nel core gassoso in forma di gocce come riportato in [18], è dato da:

$$E_f = 1 - \left(\frac{We_{crit}}{We} \right)^n \quad (4.21)$$

con n dipendente dall'angolo del condotto convergente e We dato dalla relazione :

$$We = \frac{\rho_g J_{sg}^2 \delta}{\sigma} \quad (4.22)$$

dove J_{sg} è la velocità superficiale del gas nella sezione minima e δ è lo spessore del film liquido. We_{crit} è espresso da:

$$We_{crit} = 0.1857 \left(90 - \frac{\theta}{2} \right) - 5.17 \quad (4.23)$$

con θ in gradi.

La caratterizzazione del deflusso bifase e delle cadute di pressione lungo il Venturi richiede quindi l'elaborazione dei dati sperimentali in modo da stimare dei coefficienti empirici da correlare ai numeri di Reynolds, Froude, Weber. Una grandezza importante è rappresentata dalla densità della miscela bifase. Si tratta di una grandezza, funzione del titolo x, della densità delle fasi ρ_g e ρ_l , e del flow pattern. Con riferimento ad un modello a fasi separate, una grandezza rappresentativa del deflusso è il rapporto di scorrimento o slip S che interviene nella stima della densità della miscela.

Il rapporto di scorrimento S si può valutare con la relazione:

$$S = \frac{u_g}{u_l} = \frac{x}{1-x} \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (4.24)$$

Per la stima di S occorre conoscere oltre al titolo anche la frazione di vuoto. Spesso S è una funzione delle sola densità e quindi della pressione; più in generale dipende dal flow pattern. Sono disponibili in letteratura numerose correlazioni semiempiriche per la stima di S.

L'elaborazione delle misure, in deflusso bifase, sviluppata da dos Reis e Goldstein [8] considera diverse ipotesi per deflusso nel Venturi: fissato il titolo ed eventualmente la frazione di vuoto, sono ipotizzati per la stima della densità della miscela bifase i modelli omogeneo, a slip costante (CSM Constant Slip model) e a fasi separate (SFM Separated Flow Model).

In tabella 10 si riportano le relazioni che permettono di stimare tali densità.

Modello	Relazione
Omogeneo	$\frac{1}{\rho_h} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{(1-x)}{\rho_l}$ (4.25)
A slip costante (CSM)	$\frac{1}{\rho_{CSM}} = \frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_l}$ (4.26)
A fasi separate (SFM)	$\rho_{SFM} = \left[\alpha \sqrt{\rho_g} + (1-\alpha) \sqrt{\rho_l} \right]^2$ (4.27)

Tab. 10 Correlazioni per la stima della densità di una miscela bifase

Nel riferimento [8] si riportano le correlazioni per il rapporto di scorrimento S proposte da Chisholm [21] per i sistemi di strozzamento. Esse sono:

$$S = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.25} \quad (4.28)$$

per gli elevati titoli ovvero per il parametro di Martinelli $X_{LM} < 1$;

$$S = \left[1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right]^{0.5} \quad (4.29)$$

per $X_{LM} > 1$ ovvero per bassi titoli.

Secondo Abdul-Razzak et al [22] è possibile stimare, nei tubi di Venturi, la frazione di vuoto con la relazione:

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = 0.49 X_{LM}^{0.8036} \quad (4.30)$$

oppure con la:

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = 0.1531 X_{LM}^{0.9833} \quad (4.31)$$

4.2 Modelli di un tubo di Venturi in regime bifase

Per la stima della portata del gas con le relazioni (4.15), (4.16) e (4.17) si ha:

$$Q_{mg} = \frac{Q_{mg,app}}{\Phi_g} = \frac{K \sqrt{2\rho_g \Delta p_t}}{\Phi_g} \quad (4.32)$$

Per una accurata stima della portata della fase gas è necessario disporre di correlazioni per il fattore correttivo Φ_g . Questo fattore correttivo, per consentire una corretta stima di entrambe le due fasi deve dipendere da un numero di parametri stimabili sulla base di segnali degli strumenti costituenti lo SP e questi devono descrivere in modo adeguato il titolo della miscela in modo indiretto attraverso la frazione di vuoto, lo slip ecc.

L'obiettivo, purtroppo non raggiunto, è quello di realizzare una adeguata accuratezza nella misura della portata in massa del gas e della portata totale con tecnologie affidabili, semplici e, possibilmente, poco costose.

In regime monofase e per la fase gas la (4.16) $Q_{mg} = A_t k_g \sqrt{2\rho_g \Delta p_g}$ assicura una accuratezza accettabile in ambito industriale sia con dispositivi ad orifizio che con tubi di Venturi nei campi di impiego in accordo con gli standard. Per un deflusso omogeneo la cui densità è data dalla (4.25) e K (4.32) è costante, con l'ipotesi che la legge che descrive il funzionamento di un tubo di Venturi sia ancora valida si ha:

$$Q_{mg} = \frac{xk_g A_t \sqrt{2\rho_g \Delta p_t}}{\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l} + x \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_l}\right)}} \quad (4.33)$$

Per $x=1$ la (4.33) coincide con la (4.16).

Per poter usare in modo efficace la precedente relazione occorre quindi conoscere il titolo x . Si ha necessariamente la necessità di effettuare misure della frazione di vuoto per stimare x oppure di un'altra grandezza proporzionale ad x e Q_{mg} , quale per esempio le perdite di carico irreversibili.

In presenza di un deflusso non omogeneo la precedente relazione non è applicabile senza introdurre opportuni fattori correttivi. Per riconoscere il tipo di deflusso è in generale di ausilio l'analisi statistica dei segnali misurati. Stimando la portata di gas con la (4.15) si ha una sovrastima della portata di gas. Fang e Zhang (2008) [23] considerano il fattore correttivo Φ_g come una sovra lettura (overreading) della misura della portata del gas. Si tratta di una funzione del parametro di Martinelli e del rapporto di scorrimento secondo la:

$$\Phi_g = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{S} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} + S \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) X_{LM} + X_{LM}^2} \quad (4.34)$$

Per la stima di questo fattore correttivo numerosi lavori sperimentali sono stati effettuati, in particolare da Murdock [24], Chisholm [21], De Leeuw.

In tabella 11 si riportano alcune correlazioni disponibili nella letteratura aperta.

Autore	Correlazione	Riferimento
Murdock (1962) [24]	$\Phi_g = 1.26X_{LM} + 1.0$ (4.35)	Orifizi
Chisholm (1977) [21]	$\Phi_g = \sqrt{1 + 2.66X_{LM} + X_{LM}^2}$ (4.36a) $\Phi_g = \sqrt{1 + CX_{LM} + X_{LM}^2}$ (4.36b) $C = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} + S \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$ (4.36c) oppure: $C = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^n + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^n$ (4.36d) $n=0.25$	orifizi riferimento portata del liquido $S = \text{slip ratio}$ C parametro di Chisholm
Lin (1982)	$\Phi_1 = \frac{1-x}{x} \theta + \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$ (4.37)	orifizi $(\rho_g/\rho_l)=0.0045 - 0.328$ $D=8 - 75 \text{ mm}$

	$\theta = 1.48625 - 9.26541 \frac{\rho_g}{\rho_l} + 44.6954 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^2 - 60.615 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^3 +$ $- 5.12966 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^4 + 26.5743 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^5 \quad (4.37a)$	
De Leeuw (1997)	$\Phi_g = \sqrt{1 + CX_{LM} + X_{LM}^2} \quad (4.38)$ $C = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^n + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^n \quad (4.38a)$ <p>n=0.41 per Fr_g = 0.5 - 1.5 n = 0.606(1.0 - exp(0.706Fr_g)) per Fr_g > 1.5</p>	tubi di Venturi
Steven [14] (2002)	<p>surface fit software</p> $\sqrt{\frac{\Delta p_{TP}}{\Delta p_g}} = \frac{1 + AX_{LM} + BFr_g}{1 + CX_{LM} + DFr_g} \quad (4.39)$ $A = 2454.51 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^2 - 389.568 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) + 18.146 \quad (4.39a)$ $B = 261.695 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^2 - 8.349 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) + 0.223 \quad (4.39b)$ $C = 1722.917 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^2 - 272.92 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) + 11.752 \quad (4.39c)$ $D = 57.387 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^2 - 7.679 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) + 0.195 \quad (4.39d)$	tubo di Venturi

Tab. 11 Correlazioni per i moltiplicatori bifase nei dispositivi a strozzamento

Nel modello di Lin (1982) il fattore di correzione è stimato con riferimento alla misura della portata liquida con un Venturi in regime monofase. Per la stima della portata gas si perviene alla relazione:

$$Q_{mg} = \frac{k_l A_t x \sqrt{2\rho_l \Delta p_t}}{\theta(1-x) + x \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}} = \frac{k_l A_t \sqrt{2\rho_g \Delta p_t}}{\theta \left(\frac{Q_{ml}}{Q_{mg}} \right) \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l} + 1}} \quad (4.40)$$

Nell'impiego di un tubo di Venturi come misuratore di portata in un regime anulare /e/o disperso i fenomeni più rilevanti da modellizzare, per l'effetto che hanno sulle pressioni differenziali misurate, sono:

- l'interazione gas/liquido in prossimità del film liquido alla parete;
- i fenomeni di entrainment/deposition ed interazione con la regione del core.

Si tratta di fenomeni che influenzano la distribuzione delle fasi e quindi la frazione di vuoto oltre che l'equilibrio meccanico delle interfacce. La geometria ed i range di velocità controllano i fenomeni di distacco della vena fluida e quindi il comportamento del misuratore.

Modelli teorici che permettono di descrivere il funzionamento dei misuratori di portata in presenza di gas umidi sono dovuti a Cadalen e Lance [25], a He e Bai [26].

5. Modello di un tubo di Venturi con deflusso a fasi separate e misura della frazione di vuoto a monte e nella gola.

Si tratta del modello sviluppato da Hasan e Lucas [7]. Tra la sezione di ingresso (1) del Venturi e la sezione di ingresso della gola (2) si applica, per la sola fase gas, il teorema di Bernoulli, considerando per applicazioni nella configurazione verticale il contributo dell'elevazione Δp_H

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_{g1} u_{g1}^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_{g2} u_{g2}^2 + \Delta p_H \quad (5.1)$$

Si ipotizza una espansione adiabatica per la fase gas e quindi le pressioni sono espresse applicando la legge dei gas per una trasformazione con coefficiente γ , rapporto dei calori specifici a pressione e volume costante:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_{g1}^\gamma}{\rho_{g2}^\gamma} \quad (5.2)$$

Si ipotizza di misurare le frazioni di vuoto a monte e nella gola del Venturi. Dalla equazione di continuità per la fase gas segue:

$$u_{g2} = u_{g1} \left(\frac{\alpha_1 A_1}{\alpha_2 A_2} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{-1/\gamma} \quad (5.3)$$

dove α_1, α_2 sono le frazioni di vuoto nelle sezioni 1(a monte) e 2 (nella gola).

Introducendo il coefficiente di efflusso C_{Dg} per la fase gassosa, segue:

$$Q_{g,\text{predicted}} = C_{Dg} \frac{A_1 A_2 \alpha_1 \alpha_2 \sqrt{2 \rho_{g1} (\Delta p_t - \Delta p_H)}}{\sqrt{(\alpha_1 A_1)^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{-1/\gamma} - (\alpha_2 A_2)^2}} \quad (5.4)$$

Per un condotto orizzontale Δp_H è nullo.

Per quanto riguarda il contributo dell'elevazione si introduce la frazione di vuoto media:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (5.5)$$

Le tre lunghezze caratteristiche del Venturi in termini di lunghezza della regione convergente, della gola e del diffusore devono essere ben note:

$$\Delta p_H = gL_c [\rho_1(1-\alpha_1) + \alpha_1\rho_{g1}] + gL_t [\rho_1(1-\bar{\alpha}) + \bar{\rho}_g\bar{\alpha}] + gL_d [\rho_1(1-\alpha_2) + \rho_{g2}\alpha_2] \quad (5.6a)$$

$$\rho_{g2} = \rho_{g1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\gamma} \quad (5.6b)$$

$$\rho_{g1} = \frac{p_1 M}{1000RT_1} \quad (5.6c)$$

$$C_{Dg} = \frac{Q_{mg,ref}}{Q_{mg,predicted}} = 0.932 \quad (5.6d)$$

In questo modello il ruolo del film liquido è implicitamente conteggiato attraverso la misura della frazione di vuoto ed in regime di “ wet gas “ con frazione di vuoto maggiore di 0.95 all’ingresso e 0.93 nella sezione minima gli autori stimano errori inferiori al 2% per la portata della fase gassosa. Nel modello non è formulata una metodologia per la stima della portata liquida.

6. Modello del Venturi in annular flow con misura dello spessore del film

Lupeau et al. [27] hanno studiato il comportamento del Venturi in una configurazione verticale con moto verso il basso e deflusso anulare. In corrispondenza della gola è misurato lo spessore del film liquido con un metodo a conduttanza elettrica sviluppato da Hewitt. I processi di taratura e messa a punto hanno portato a caratterizzare lo spessore del film a monte del Venturi, con la relazione:

$$\mu_l \frac{U_{film}}{\delta_m} = C Re_g^{-0.25} \rho_g J_g^2 \quad (6.1)$$

dove U_{film} è la velocità di bulk del film, δ_m spessore medio del film, μ_l è la viscosità del liquido.

Il modello proposto è un modello ad una dimensione (nella direzione del moto) in cui si applicano le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto alla fase gassosa, alle gocce e al film liquido. Lo sforzo di taglio all’interfaccia del film è modellizzato nella direzione x , con la correlazione di Wallis:

$$\tau_i(x) = \frac{0.3164}{Re^{0.25}(x)} \left(1 + 300 \frac{\delta_m(x)}{R} \right) \frac{1}{2} \rho_g J_g^2(x) \quad (6.2)$$

dove R è il raggio del condotto e Re è il numero di Reynolds basato sulla velocità superficiale del gas.

Il modello permette di studiare la portata del film, il processo di produzione delle gocce, il campo di pressione. Si tratta di un modello interessante per lo studio teorico dei fenomeni che si manifestano in un Venturi interessato da un deflusso bifase; tuttavia non risulta di interesse

pratico nell'uso del modello come metodologia per la stima della portata. In ogni caso i dati sperimentali hanno consentito di costruire in diverse condizioni operative l'andamento del fattore di correzione di Φ_g in funzione del parametro di Martinelli e quindi risalire alla portata della fase gas con una buona precisione.

Le ipotesi considerate nel modello di Lupeau et. sono:

- nella regione convergente è trascurabile il trasferimento di massa tra il film e il core;
- nella regione di sezione minima sono probabili i processi di produzione di gocce con trasferimento di massa nel core e quindi processi di entrainment;
- all'ingresso della sezione minima al film è associato il numero di Weber, al quale è proporzionale la portata atomizzata in corrispondenza della gola.

Le relazioni utilizzate sono :

$$Q_{m,d,throat} (l/h) = 0.0036 We_f^{3.4} \quad (6.3)$$

$$d_{d,throat} = \left(\frac{15.4}{We^{0.58}} + 3.5 \frac{\rho_g Q_{md_upstream}}{\rho_d Q_{mg}} \right) \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_d g}} \quad (6.4)$$

dove :

$Q_{m,d,throat}$ upstream è la portata della gocce nella regione divergente

ρ_d è la densità delle gocce

7. Modello di un tubo di Venturi secondo Cadalen-Lance[25] con misura della frazione di vuoto nella gola

Si considera un tubo di Venturi interessato da un deflusso anulare in cui si misura la frazione di vuoto in corrispondenza della gola. La tecnologia utilizzata è quella dei raggi gamma con una sorgente di cesio. E' formulato un modello 1D in cui le equazioni della massa, quantità di moto ed anche dell'energia sono risolte considerando un moto disperso per la regione centrale e il film liquido alla parete. Per il gas si considera una espansione politropica. I fenomeni di entrainment sono studiati sulla base delle correlazioni di Ishii- Mishima [28] .

Con riferimento alla direzione z del moto del fluido sia A la sezione trasversale del Venturi. Indicando con $i= g,d,f$ rispettivamente la fase gas, le gocce o fase dispersa e il film liquido, con α la frazione areica della fase considerata e con u la velocità, si hanno le equazioni di conservazione.

Per la massa:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i u_i A)}{\partial z} - \dot{m}_i = 0 \quad (7.1)$$

per la quantità di moto:

$$\alpha_i \rho_i u_i \frac{\partial u_i}{\partial z} + \alpha_i \frac{\partial p}{\partial z} - F_i = 0 \quad (7.2)$$

per l'energia:

$$\frac{\partial(u_i h_i)}{\partial z} - \dot{q}_i = 0 \quad (7.3)$$

dove h_i è l'entalpia e q_i è la potenza termica volumica trasferita alla fase i .

In ogni sezione devono essere verificate le relazioni di congruenza per le frazioni areiche:

$$\alpha_g + \alpha_d + \alpha_f = 1 \quad (7.4)$$

e per le portate in massa

$$\dot{m}_g + \dot{m}_d + \dot{m}_f = 0 \quad (7.5)$$

La portata in massa per ogni fase è data dalla:

$$Q_{m,i} = \dot{m}_i = \alpha_i \rho_i u_i A \quad (7.6)$$

e si considera un titolo in massa per il film e il core gassoso definiti da:

$$x_f = \frac{Q_{m,f}}{Q_{mt}} \quad (7.7)$$

$$x_c = \frac{Q_{m,c}}{Q_{mt}} \quad (7.8)$$

dove Q_{mt} è la portata totale.

Il trasferimento della quantità di moto attraverso l'interfaccia è studiato con l'ausilio dei fattori d'attrito per una interfaccia liscia f_s ed una soggetta ad instabilità f_i sulla base della correlazione proposta da Andritos:

$$\frac{f_i}{f_s} = 1 + w_1 \sqrt{\frac{\delta_f}{d}} \left(\frac{u_g}{u_{gc}} \right)^{w_2} \quad (7.9)$$

dove δ_f è lo spessore del film, w_1 è una costante empirica, d è il diametro del condotto.

La frazione di vuoto osservata dai dati sperimentali è stimata con la correlazione:

$$\Gamma_g = \frac{1}{\lambda_g - \lambda_l} \left(\frac{1}{d} \ln \left(\frac{n_0}{n} \right) - \lambda_l \right) \quad (7.10)$$

dove:

n_0 ed n , sono i conteggi a vuoto ed in presenza del deflusso

λ_g e λ_l sono i coefficienti di attenuazione lineare in presenza di tutto gas e tutto liquido.

Questa è corretta per tener conto della presenza delle gocce nel core gassoso con la:

$$\alpha_g = \Gamma_g^2 \left(1 + e_d \frac{q_g}{q_l} \right) \quad (7.11)$$

Questo modello ha le stesse difficoltà e limitazioni osservate per il modello di Hasan e Lucas [7]. E' interessante per l'analisi dei fenomeni fluidodinamici, nota la geometria, le portate imposte e la frazione di vuoto, ma è di modesta rilevanza in un processo di misura e quindi di stima delle portate. Gli autori, consapevoli di questa difficoltà, hanno riconsiderato il modello con una struttura zero-dimensionale utilizzando per la stima della portata la classica formula che descrive il funzionamento di un tubo di Venturi:

$$Q_{m,t} = C\varepsilon A_t \sqrt{\frac{2\rho\Delta p_t}{1-\beta^4}} \quad (7.12)$$

ma utilizzando per la densità il valore medio dato dalla correlazione:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x_f^2}{\alpha_f \rho_f} + \frac{x_c^2}{\alpha_c \rho_c} \quad (7.13)$$

in quanto il processo di misura consente di avere le informazioni sulle due frazioni di vuoto nel film e nel core.

Il prodotto $C\varepsilon$ è correlato con parametri semiempirici al numero di Reynolds del core gassoso e del film liquido oltre che al numero di Weber e ciò ha consentito di stimare la portata del gas con una incertezza inferiore al 2.1 % e quella del liquido con una incertezza inferiore al 7.5 % per frazioni di vuoto tra il 95% e il 99%; e una incertezza sulla portata in massa totale inferiore al 1.6 %.

Secondo gli autori, nella ricerca del minimo numero di parametri semiempirici che consentano la stima della portata di un deflusso bifase rappresentato dal wet gas, misurando la pressione differenziale del Venturi e la frazione di vuoto nella gola sono sufficienti quattro parametri che consentono di stimare le portate delle due fasi con adeguata accuratezza. Il deflusso è caratterizzato in termini di rapporto di scorrimento e di densità media nel core sulla base dei numeri di Reynolds e di Weber. In questo modo gli effetti della formazione del film e dei processi di atomizzazione sono conteggiati con riferimento alla geometria utilizzata.

8. Sensori e tecniche tomografiche per la misura della frazione di vuoto e/o densità

Numerosi e costosi studi sono in atto per lo sviluppo di tecniche tomografiche per la misura della frazione di vuoto. Si citano i recenti lavori svolti in Germania presso l'Institute for safety research Helmholtz-Zentrum Dresden –Rossendorf [29], il centro di Julich [30] e in Cina [31].

Si osserva che la misura della frazione di vuoto nei fasci di barre con metodi tomografici è complessa, costosa e deve soddisfare le seguenti specifiche:

- il fascio di radiazioni deve attraversare le pareti del fascio e quindi è richiesto l'impiego di fotoni ad elevata energia o neutroni;
- deve presentare una elevata risoluzione spaziale (scala millimetrica);

- il sistema deve essere robusto per operare in severe condizioni operative con adeguata semplicità.

E' stata utilizzata una sorgente collimata di Cs137 (185 GBq), dei rivelatori gamma ad alta risoluzione (320 scintillatori), una unità di stabilizzazione termica.

I metodi utilizzati per la ricostruzione del campo dei parametri elettrici del mezzo continuo prendono il nome di Metodi matematici per la ricostruzione di immagini tomografiche e sono noti le denominazioni: Linear back-projection method (LBP), Tikhonov regularization method, Truncated singular value decomposition, Landweber iterative algorithm, Neural network algorithm, Algebraic reconstruction technique, Simulated annealing algorithm, Genetic algorithm, Generalized vector sampled pattern matching method, Generalized Tikhonov regularization method, Homotopy method, Quantum Particle Swarm Optimization algorithm (QPSO).

Si tratta di metodologie numeriche disponibili in librerie numeriche che in generale soffrono nella richiesta di potenza e tempo di calcolo oltre che della necessità di rappresentare graficamente una notevole quantità di dati.

8.1 Tomografia ad impedenza elettrica capacitiva : ECT Method

Lo studio della frazione di vuoto con un metodo tomografico di tipo capacitivo necessita di tre componenti di base:

- a) un sensore multi elettrodo applicato ad un volume di controllo;
- b) una catena elettronica per la misura ed acquisizione dei segnali ;
- c) un sistema computerizzato per la ricostruzione delle immagini, l'interpretazione e visualizzazione.

L'applicazione di questa tecnica richiede lo studio del problema diretto e di quello inverso. Si stima il campo delle capacità elettriche tra gli elettrodi, nota la distribuzione della permittività elettrica, e successivamente note le capacità si ricostruisce la distribuzione della permittività.

Il campo elettrico è studiato considerando l'equazione:

$$\varepsilon(x, y)\nabla^2\Phi(x, y) + \nabla\varepsilon(x, y)\nabla\Phi(x, y) = 0 \quad (8.1)$$

dove:

$\varepsilon(x, y)$ permittività elettrica
 $\Phi(x, y)$ distribuzione del potenziale elettrico

La capacità elettrica C è descritta dalla:

$$C = \frac{Q}{V} = -\frac{1}{V} \iint_{\Gamma} \varepsilon(x, y)\nabla\Phi(x, y)d\Gamma = F(\varepsilon) \quad (8.2)$$

dove:

Q carica elettrica
V differenza di potenziale tra due elettrodi
C capacità elettrica tra gli elettrodi
 Γ superficie degli elettrodi.

La variazione della capacità a fronte di una piccola variazione della permittività è:

$$\delta C = \frac{dF}{d\varepsilon} \delta\varepsilon + O(\delta\varepsilon)^2 \quad (8.3)$$

Il modello linearizzato è descritto con la:

$$S G = C \quad (8.4)$$

dove:

S è la matrice di sensitività (m x n)

G è la matrice della distribuzione normalizzata della permittività n x 1

C è il vettore della capacità normalizzata m x 1.

In presenza di rumore r (m x 1)

$$S G = C + r \quad (8.5)$$

Il problema inverso è stimare G noto S e C. Si tratta di un problema mal posto con una soluzione molto sensibile ai dati di input. L'inversione diretta è spesso instabile. Sono disponibili codici commerciali che permettono la risoluzione di questo problema.

9. Risultati sperimentali: analisi e confronto con i modelli

9.1 Definizione di un modello semiempirico per la stima delle portate

L'analisi dei modelli di funzionamento di dispositivi tipo Venturi e misuratori ad impedenza del grado di vuoto porta ad osservare che da questi dispositivi sono generati dei segnali che rappresentano le risposte degli strumenti in termini di :

- pressioni differenziali tra monte e gola del Venturi;
- pressione differenziale tra monte e valle del Venturi;
- temperature di esercizio;
- pressione di esercizio;
- segnali elettrici che opportunamente elaborati permettono di descrivere la frazione di vuoto in alcune regioni dello spool piece (SP) ed eventualmente in termini di profili e di flow pattern.

L'analisi svolta nei cap. 4 e 5 porta a concludere che, note le caratteristiche degli strumenti dello SP per quanto riguarda il funzionamento in monofase gas ed eventualmente in monofase liquido per il Venturi e le sonde ad impedenza, la metodologia per la stima delle portate in massa delle due fasi richiede:

- a) l'aver effettuato una campagna di prove di funzionamento dello SP con portate imposte e definite condizioni operative;
- b) l'aver determinato nel campo di funzionamento di interesse dello SP delle correlazioni tra grandezze misurate nel corso delle prove e titolo della miscela o grandezze da cui sia possibile estrarre il titolo e un fattore di correzione della portata apparente osservata sulla base delle risposte del Venturi.

In alcuni regimi (wet gas) sembrano necessari solo due parametri semiempirici per la stima delle portate; nel caso di presenza di elevati spessori del film sembra che siano necessari quattro parametri in modo da caratterizzare la portata liquida nel film e nel core gassoso.

Le relazioni di riferimento di base (già riportate nel paragrafo 4) sono:

Portata della fase gas:

$$Q_{mg} = \frac{Q_{mg,app}}{\Phi_g} = \frac{K\sqrt{2\rho_g \Delta p_t}}{\Phi_g} \quad (4.32)$$

$$X_{LM} = \frac{Q_{ml}}{Q_{mg}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{1-x}{x} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = f(\alpha, \Delta p_v, \dots) \quad (4.33)$$

Dalla stima di X_{LM} , segue, nota la pressione, il titolo x , ed anche il fattore Φ_g da stimare con relazione del tipo:

$$\Phi_g = \sqrt{1 + CX_{LM} + X_{LM}^2} \quad (4.38)$$

$$C = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^n + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^n \quad (4.38a)$$

dove

$$n=0.41 \text{ per } Fr_g = 0.5 - 1.5$$

oppure:

$$n = 0.606(1.0 - \exp(0.706Fr_g)) \quad \text{per } Fr_g > 1.5$$

L'adeguata stima di x e del fattore Φ_g porta a stimare la portata della fase liquida come:

$$Q_{ml} = Q_{mg} \left(\frac{1-x}{x}\right) = Q_{mg} X_{LM} \left(\sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}\right) \quad (9.1)$$

e quindi per la portata totale:

$$Q_{mt} = Q_{ml} + Q_{mg} \quad (9.2)$$

Per l'utilizzo di questo modello è molto critica ed importante la correlazione utilizzata per Φ_g , che dovrebbe essere funzione di grandezze funzioni delle misure effettuate in prossimità del Venturi con lo SP ed in particolare: pressione, temperatura, pressioni differenziali, frazione di vuoto.

9.2 Risultati sperimentali e loro analisi

Le due campagne di prova riportate nelle tabelle 8a e 8b in termini di dati grezzi sono state elaborate in modo da disporre di grandezze fisiche ingegneristiche ed anche di verificarne la congruenza e ripetibilità. Ogni prova (tabelle 12a e 12b) è stata caratterizzata dai seguenti dati: frequenza imposta dall'inverter, pressione assoluta, portata per le fasi gas e liquida, portata totale, titolo, temperatura della miscela all'ingresso del tubo di Venturi, frazione di vuoto misurata attraverso l'intercettazione del deflusso e riferita all'intero SP, pressioni differenziali nel Venturi tra ingresso e gola e perdita di carico irreversibile nel Venturi.

Le prove effettuate, nelle due serie , fanno riferimento a tre differenti frequenze imposte con l'inverter e quattro differenti portate di acqua regolate manualmente.

Si può osservare che, ripetendo le prove a frequenza costante, la portata d'aria è sostanzialmente costante.

N°prova	f inverter	P [bar]	Wg [kg/s]	Wl [kg/s]	Wtot [kg/s]	x	Tin TS [C]	T VFM [C]	alpha	Dp V [mbar]	Dp Virr [mbar]
1	30	0.996	0.065	0.004	0.069	0.9436	26	23	0.9950	16.744	8.813
2	30	0.992	0.064	0.008	0.072	0.8849	24	23	0.9907	16.160	10.212
3	30	0.990	0.063	0.021	0.084	0.7523	24	23	0.9874	15.705	9.772
4	30	0.991	0.063	0.028	0.090	0.6932	24	23	0.9854	15.416	9.913
5	30	0.992	0.063	0.039	0.101	0.6170	24	23	0.9787	15.278	10.814
6	40	0.999	0.082	0.004	0.086	0.9485	26	24	0.9973	27.667	14.594
7	40	0.998	0.081	0.008	0.090	0.9071	26	24	0.9960	27.524	15.502
8	40	0.998	0.081	0.021	0.101	0.7947	26	24	0.9920	27.083	16.682
9	40	1.000	0.080	0.028	0.108	0.7421	27	25	0.9894	26.636	18.849
10	40	1.000	0.079	0.039	0.118	0.6708	27	25	0.9874	26.209	20.468
11	50	1.004	0.096	0.004	0.100	0.9613	30	28	0.9980	41.102	23.333
12	50	1.006	0.097	0.008	0.105	0.9211	30	28	0.9977	41.843	25.170
13	50	1.011	0.098	0.021	0.119	0.8250	29	28	0.9970	42.428	27.846
14	50	1.010	0.099	0.028	0.127	0.7809	29	28	0.9960	43.319	30.001
15	50	1.011	0.099	0.039	0.138	0.7182	29	28	0.9950	43.616	32.403

Tab. 12a Grandezze fisiche per le prove sperimentali (prima serie)

N°prov a	f inverter	P [bar]	Wg [kg/s]	Wl [kg/s]	Wtot [kg/s]	x	Tin TS [C]	T VFM [C]	alpha	Dp V [mbar]	D p
1	30	0.984	0.063	0.004	0.067	0.9422	25	26	0.9969	14.888	8.131
2	30	0.985	0.063	0.008	0.071	0.8836	25	24	0.9903	15.067	11.306
3	30	0.987	0.063	0.021	0.084	0.7515	24	24	0.9846	15.517	9.864
4	30	0.987	0.063	0.028	0.091	0.6947	24	24	0.9823	16.027	10.640
5	30	0.990	0.063	0.039	0.102	0.6194	24	24	0.9783	16.658	11.788
6	40	0.992	0.085	0.004	0.089	0.9564	26	24	0.9975	26.279	15.182
7	40	0.995	0.085	0.008	0.093	0.9108	26	25	0.9969	26.768	16.408
8	40	0.996	0.085	0.021	0.105	0.8024	26	26	0.9932	27.304	17.378
9	40	0.998	0.084	0.028	0.112	0.7525	26	25	0.9896	27.373	18.359
10	40	0.997	0.084	0.039	0.123	0.6843	26	25	0.9876	28.821	20.422
11	50	1.001	0.102	0.004	0.106	0.9634	29	28	0.9979	41.041	23.273
12	50	1.007	0.103	0.008	0.111	0.9251	28	27	0.9969	41.435	25.688
13	50	1.006	0.104	0.021	0.124	0.8328	28	28	0.9956	42.176	28.102
14	50	1.009	0.103	0.028	0.131	0.7879	28	27	0.9956	42.973	29.709
15	50	1.012	0.103	0.039	0.142	0.7264	27	26	0.9949	44.220	32.187

Tab. 12b Grandezze fisiche per le prove sperimentali (seconda serie).

In tabella 13 si riportano i valori medi, minimi e massimi osservati insieme alla variazione percentuale. Per le portate di acqua i valori riportati sono i valori nominali letti sulla scala del rotametro.

f	30	40	50	Hertz
Q _{ma}	0.063328	0.082583	0.100463	kg/s
min	0.062589	0.079167	0.096383	kg/s
max	0.06494	0.085162	0.103632	kg/s
var	3.712839	7.259612	7.214997	%

Tab. 13 Portate medie in massa di aria realizzate e loro variazione percentuale

In tabella 14 è mostrata l'influenza della portata della fase liquida per $f = 30$ sulle pressioni differenziali misurate con il Venturi.

Sulla base dell'analisi fatta nel capitolo 4, ai fini del processo di misura, i parametri più importanti che intervengono sono il rapporto delle densità gas/liquido, che è influenzato dalla pressione assoluta e dalla temperatura, il parametro di Lockart- Martinelli definito dalla 4.10 e il coefficiente di correzione della portata gassosa definito dalla 4.17.

Q _l (l/h)	D _p V [mbar]	D _p Virr [mbar]	scarti % V	scarto irr %
14	15.81615943	8.471944903	11.73651	8.059075
30	15.61385852	10.75907024	6.999582	-10.1674
75	15.71500898	9.61550757	0.602178	-0.46411
100	15.72122011	10.27674226	1.204356	-0.92821
140	15.71811454	9.946124914	-3.88455	-7.07288
medie	15.71687232	9.813877976		

Tab. 14: Influenza della portata della fase liquida per $f=30$ sulle pressioni differenziali misurate con il Venturi

Le tabelle 15a e 15b riportano i risultati ottenuti in termini di velocità superficiali, velocità medie delle due fasi, rapporto di scorrimento, fattore di Martinelli, rapporto delle densità, coefficiente di correzione della portata gassosa.

N°Run	f inverter	J _g m/s	J _l m/s	u _g m/s	u _l m/s	S	XLM	Phi0	(dp _{Tp} /dp _g) ^{0.5}	(rho _g /rho _l) ^{0.5}
1	30	11.029	0.000774	11.084	0.155	71.39	0.002049	1.2517	1.143856	0.034243
2	30	10.916	0.001658	11.019	0.178	61.82	0.004444	1.2447	1.137522	0.034176
3	30	10.798	0.004145	10.936	0.328	33.31	0.011241	1.2417	1.134692	0.034146
4	30	10.700	0.005526	10.859	0.378	28.72	0.015117	1.2408	1.133894	0.034161
5	30	10.663	0.007737	10.895	0.363	29.94	0.021221	1.2386	1.131875	0.034188
6	40	13.886	0.000884	13.923	0.332	41.85	0.00186	1.2781	1.168025	0.034237
7	40	13.819	0.001658	13.874	0.415	33.36	0.003506	1.2815	1.171148	0.034222
8	40	13.691	0.004145	13.802	0.519	26.55	0.008844	1.2829	1.17235	0.034227
9	40	13.599	0.005526	13.745	0.519	26.44	0.011882	1.2820	1.171561	0.034199
10	40	13.471	0.007737	13.644	0.612	22.26	0.016787	1.2833	1.172742	0.034209
11	50	16.506	0.000774	16.539	0.388	42.61	0.001374	1.3158	1.20245	0.0341

12	50	16.614	0.001658	16.653	0.712	23.36	0.002924	1.3179	1.204355	0.034128
13	50	16.681	0.004145	16.731	1.386	12.07	0.00726	1.3182	1.2046	0.034221
14	50	16.836	0.005526	16.903	1.386	12.19	0.009596	1.3203	1.206545	0.034206
15	50	16.842	0.007737	16.926	1.552	10.90	0.013425	1.3239	1.209824	0.034218

Tab. 15a Matrice delle prove sperimentali (prima serie): grandezze elaborate

N°Run	f inverter	Jg m/s	Jl m/s	ug m/s	ul m/s	S	XLM	Phi0	(dpTp/dpg)^0.5	(rhog/rhol)^0.5
1	30	10.98666	0.000774	11.020	0.2485	44.33889	0.002079	1.197696	1.094478	0.033876
2	30	10.88045	0.001658	10.987	0.1702	64.5189	0.004481	1.212106	1.107647	0.034003
3	30	10.81624	0.004145	10.985	0.2697	40.72143	0.011257	1.236004	1.129485	0.034041
4	30	10.85031	0.005526	11.045	0.3125	35.34247	0.014961	1.252096	1.14419	0.034043
5	30	10.83304	0.007737	11.072	0.3572	30.99372	0.020949	1.276714	1.166687	0.034092
6	40	14.57249	0.000774	14.608	0.3157	46.26668	0.001556	1.191295	1.088628	0.034115
7	40	14.53995	0.001658	14.585	0.5326	27.38349	0.003341	1.204685	1.100865	0.034124
8	40	14.49216	0.004145	14.590	0.6135	23.77996	0.008392	1.222307	1.116968	0.034079
9	40	14.38295	0.005526	14.534	0.5315	27.34527	0.011242	1.229621	1.123651	0.034177
10	40	14.372	0.007737	14.552	0.6247	23.29368	0.015761	1.263462	1.154577	0.034156
11	50	17.57512	0.000774	17.612	0.3650	48.24331	0.001293	1.236508	1.129945	0.034057
12	50	17.50268	0.001658	17.557	0.5326	32.96327	0.002769	1.242231	1.135175	0.034203
13	50	17.70469	0.004145	17.783	0.9340	19.03832	0.006857	1.241217	1.134248	0.034142
14	50	17.50373	0.005526	17.581	1.2454	14.11666	0.009219	1.263455	1.15457	0.034245
15	50	17.40375	0.007737	17.492	1.5171	11.52978	0.012939	1.284834	1.174106	0.034356

Tab. 15b Matrice delle prove sperimentali (seconda serie) : grandezze elaborate

Per caratterizzare le dispersioni dei dati sperimentali per quanto riguarda la coppia dei parametri frequenza dell'inverter, portata nominale dell'acqua le due principali grandezze di riferimento sono rappresentate dalle pressioni differenziali misurate con il Venturi.

Per una analisi dei risultati in fig.13 si riporta l'andamento del titolo sperimentale in funzione della frazione di vuoto. La riproducibilità si ritiene accettabile. La dispersione è probabilmente dovuta ai differenti fenomeni di entrainment ed anche all'effetto pressione e temperatura. Queste due ultime condizioni non sono facilmente riproducibili.

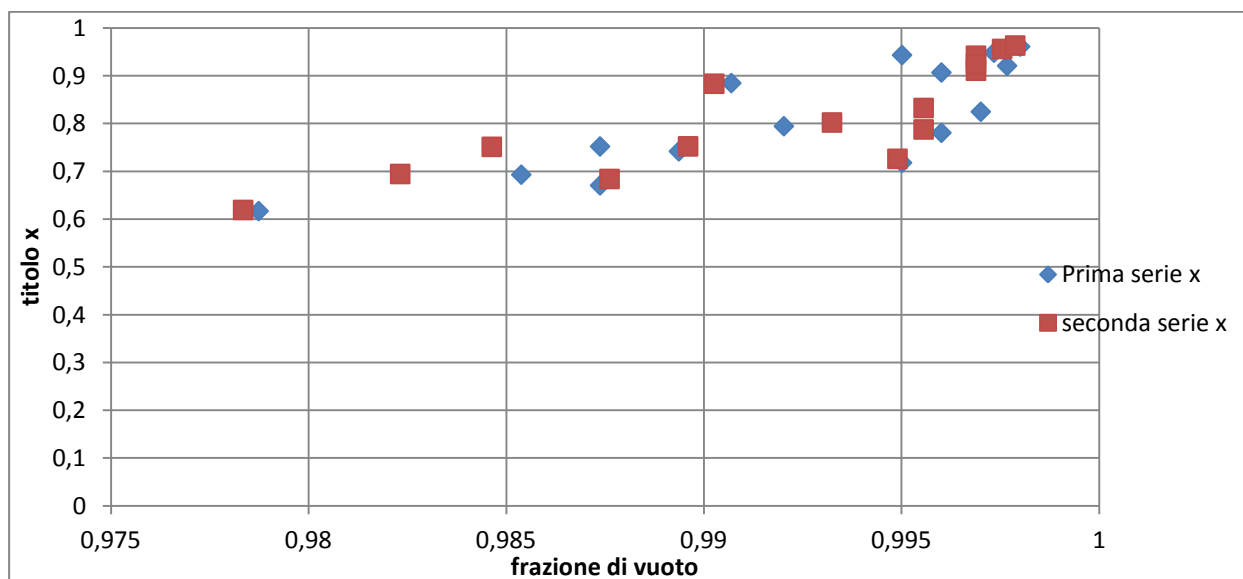


Fig.13 Andamento del titolo in funzione della frazione di vuoto.

Per quanto riguarda la risposta del Venturi, al variare della portata totale, è riportato per alcune prove, in fig. 14, l'andamento della pressione differenziale tra monte e gola utilizzando come parametro la velocità superficiale della fase liquida. Per $J_l=0$ la curva di riferimento è quella monofase con aria.

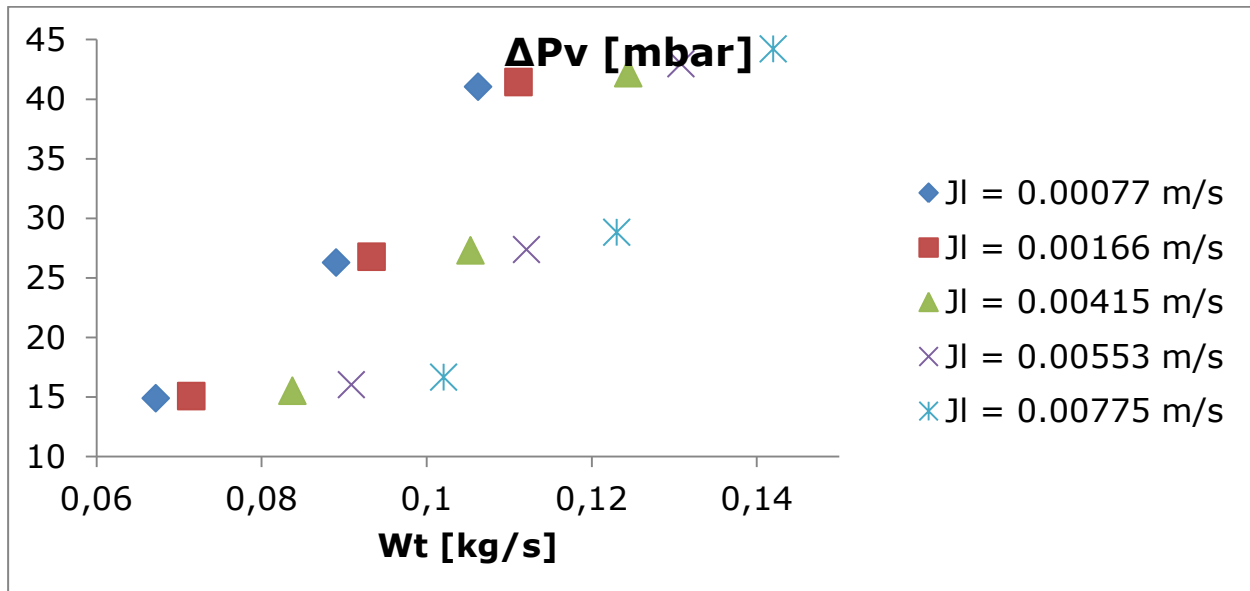


Fig. 14 Mappa di funzionamento del Venturi in regime bifase.

Si osserva come la pressione differenziale misurata dal Venturi aumenta con la portata totale. In fig. 15 si riporta l'andamento delle perdite di carico irreversibili misurate in funzione della caduta di pressione tra monte e gola del Venturi. Ogni punto della mappa è caratterizzato da una coppia portata in massa di aria ed acqua.

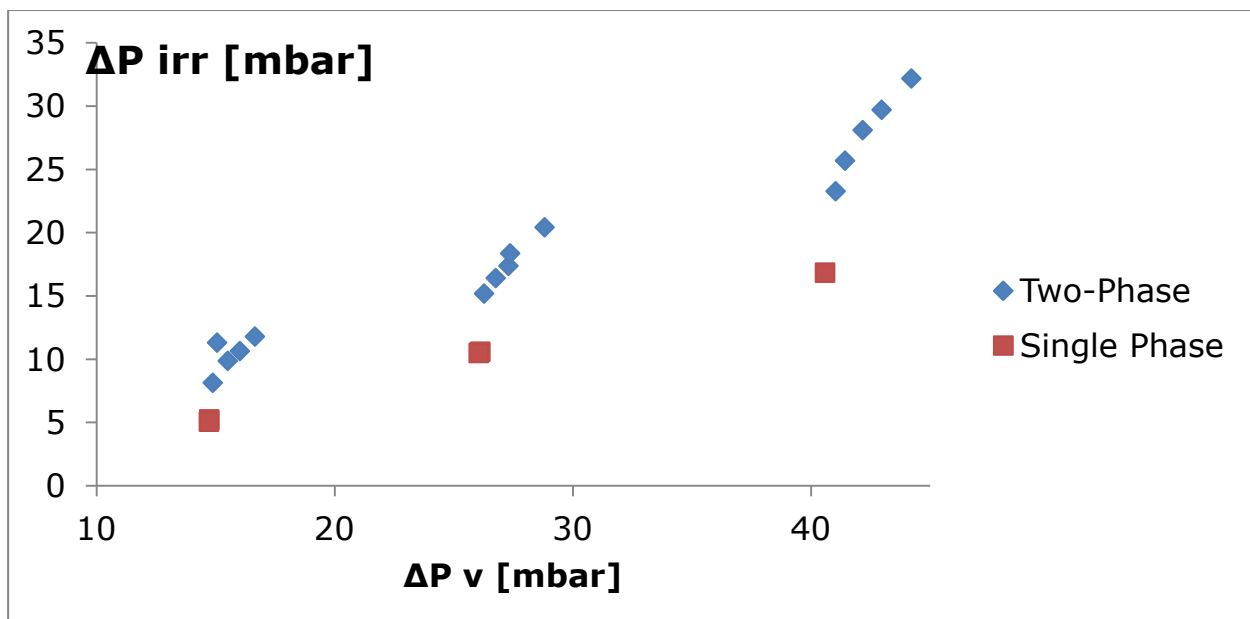


Fig 15. Perdite di carico irreversibili: influenza della miscela bifase.

Per caratterizzare i deflussi in termini di parametri caratteristici, le due serie sono state elaborate stimando: le due velocità superficiali, il parametro di Martinelli, il fattore di correzione della portata della fase gas Φ_g definito dalla 4.32.

L'analisi è finalizzata alla determinazione di X_{LM} e di Φ_g in funzione delle grandezze misurate.

In fig. 16 si riporta l'andamento del fattore di correzione in funzione del parametro di Martinelli X_{LM} per le trenta prove svolte.

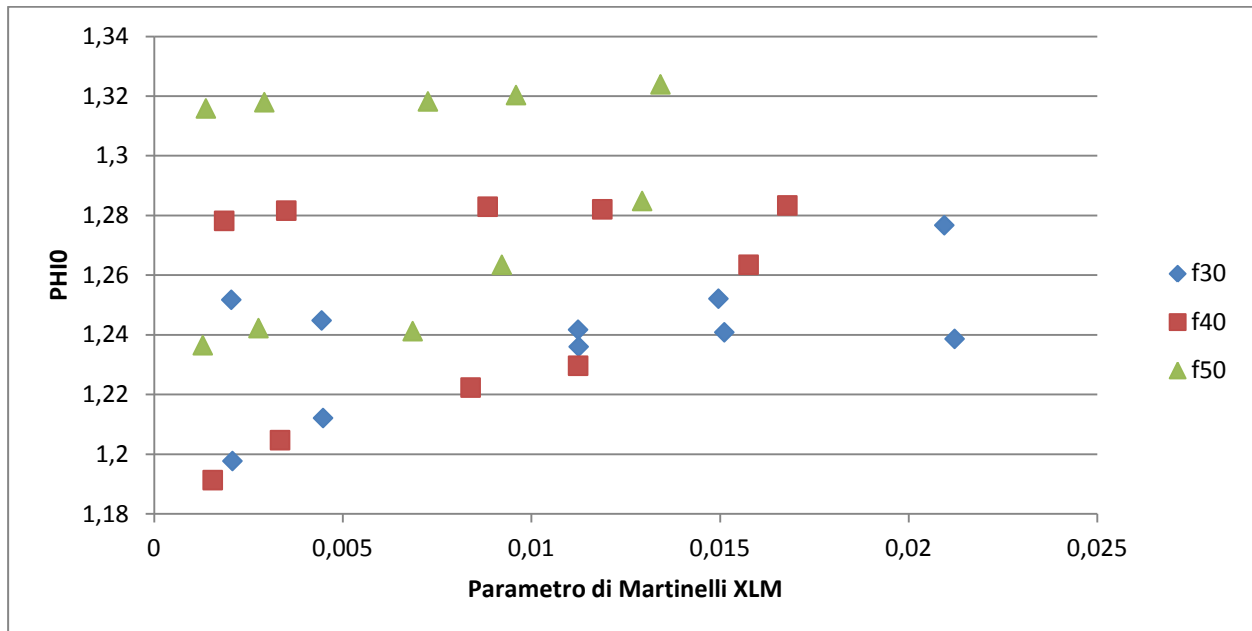


Fig. 16 Fattore di correzione per la stima della portata di gas in funzione del parametro di Martinelli.

Ai fini della calibrazione del modello illustrato nel punto 9.1 occorre utilizzare una o più correlazioni in grado di descrivere i valori Φ_g di fig. 16 a partire da grandezze misurabili durante il processo e naturalmente in assenza di misure dirette delle portate delle due fasi.

Il parametro di Martinelli X_{LM} richiede la misura della pressione e della temperatura per il calcolo delle densità e richiede la conoscenza del titolo x . Poiché x non è misurabile direttamente la stima può essere svolta a partire dalla misura della frazione di vuoto con correlazioni del tipo di quelle proposte da Abdul-Razzak et al. [22] ovvero le (4.30 e 4.31):

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = 0.49X_{LM}^{0.8036} \quad (4.30)$$

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = 0.1531X_{LM}^{0.9833} \quad (4.31)$$

Ricavando da queste la frazione di vuoto α dai valori di X_{LM} si hanno i risultati di fig. 17. Una serie di punti di punti sperimentali è adeguatamente prevista.

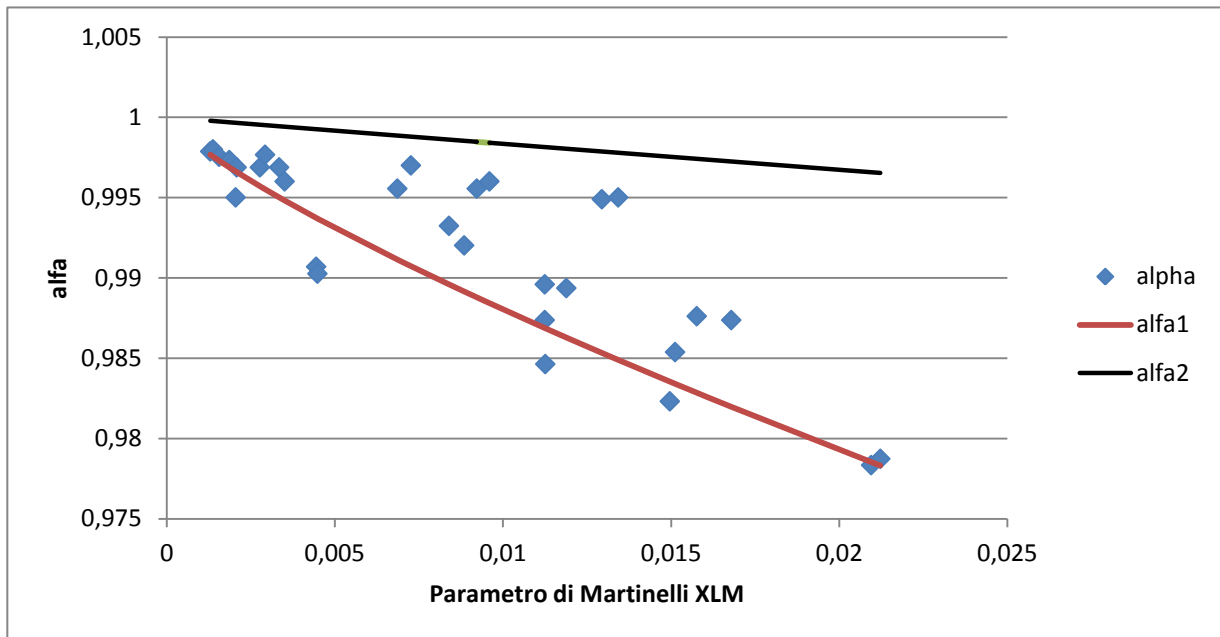


Fig. 17 Confronto tra la frazione di vuoto misurata e la frazione di vuoto stimata dalle correlazioni (4.30 alfa1 e 4.31 alfa2)

In fig. 18 si riportano le previsioni di Φ_g utilizzando le correlazioni (4.36b) e (4.36d) con $n=0.5$ e la (4.38, 4.38a) con $n=0.6$.

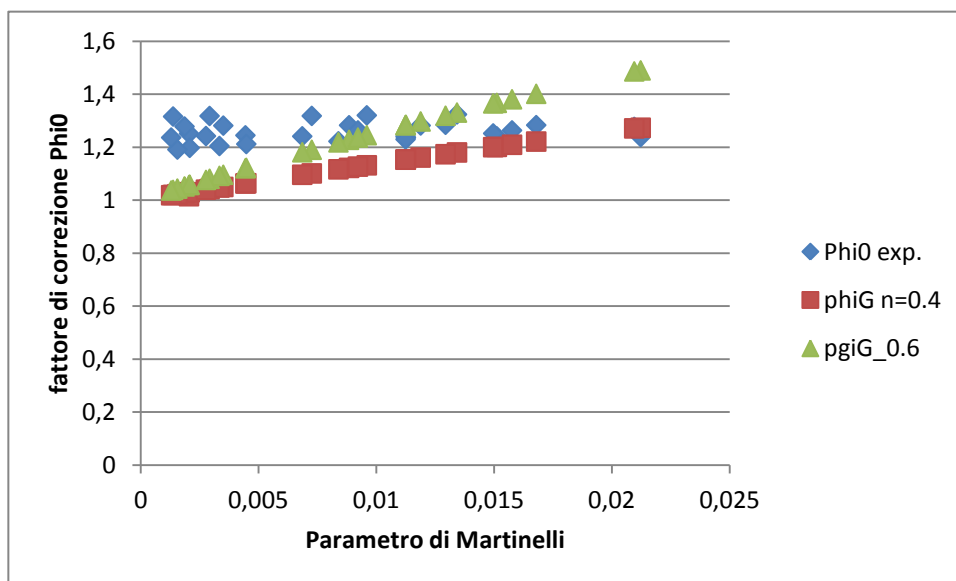


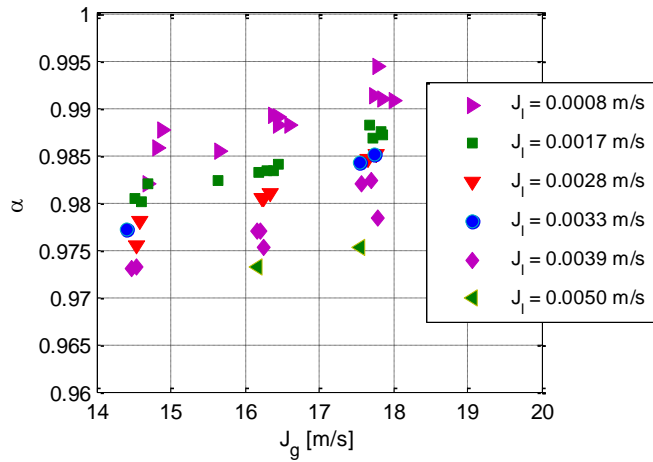
Fig. 18 Confronto risultati sperimentali con correlazioni di Chisholm/ De Leeuw.

I dati sperimentali, caratterizzati da elevati valori del parametro di Martinelli, sono ben previsti.

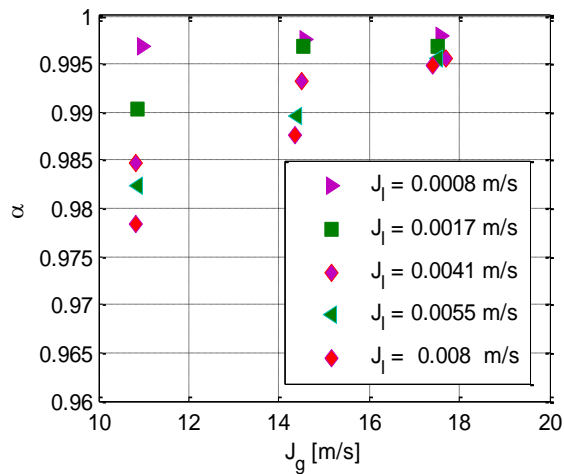
9.3 Confronto dei risultati con la configurazione verticale

Nelle figure seguenti sono riportate le grandezze fluidodinamiche ricavate e sono discusse le differenze tra parametri bifase in deflusso orizzontale e verticale.

Nel range di prove sperimentato la variazione del grado di vuoto in funzione delle portate della miscela è riportato in Fig. 19.



(a)



(b)

Fig. 19: Grado di vuoto sperimentale in funzione delle velocità superficiali della miscela bifase aria-acqua: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

In Fig. 20 è riportata la variazione del grado di vuoto in funzione del titolo.

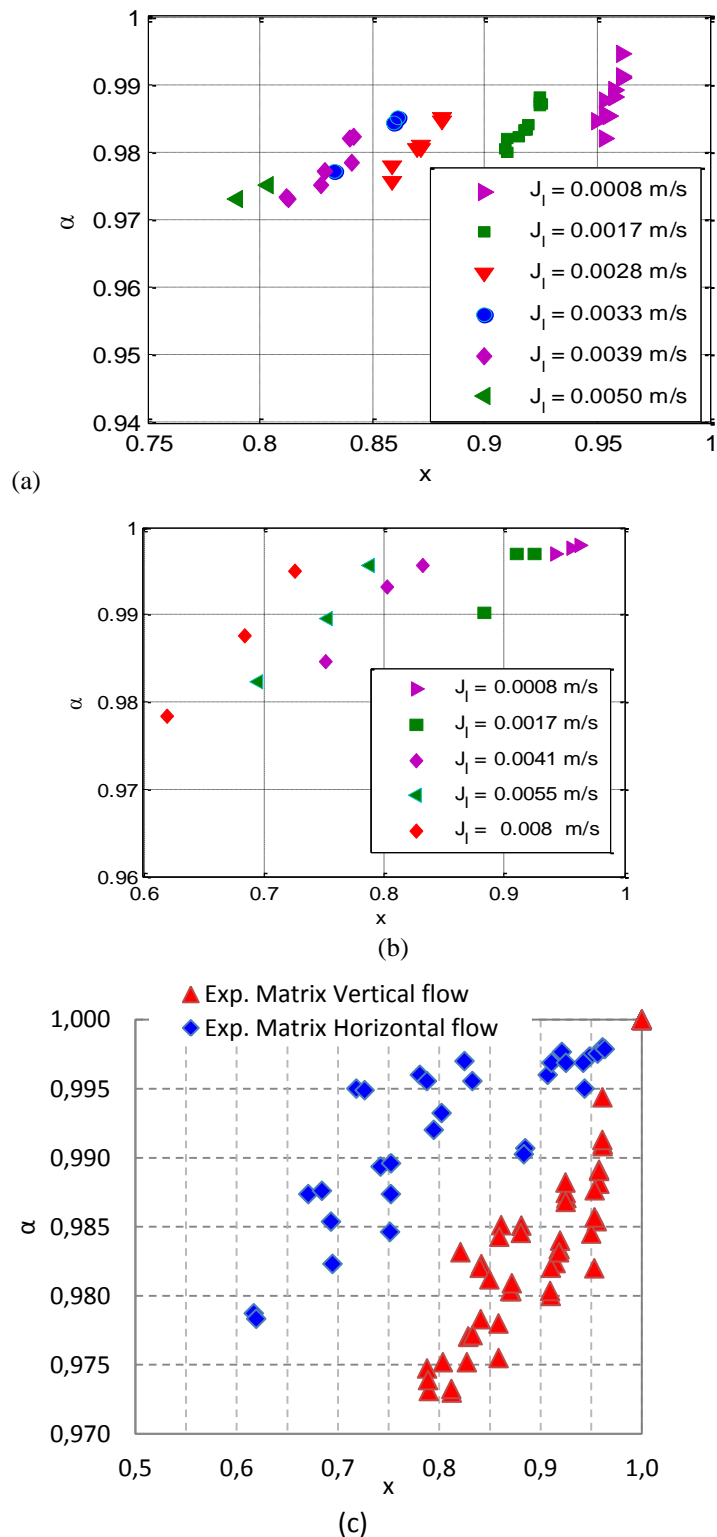


Fig. 20: Grado di vuoto sperimentale in funzione del titolo fluidodinamico: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale, (c) Confronto tra deflusso verticale e orizzontale.

Le curve riportate in Fig. 20 mostrano che la relazione $x-\alpha$, nelle condizioni in esame, non è ben rappresentata da una curva univoca. Il legame tra le due grandezze può essere quindi esplicitato solo considerando il terzo parametro in gioco: lo *slip ratio*, che esprime lo scorrimento tra le fasi

(modello di drift). Il confronto riportato in Fig. 20 (c) mostra inoltre una forte dipendenza del legame $x-\alpha$ dalla giacitura del condotto. La distribuzione delle fasi, influenzata dal vettore della forza di gravità, modifica fortemente le interazioni tra le fasi e la distribuzione dell'interfaccia, e di conseguenza il valore di Slip Ratio.

Molto probabilmente il parametro che aggrega i dati è il parametro di Martinelli oltre che un indicatore del flow pattern quale lo Slip Ratio.

9.4 Analisi del comportamento del Venturi in deflusso bifase

In fig. 21 e 22 sono riportate le cadute di pressione misurate nel Venturi per le condizioni bifase sperimentate.

Nel grafico di fig. 21 le cadute di pressione vengono rappresentate in funzione della portata totale, e in Fig. 22 in funzione delle velocità superficiali delle due fasi. Come si evince, i valori delle cadute di pressione bifase sono molto vicini al valore monofase aria; per apprezzare le differenze occorre normalizzare i valori rispetto alla caduta di pressione monofase come riportato in Fig. 24, in funzione del titolo fluidodinamico.

Dai grafici sotto riportati si evince inoltre che il funzionamento del Venturi nelle due configurazioni è comparabile; una maggiore pendenza della curva $DpV-W_{tot}$ è evidenziabile solo alle maggiori velocità della fase aeriforme (fig. 21).

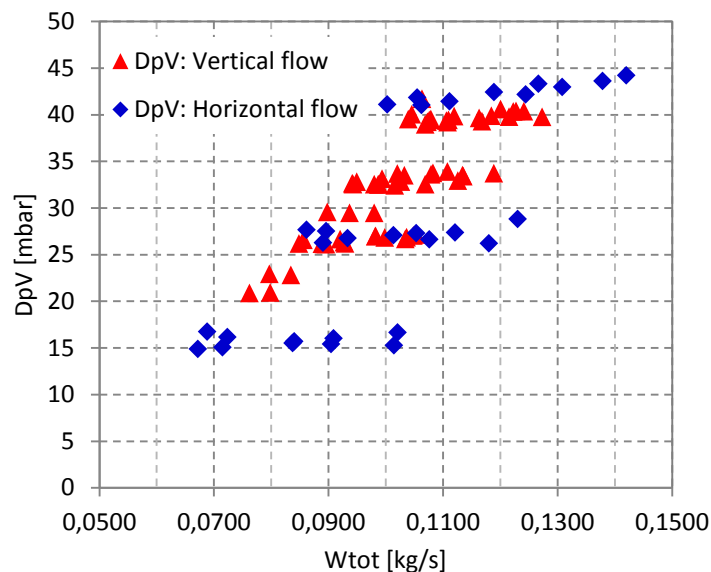


Fig. 21: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione della portata totale.

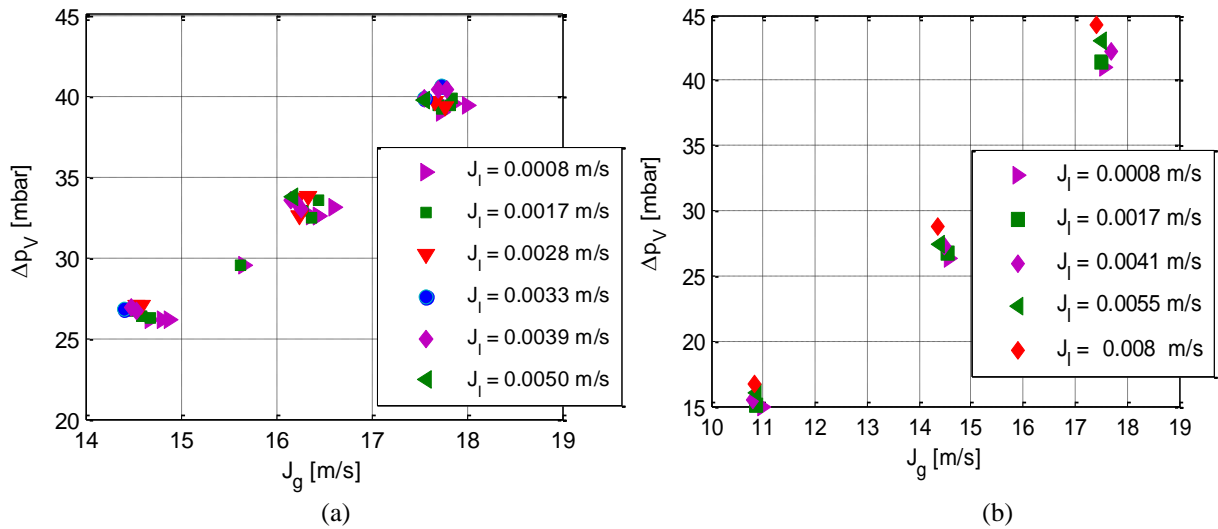


Fig. 22: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle velocità superficiali: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

I grafici di fig. 23 mostrano la variazione della caduta di pressione in deflusso bifase rispetto al caso monofase aria e il loro rapporto in funzione del titolo. Sebbene esista una leggera dispersione dei dati, l'analisi dei grafici suggerisce un comportamento simile del Venturi anche nella configurazione orizzontale: una legge lineare può quindi essere utilizzata anche in questo caso (correlazione per moltiplicatore bifase) per legare titolo, cadute di pressione monofase e cadute di pressione bifase.

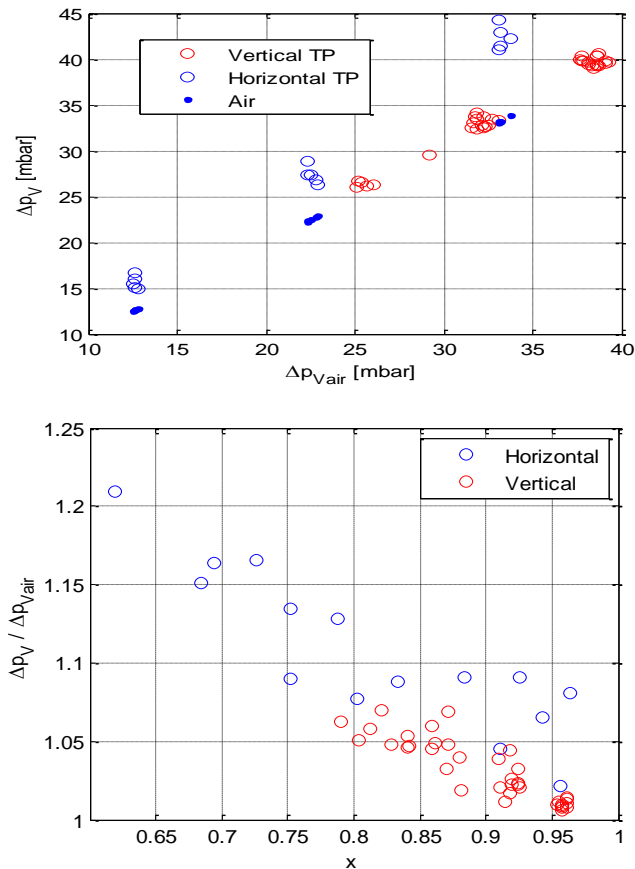


Fig. 23: Cadute di pressione bifase nel Venturi in funzione delle cadute di pressione monofase con aria.

Le curve di fig. 24 evidenziano chiaramente la stretta dipendenza del segnale del Venturi dal titolo della miscela, sebbene i dati risultino relativamente dispersi.

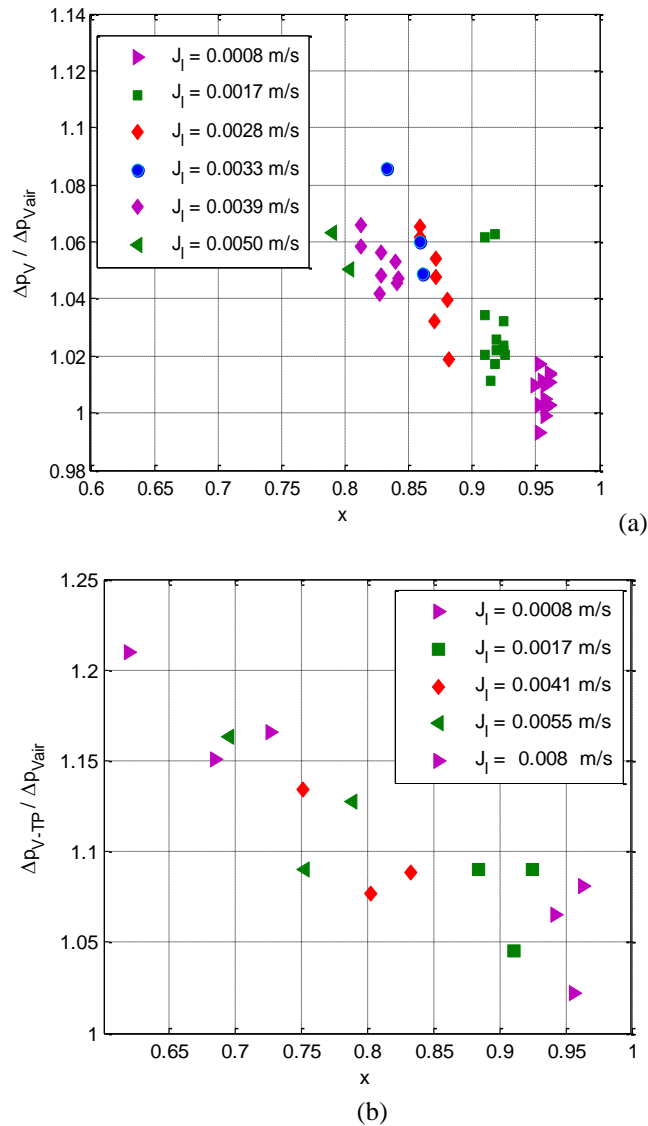


Fig. 24: Cadute di pressione bifase nel Venturi normalizzate rispetto al monofase con aria in funzione del titolo: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

Considerando la variazione delle cadute di pressione nel Venturi in funzione delle grandezze fluidodinamiche, si può esprimere la caduta di pressione bifase in funzione della caduta di pressione monofase tramite un fattore moltiplicativo apposito.

Il confronto tra i moltiplicatori bifase sperimentali, ottenuti in deflusso orizzontale stratificato e stratificato-anulare e in deflusso verticale anulare, è riportato in fig. 25.

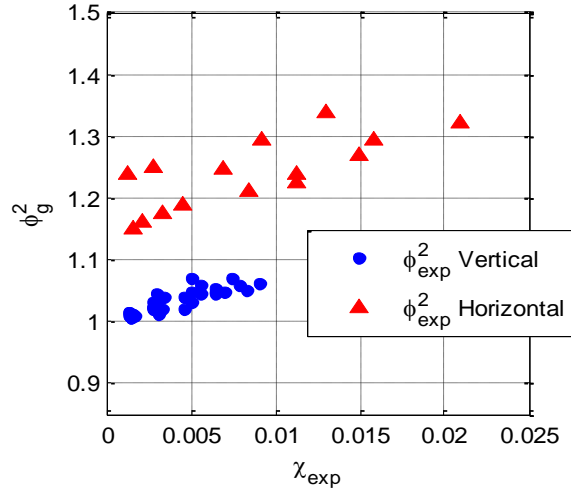


Fig. 25: Moltiplicatore bifase: confronto tra dati sperimentali in deflusso orizzontale e verticale.

Un altro possibile approccio nell'analisi delle cadute di pressione nel Venturi riguarda il calcolo del coefficiente di efflusso del misuratore in regime bifase. Si tratta di un approccio ultimamente non utilizzato per l'assenza di ampi intervalli di funzionamento in cui il coefficiente di efflusso è costante.

Il coefficiente di efflusso in bifase C_{TP} è ottenuto come

$$C_{TP} = \frac{W_{tot}}{F_a \cdot Y \cdot A_2} \cdot \left(\frac{(1 - \beta^4)}{2\rho_{TP}\Delta p_{TP}} \right)^{0.5} \quad (9.3)$$

dove ρ_{TP} è la densità bifase definita dalla relazione del tipo (4.25, 4.26, 4.27).

Il numero di Re bifase è stato calcolato come

$$Re = \frac{\rho_{TP} J_{tot} D}{\mu_{TP}} \quad (9.4)$$

con un valore di viscosità μ_{TP} calcolato con la seguente relazione:

$$\mu_{TP} = \left(\frac{x^2}{\alpha \cdot \mu_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \cdot \mu_l} \right)^{-1} \quad (9.5)$$

La dipendenza dal numero di Reynolds può essere approssimata, come nel caso monofase da una legge del tipo:

$$Cd_{TP} = a \cdot Re_{TP}^b \quad (9.6)$$

In fig. 26 è riportato il grafico del coefficiente di efflusso bifase in funzione del numero di Reynolds. L'andamento del coefficiente di efflusso dello strumento in configurazione orizzontale e verticale conferma che il comportamento del Venturi, nei ranges analizzati è influenzato dalla giacitura dello strumento, ossia dalla distribuzione delle fasi: infatti in deflusso orizzontale il coefficiente risulta essere più basso rispetto al caso verticale e fortemente influenzato dalla percentuale di fase liquida presente nella miscela.

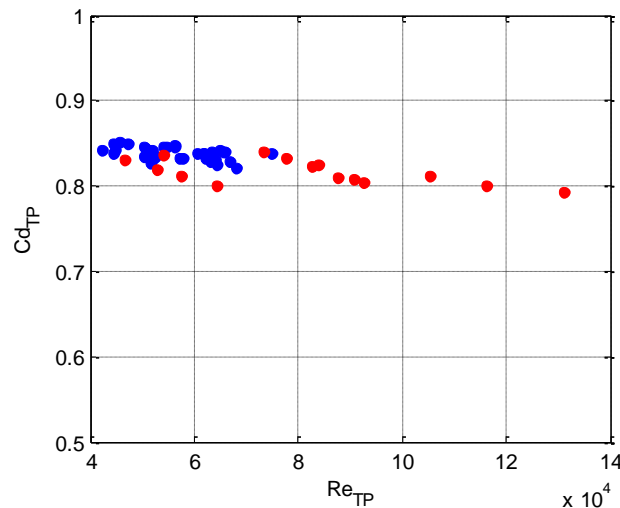


Fig. 26 Coefficiente di efflusso del Venturi in deflusso bifase.

Nelle figure seguenti vengono riportati i grafici relativi alle cadute di pressione irreversibili misurate nel Venturi nelle condizioni testate.

L'analisi di queste curve consente di aggiungere importanti informazioni riguardanti il deflusso; infatti la misura delle cadute di pressione irreversibili mostra una maggiore sensibilità di questo parametro alle variazioni di portata di liquido all'interno della miscela, rispetto alla classica misura di caduta di pressione tra ingresso e sezione ristretta. Si osserva una forte sensibilità alla distribuzione delle fasi nella sezione di prova.

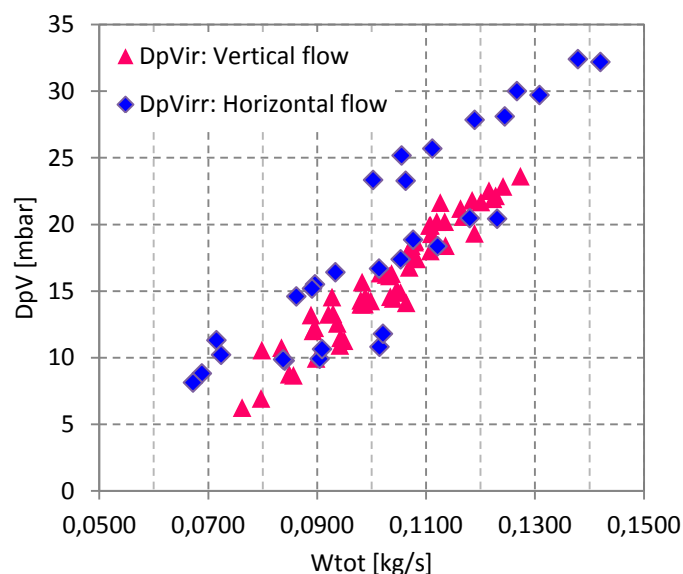


Fig. 27: Confronto tra cadute di pressione irreversibili nel Venturi in deflusso verticale e orizzontale.

Il grafico di fig. 27 riporta il confronto tra deflusso verticale e deflusso orizzontale, per le cadute di pressione misurate tra ingresso e uscita (cadute di pressione irreversibili) in funzione della portata totale.

Come si può notare, la non simmetria del deflusso (amplificata nella tratto divergente dello strumento, dove sono presente importanti ricircoli) comporta cadute di pressione irreversibili più elevate nella configurazione orizzontale, rispetto alla configurazione verticale, caratterizzata da un deflusso simmetrico lungo la circonferenza.

Nelle fig. 28 e 29 vengono riportati i valori che mostrano la dipendenza delle cadute di pressione irreversibili dalle velocità superficiali delle due fasi e dal titolo.

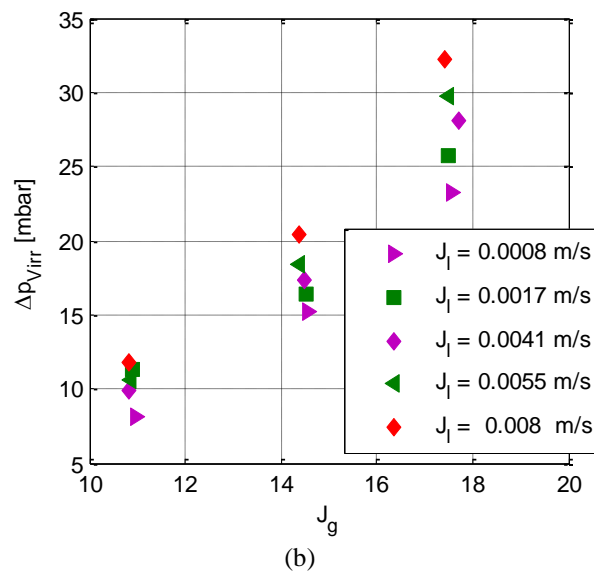
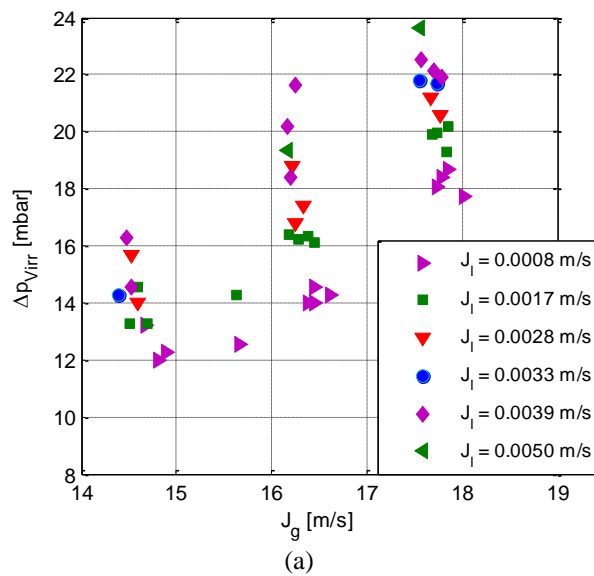


Fig. 28: Cadute di pressione irreversibili nel Venturi in funzione delle velocità superficiali delle fasi: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

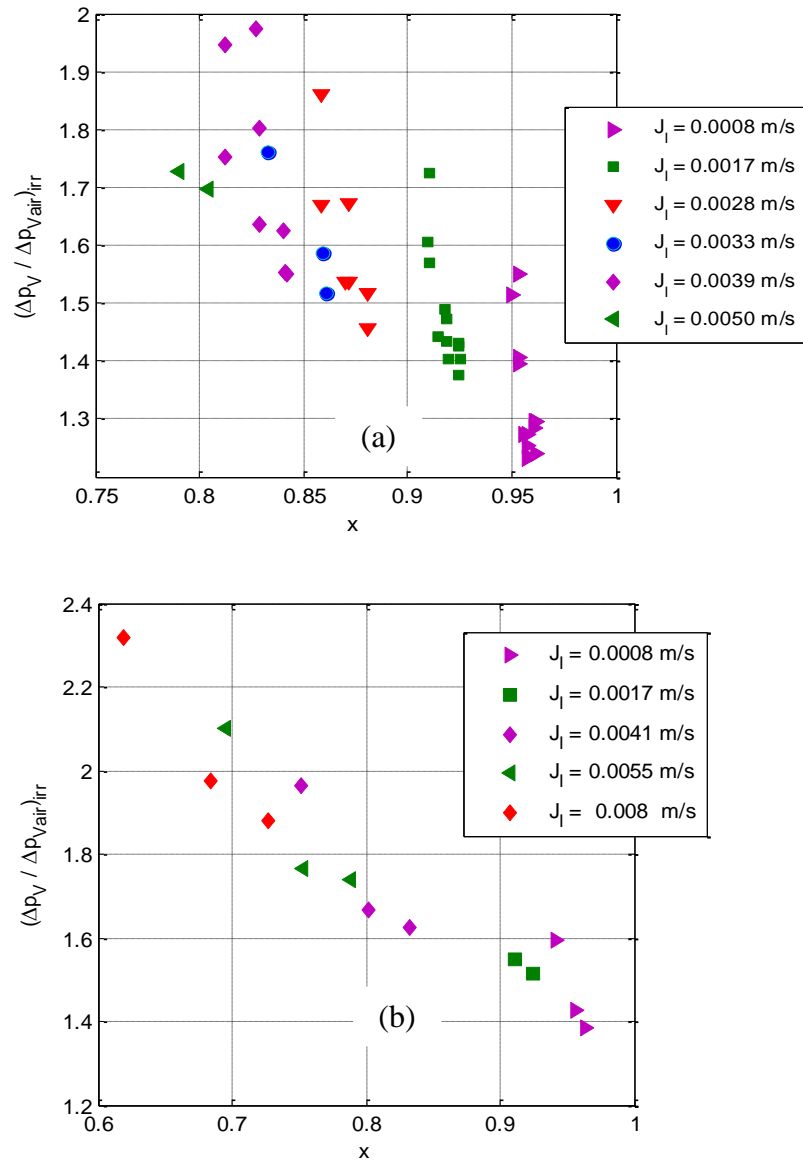


Fig29 : Cadute di pressione irreversibili nel Venturi normalizzate rispetto al monofase con aria in funzione del titolo: (a) Deflusso verticale, (b) Deflusso orizzontale.

Nella fig.30 è mostrata la caduta di pressione irreversibile nel Venturi al variare delle cadute di pressione irreversibili con sola aria.

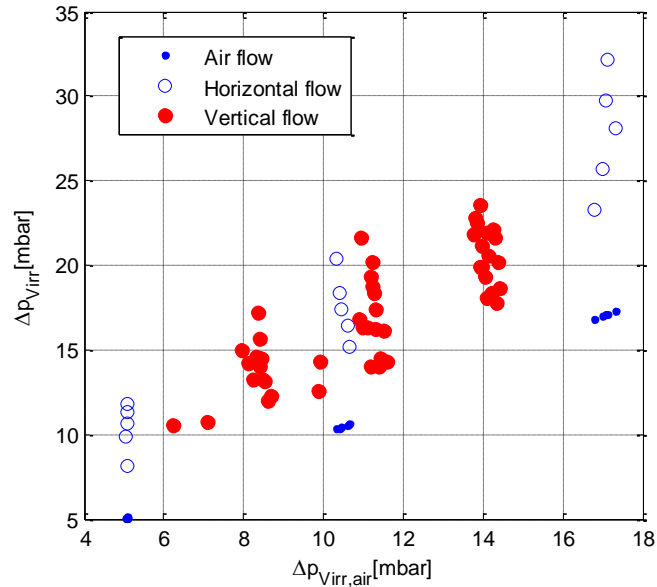


Fig. 30: Cadute di pressione irreversibili nel Venturi in funzione delle cadute di pressione irreversibili monofase con aria.

Dall'analisi delle curve sopra riportate si evince che le cadute di pressione irreversibili possono essere espresse in funzione delle due velocità superficiali oltre che del titolo fluidodinamico.

$$\Delta p_{irr} = k_1 \cdot (\rho_g J_g^{k_2}) \cdot (J_l / J_g)^{k_3} + k_4 \quad (9.7)$$

dove J_g e J_l sono le velocità superficiali di aria e acqua rispettivamente. Le costanti sono state ricavate da best-fit dei dati sperimentali:

Per le due campagne di prova verticale (V) ed orizzontale (H) i parametri ottenuti sono riportati in tabella:

Configurazione/Parametro	k_1	k_2	k_3	k_4
Verticale V	0.2096	2	0.13	-2.9786
Orizzontale H	0.2705	1.91	0.13	0

Tab. 16 Coefficienti empirici per la correlazione (9.7)

La correlazione sviluppata per condotti verticali in deflusso anulare è caratterizzata da un'accuratezza del $\pm 5\%$. La correlazione sviluppata per condotti orizzontali è invece soggetta a un errore del 12%. In questo caso però sono ben identificabili due tipologie di deflusso: stratificato e stratificato-anulare. Per ridurre l'errore ($< 5\%$) è necessario utilizzare due correlazioni distinte per i due regimi.

9.5 Analisi del comportamento della sonda ECP in deflusso bifase orizzontale

Nelle figure seguenti vengono analizzati i segnali degli elettrodi della sonda ECP, al variare dei parametri fluidodinamici misurati (velocità superficiali e grado di vuoto volumetrico) in deflusso orizzontale bifase; nel paragrafo successivo i dati vengono confrontati con i risultati ottenuti in deflusso verticale [2].

9.5.1 Elettrodi esterni

In Fig. fig. 32 sono riportati gli andamenti dei segnali normalizzati V_{ij}^* in funzione della posizione di misura degli elettrodi, considerando per l'elettrodo 1 (elettrodo eccitatore) la posizione superiore del condotto, e per l'elettrodo 9 la posizione nella parte inferiore del condotto (fig. 31).

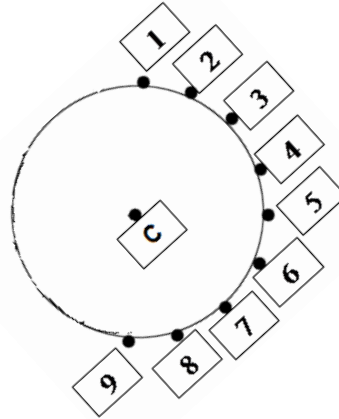
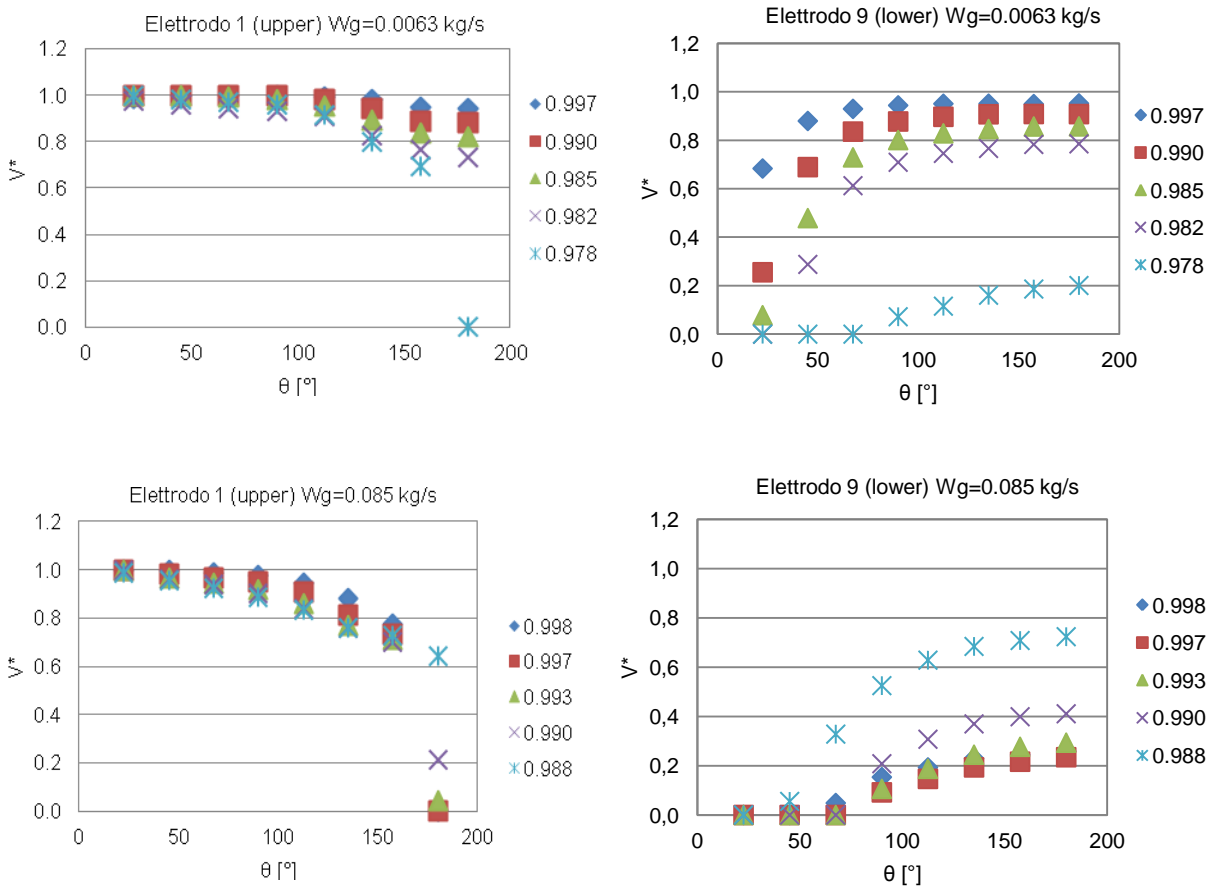


Fig. 31: Posizione elettrodi sonda in configurazione orizzontale

Le curve sono parametrizzate con il valore del grado di vuoto sperimentale.



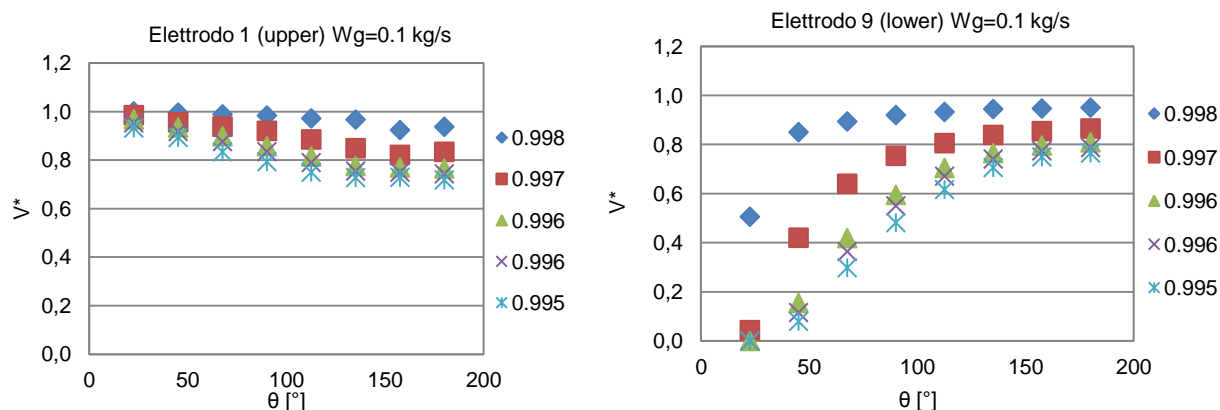


Fig. 32: Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni in funzione del grado di vuoto e della portata massica della fase aria.

Risulta evidente la diversa dipendenza dal grado di vuoto medio volumetrico per gli elettrodi 1-9, che posizionati a 180° sulla circonferenza sono fortemente influenzati da fenomeni di stratificazione della fase liquida. Nelle prove sperimentali il deflusso viene creato imponendo le portate delle due fasi all'ingresso della sezione di prova; nelle prove a basse portate di aria ($J_g < 15$ m/s), il deflusso realizzato è stratificato, con portata di liquido trascinato nel core gassoso trascurabile. Mentre a più elevate portate il flow pattern che si instaura è di tipo anulare; la differente distribuzione delle fasi nelle due condizioni è chiaramente identificata dalla sonda ECP. L'effetto della gravità sulla distribuzione delle fasi, richiede lo sviluppo di un modello interpretativo adeguato, ma consente anche di sfruttare la diversa risposta degli elettrodi di misura per il riconoscimento del flow pattern e del livello di liquido.

In fig. 33 è evidenziata la dipendenza del segnale dal grado di vuoto, per gli elettrodi posti a 22.5° lungo la semicirconferenza.

La combinazione 2-3, rappresentativa della distribuzione delle fasi nella parte superiore del condotto, mostra un andamento indipendente dalla portata della fase gassosa, per portate inferiori a 0.0085 kg/s, corrispondenti a valori di velocità superficiali J_g inferiori a 15 m/s. In queste condizioni il deflusso è, come detto, stratificato e la fase liquida non è presente tra gli elettrodi di misura posizionati nella parte superiore del condotto. Gli elettrodi posizionati più in basso lungo la circonferenza sono invece soggetti a variazioni che dipendono dalle portate delle due fasi, ossia dal livello di liquido nella zona stratificata e dal diverso spessore di liquido che si forma lungo la parete nelle condizioni sperimentate.

La combinazione 8-9, rappresentativa della zona inferiore del condotto presenta valori che variano da 0 (gli elettrodi "vedono" la sola fase liquida stratificata) a circa 0.65 al crescere del valore di grado di vuoto medio e al crescere della velocità superficiale dell'aria.

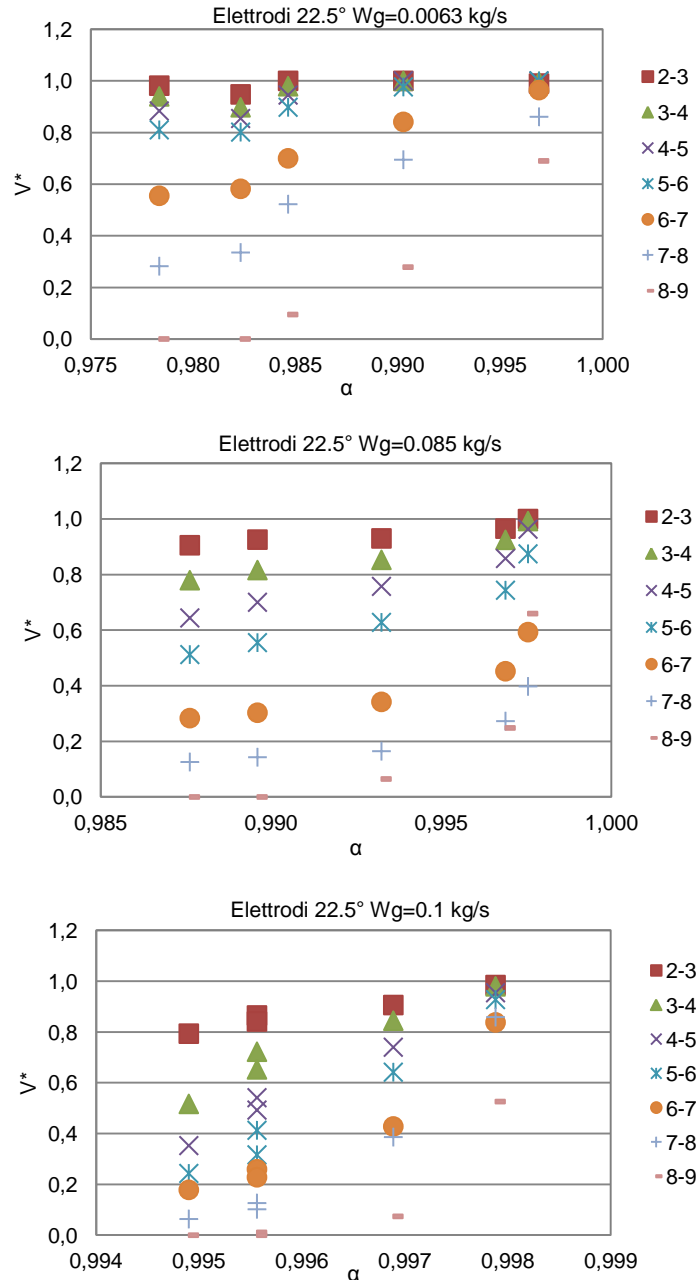


Fig. 33: Segnale normalizzato associato alla misura tra elettrodi esterni posti a 22.5° in funzione del grado di vuoto e della portata massica della fase aria.

9.5.2 Elettrodo centrale

La variazione del segnale dalla portata d'aria è evidenziata nei grafici di Fig. 34 dove viene riportato il segnale della sonda normalizzato in funzione del grado di vuoto volumetrico.

A differenza degli elettrodi esterni il segnale cresce linearmente con il grado di vuoto secondo delle curve che dipendono fortemente dalla posizione degli elettrodi rispetto all'asse verticale del condotto.

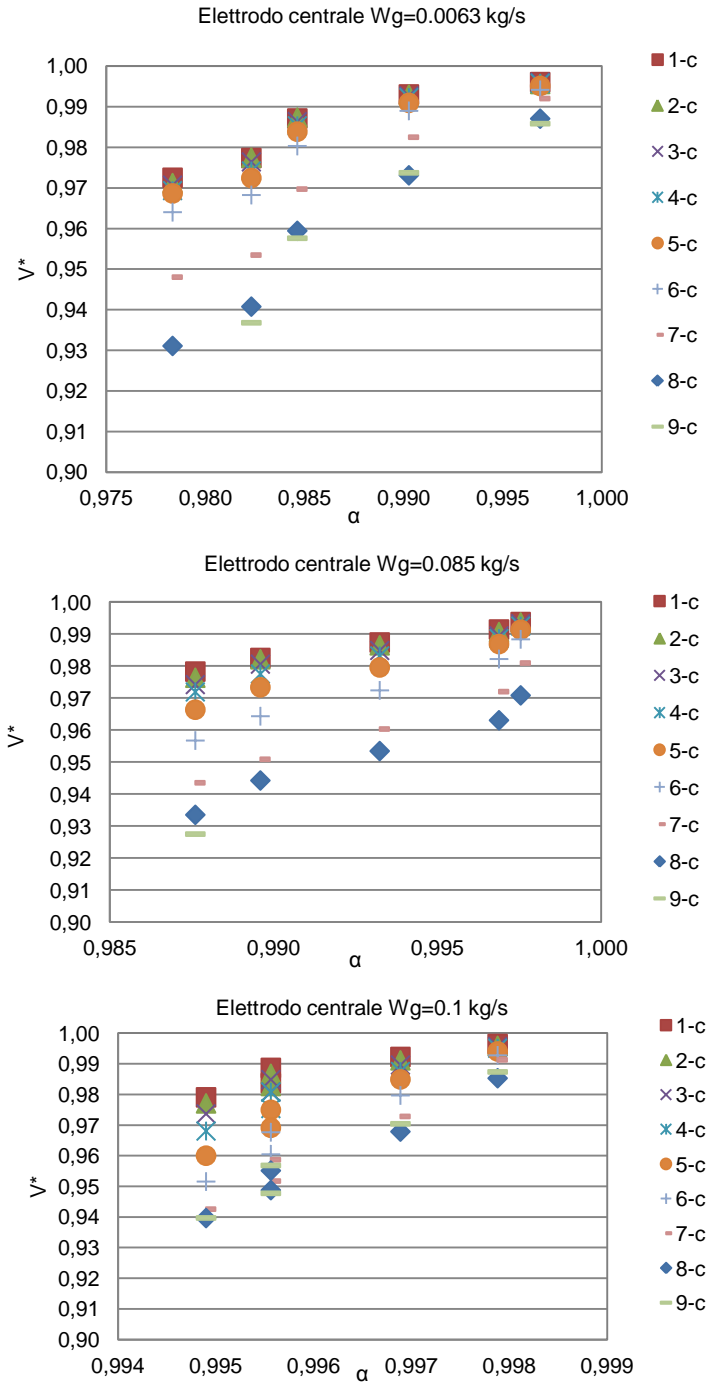


Fig. 34: Segnale normalizzato associato alla misura dell'elettrodo centrale in funzione del grado di vuoto.

9.6 Confronto del comportamento della sonda ECP in deflusso bifase orizzontale e verticale

Nel presente paragrafo vengono confrontati i risultati ottenuti in deflusso verticale anulare con i risultati ottenuti in deflusso orizzontale nell'ultima campagna sperimentale effettuata. I grafici presentano il segnale normalizzato degli elettrodi di misura, in funzione dell'angolo di misura e del grado di vuoto medio volumetrico.

In fig. 35 è riportato il confronto per l'elettrodo 1 e per l'elettrodo 9 alla minima e alla massima portata di aria sperimentata in deflusso orizzontale. Dall'analisi dei segnali si evince che il comportamento degli elettrodi che risentono della presenza del film liquido, sia esso uniforme sulla circonferenza (anulare verticale), sia esso stratificato, è qualitativamente simile, ma differisce in valore assoluto; mentre è addirittura opposto per gli elettrodi esposti per lo più alla fase gassosa.

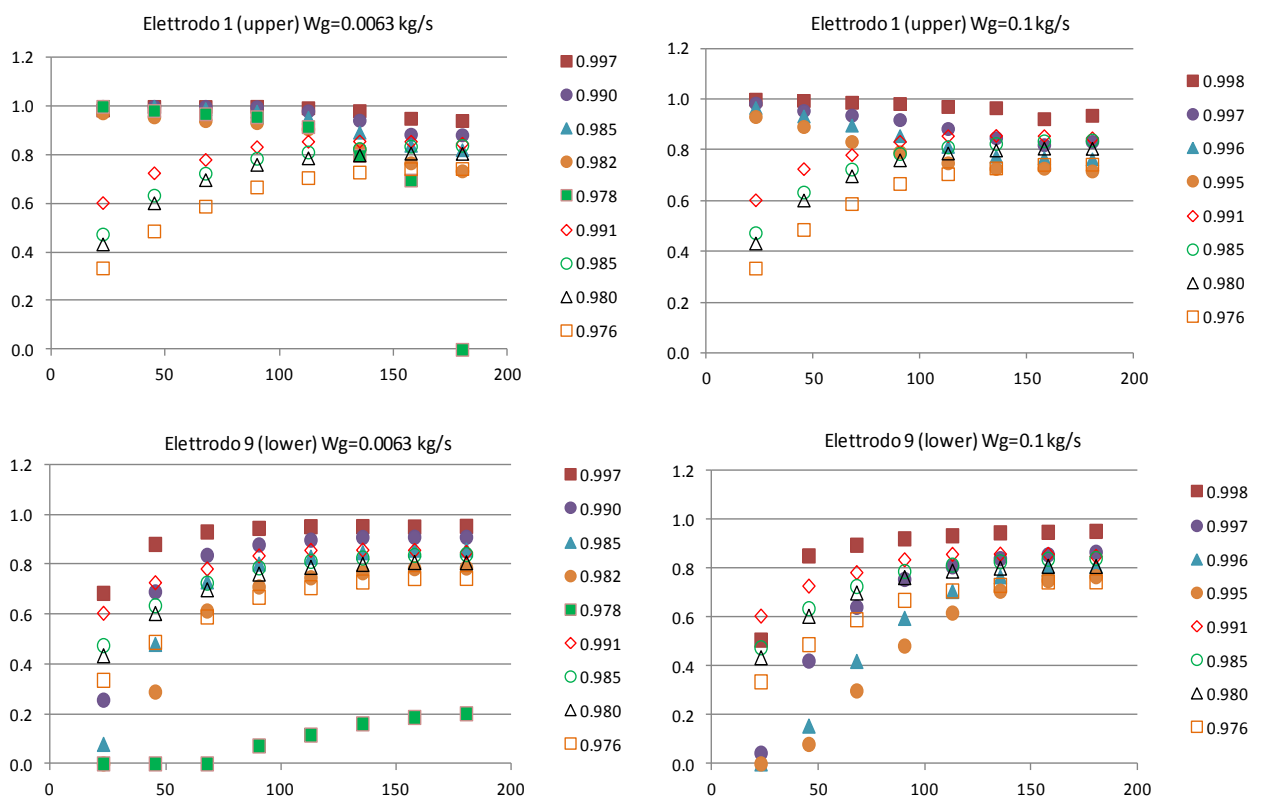


Fig.35: Segnale elettrodi esterni. Asse x: θ , Asse y: V^* . Simboli vuoti: deflusso verticale anulare. Simboli pieni: deflusso orizzontale stratificato e stratificato anulare.

In fig. 36 è riportato il confronto per il segnale normalizzato dell'elettrodo centrale. I grafici riportano l'andamento del segnale in funzione del grado di vuoto medio volumetrico medio, per le varie combinazioni di misura. In questo caso il segnale sembra essere confrontabile alle basse portate di aria (film liquido nel deflusso stratificato), mentre assume una pendenza molto più marcata nel caso di deflusso orizzontale anulare.

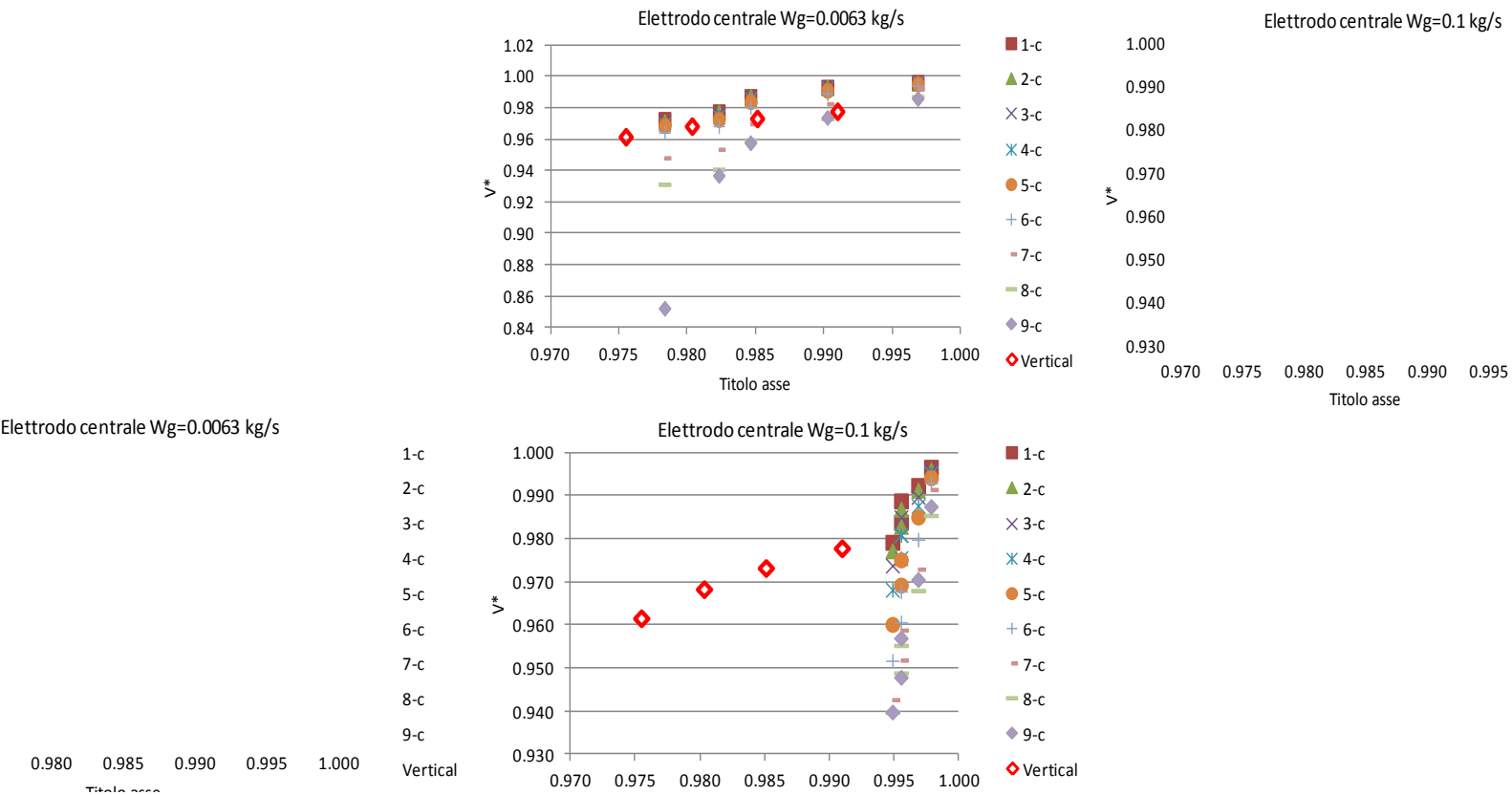


Fig. 36: Segnale elettrodo centrale. Asse x: θ , Asse y: V^* . Simboli vuoti: deflusso verticale anulare. Simboli pieni: deflusso orizzontale stratificato e stratificato anulare.

9.7 Confronto tra comportamento della sonda ECP in deflusso orizzontale aria-acqua e acqua-vapore

In questa sezione vengono presentati i risultati del confronto tra i dati ottenuti in deflusso orizzontale aria-acqua (POLITO) e acqua-vapore (SIET).

Il confronto si pone come obiettivo l'analisi del comportamento della sonda in due differenti condizioni di deflusso.

In Fig. 37 è riportato il confronto tra la matrice sperimentale $x-\alpha$ per le due matrici sperimentali. Come si vede il grafico evidenzia valori di grado di vuoto inferiori per il deflusso acqua-vapore, e una dispersione non trascurabile.

Inoltre i valori relativi alla matrice sperimentale SIET sono stati ottenuti a pressioni variabili tra 1 e 4 bar, mentre la campagna sperimentale del Politecnico di Torino è stata effettuata a pressione ambiente (1 bar).

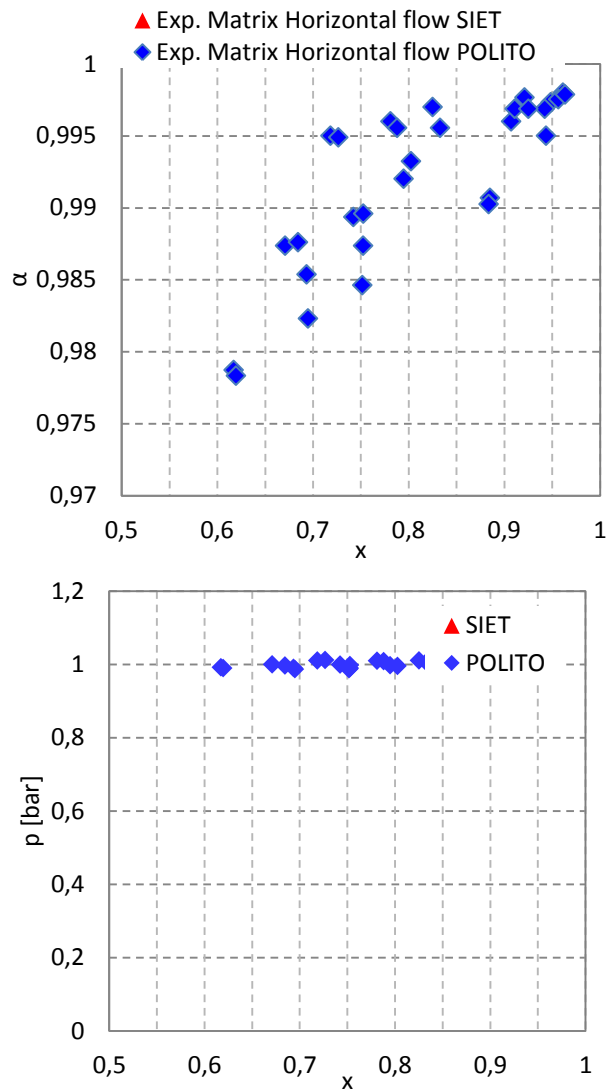


Fig. 37: Confronto tra matrice sperimentale POLITO (aria-acqua) e SIET (acqua-vapore).

Esistono quindi sostanziali differenze che consentono di effettuare un confronto qualitativo ma non quantitativo tra i risultati ottenuti.

Il confronto tra i segnali normalizzati della sonda, è effettuato per gli elettrodi posti nella zona inferiore del condotto (elettrodo 9 per sonda POLITO e elettrodo 7 per sonda SIET, Fig. 31 e Fig. 38) e per l'elettrodo centrale (Fig.39).

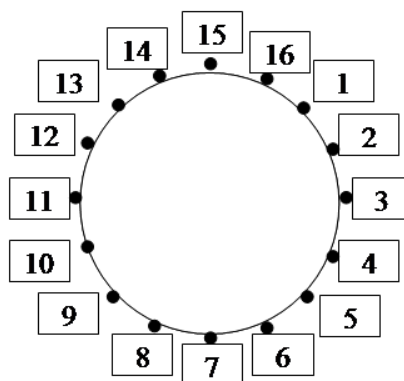


Fig. 38: Posizione elettrodi sonda SIET.

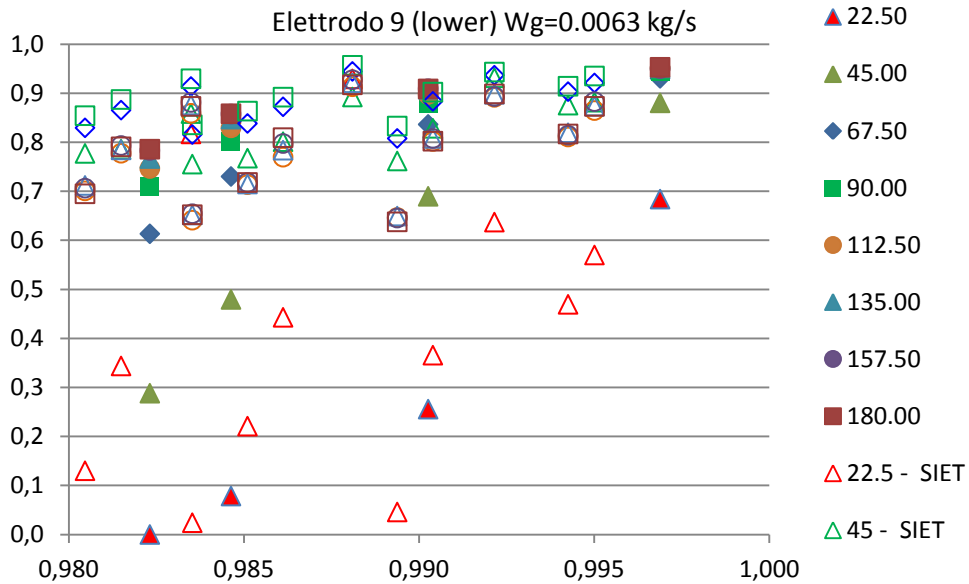
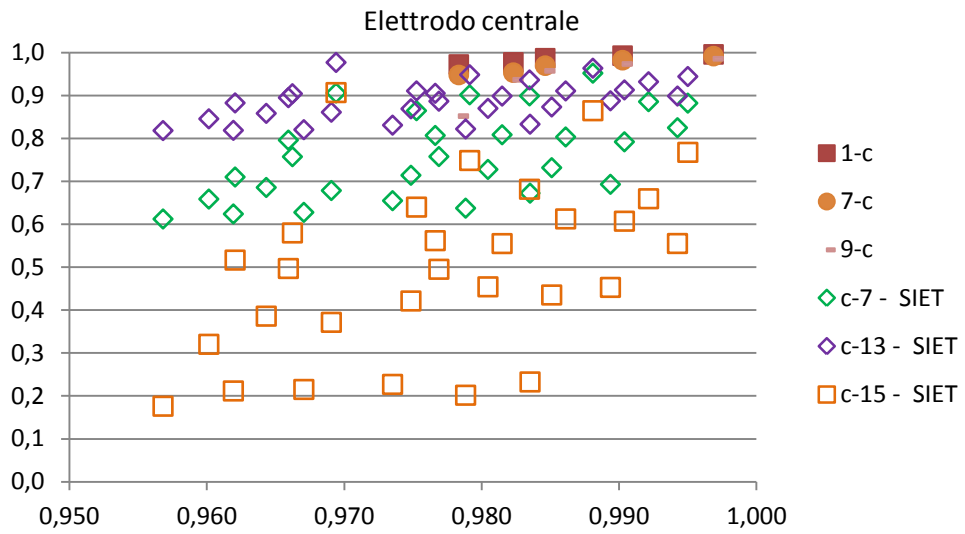


Fig. 39: Confronto tra i segnali normalizzati della sonda POLITO (aria-acqua) e SIET (acqua-vapore) in funzione della frazione di vuoto.

10. Conclusioni

Nell'ambito dell'attività LP1, con riferimento ai reattori di piccola e media taglia, il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, ha svolto una attività di ricerca teorico-sperimentale con lo scopo di sviluppare e caratterizzare la strumentazione per la misura della portata in un deflusso bifase, da utilizzare nell'impianto SPES3.

Poiché un unico strumento non è in grado di fornire la portata delle due fasi all'interno del condotto, la messa a punto di uno "Spool Piece" (SP), inteso come un insieme di strumenti connessi in serie, è necessaria per la misura delle portate in presenza di deflusso bifase. Uno SP ideale è un condotto costituito da una serie di strumenti, alimentati in ingresso da un deflusso, che 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.

Alla luce degli studi effettuati nel corso dei PAR precedenti e in relazione all'applicabilità dello strumento nell'impianto SPES3 è stato proposto lo studio di uno SP composto da un Venturi e da un misuratore di grado di vuoto: WMS e sonda ECP SIET. In 0 è riportato il modello e l'analisi sperimentale effettuata per lo SP composto da Venturi, tipo classico, e WMS, installato in un circuito orizzontale, mentre in [33], è descritta l'analisi dello SP costituito da Venturi e sonda ECP in configurazione verticale e in regime di alti gradi di vuoto (deflusso anulare e anulare misto).

I modelli interpretativi dei segnali dei singoli strumenti sono stati descritti e analizzati al fine di sviluppare una metodologia di analisi dei segnali che possa caratterizzare il deflusso bifase in termini di portate delle singole fasi e identificare le caratteristiche del deflusso.

La sonda ECP sviluppata presso la SIET e testata nei laboratori del Politecnico di Torino è stata caratterizzata tramite un modello numerico agli elementi finiti che ha permesso di determinare la dipendenza della capacità elettrica misurata dai vari elettrodi al variare dei parametri caratteristici del deflusso bifase anulare: spessore del film e grado di vuoto del *core*.

Il confronto tra risultati del modello numerico e i dati sperimentali hanno mostrato la necessità di utilizzare sia il modello fluidodinamico, che descrive la distribuzione locale delle fasi, sia il modello numerico per interpretare i segnali dello strumento e ricavare le grandezze di interesse. L'analisi dei dati sperimentali ha inoltre mostrato che il segnale della sonda è influenzato da capacità/impedenze parassite aggiuntive che devono essere eliminate o tenute in debita considerazione nello sviluppo di un modello dello strumento.

Per quanto riguarda il Venturi, l'analisi dei dati sperimentali ha mostrato la possibilità di utilizzare la misura delle cadute di pressione irreversibili (misura tra sezione di ingresso e sezione di uscita dello strumento) congiuntamente alla misura di caduta di pressione tra ingresso e sezione ristretta, per ricavare le portate delle due fasi.

L'analisi dei dati ha infatti mostrato che le cadute di pressione irreversibili dipendono fortemente dalla velocità superficiale del liquido. La conoscenza dei segnali relativi alle due cadute di pressione, insieme ai valori di pressione e temperatura, hanno quindi permesso di sviluppare un modello dello strumento che consente di calcolare la portata di aria e acqua con un errore massimo rispettivamente del 2% e del 30%.

Nel presente lavoro vengono presentati i risultati della campagna sperimentale effettuata per caratterizzare lo SP costituito da un Venturi, tipo corto, e sonda ECP installati in una sezione di prova orizzontale che opera con un deflusso bifase aria-acqua, ad elevati gradi di vuoto. I dati degli strumenti e le grandezze fluidodinamiche sono stati confrontati con i risultati ottenuti nella precedente campagna [33], evidenziando le differenze tra le due configurazioni dello SP. L'analisi ha evidenziato che la modellizzazione sviluppata per il deflusso verticale può essere

utilizzata anche nello SP avente giacitura orizzontale, caratterizzata da deflussi fortemente asimmetrici lungo l'asse verticale del condotto a causa della stratificazione della fase liquida. La campagna sperimentale ha inoltre evidenziato che la risposta del VFM dipende fortemente dal tipo di flow pattern, con coefficienti dei modelli che devono essere calibrati ad hoc. L'analisi dei segnali della sonda, e la loro corretta interpretazione, risultano essere quindi di fondamentale importanza per una corretta interpretazione dei segnali del Venturi e quindi per il calcolo delle portate delle due fasi all'interno della sezione di prova. I dati ottenuti dalla sonda ECP sono stati inoltre confrontati con i dati ottenuti dalla SIET [3]0 con la sonda operante in condizioni di deflusso bifase acqua-vapore in giacitura orizzontale.

Le sostanziali differenze riscontrate tra le due matrici sperimentali non hanno però consentito di effettuare un'analisi quantitativa delle differenze tra i segnali ottenuti nelle due configurazioni.

Il confronto ha però messo in evidenza un'apparente minore sensibilità della sonda in deflusso acqua-aria, rispetto al deflusso acqua-vapore.

Inoltre, poiché nel caso di deflusso acqua-vapore la sonda si trova a lavorare a temperature al di sopra della saturazione, è necessario inserire una correzione del segnale registrato in quanto le proprietà elettriche della miscela dipendono fortemente dalla temperatura.

In conclusione l'attività svolta ha permesso di definire metodologie e procedure per caratterizzare uno spool piece costituito da Venturi e sonda a impedenza per la misura della portata delle due fasi.

Il modello considerato, se ben calibrato con l'ausilio di accurate misure delle portate delle due fasi, delle pressioni differenziali e con la generazione di un segnale proporzionale alla frazione di vuoto, permette di valutare le portate di riferimento.

Allo stato attuale della ricerca la sonda a impedenza è molto interessante per il riconoscimento del flow pattern, ma non consente di realizzare un segnale che permetta di caratterizzare il comportamento del Venturi. Molto utile è la correlazione frazione di vuoto – parametro di Martinelli. Infatti per la stima delle portate delle due fasi occorre valutare il fattore di correzione, sulla base del parametro di Martinelli.

Come è emerso dalla più recente letteratura l'impiego di un condotto di Venturi per la misura della portata bifase è promettente purché esso sia ben studiato da un punto di vista sperimentale generando dei segnali aggiuntivi che caratterizzino il deflusso bifase in termini flow pattern, frazione di vuoto, e/o di spessore del film a monte, nella gola e a valle del Venturi.

L'impiego di sonde a impedenza per la caratterizzazione della frazione di vuoto o dello spessore del film liquido è rilevante. In alternativa alle sonde a impedenza sono funzionali l'impiego di dispositivi tomografici che utilizzano le sorgenti radioattive.

11. Bibliografia

1. 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, parti I e II, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico- ENEA ,Report RdS/2011/121
2. G. Monni, M. De Salve, B. Panella, Prove sperimentali e modello numerico dello Spool Piece costituito da Venturi e misuratore di grado di vuoto, Report CERSE-POLITO RL 1565/2013
3. C. Randaccio, Relazione tecnica sulla messa a punto della strumentazione per la misura della portata bifase nella facility SPES-3, Ricerca di sistema elettrico, Report RdS/2013/073, ADPFISS-LP1-014
4. S. Liu, J. Lei, Z.H. Li, Z.X. Han, J.T. Li, Q. Chen, Generalized flow pattern image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography, Nuclear Engineering and design 241 (2011), 1970-1980

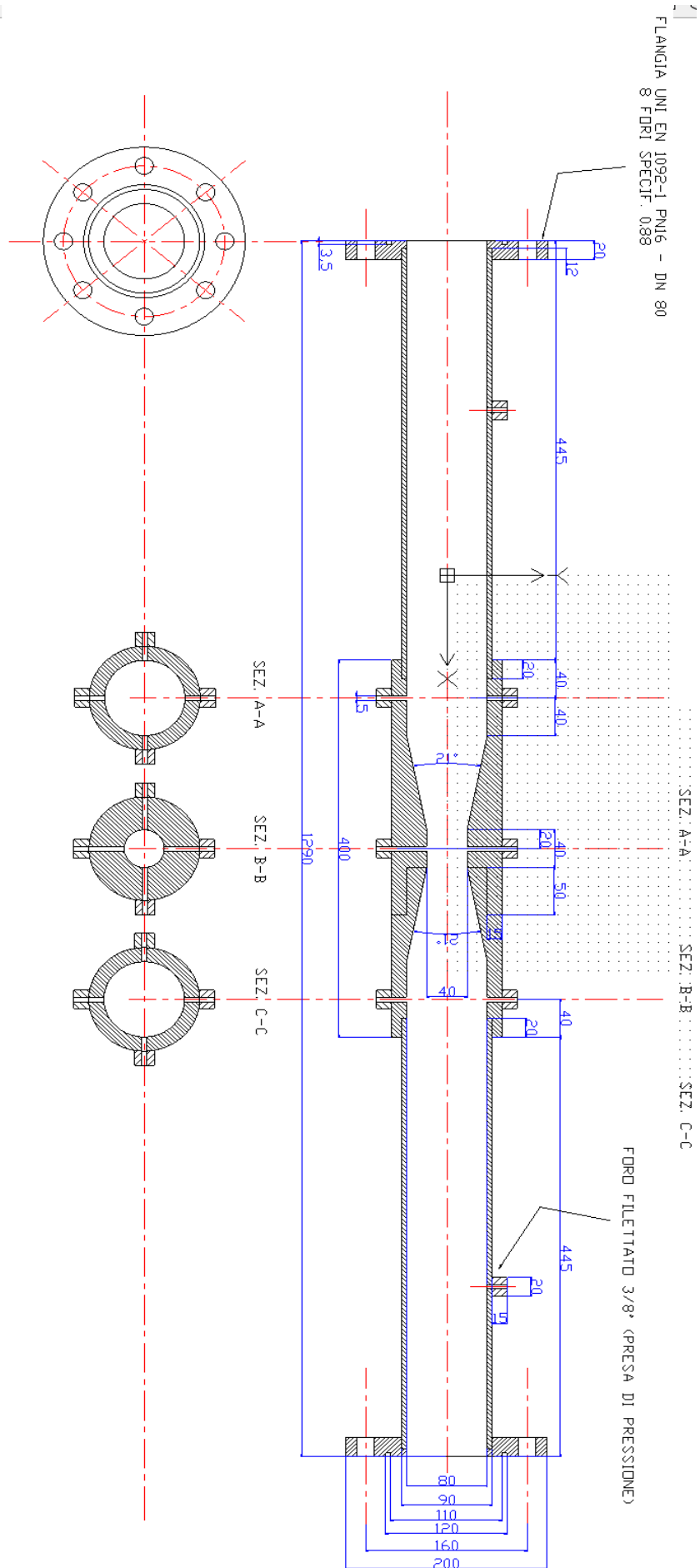
5. G. Monni et al., Horizontal two-phase flow pattern recognition, *Exp. Therm. Fluid Sci.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/>
6. API, State of the Art Multiphase Flow Metering, API Publication 2566, May 2004.
7. Abbas H.A.M. Hasan, G. P. Lucas, Experimental and theoretical study of the gas-water two-phase flow through a conductance multiphase Venturi meter in vertical annular (wet gas) flow, *Nuclear Engineering and Design* 241 (2011) 1998-2005
8. E. Emerson dos Reis, L. Golstein Jr., On the measurement of the flow rate oh horizontal two-phase flows in proximity of the transition lines which separates two different flow patterns, *Flow Measurements and Instrumentation* 19 (2008) 269-282
9. Grazia Monni, Mario De Salve, Bruno Panella, Two-phase flow measurements at high void fraction by a Venturi meter, *Progress in Nuclear Energy* 77 (2014) 167-175
10. Monni G, De Salve M, Panella B, TWO-PHASE ANNULAR FLOW IN A VERTICALLY MOUNTED VENTURI FLOW METER, HEFAT2014, 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 14 – 16 July 2014, Orlando, Florida
11. M. Damsohn, H. M. Prasser, High-speed liquid film sensor for two-phase flows with high spatial resolution based on electrical conductance, *Flow Measurement and Instrumentation* 20(2009) 1-14
12. A. Achilli, M. Greco, Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore, ENAE-MDS, Ricerche del sistema elettrico, Report 210/71
13. Grazia Monni, Mario De Salve, Bruno Panella, and Carlo Randaccio, Electrical Capacitance Probe Characterization in Vertical Annular Two-Phase Flow, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Volume 2013, Article ID 568287, 12 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/568287>
14. R.N. Steven, Wet gas metering with horizontally mounted Venturi meter, *Flow Measurement and Instrumentation* 12 (2002), 361-372
15. Richard Steven, Andrew Hall, Orifice plate meter wet gas flow performance, *Flow Measurement and Instrumentation* 20 (2009) 141-151
16. P.B. Whalley, Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow, Clarendon Press Oxford, 1987, pag. 54,55
17. R.W.K Allen, A. van Santen, Designing for pressure drop in Venturi scrubbers: the importance of dry pressure drop, *The Chemical Engineering Journal* 61 (1996) 203-211
18. G. Salque, P. Gajan, A. Strzelecki, J.P. Couput., L. El-Hima, Atomisation rate and gas/liquid interactions in a pipe and a venture: Influence of the physical properties of the liquid film, *International Journal of Multiphase flow* 51 (2013) 87-100
19. Azzopardi B. J., Govan A.H. The modeling of Venturi scrubbers, *Filtr.* Sep. 21, 196-200
20. Fernandez-Alonso D.et. al. , Gas/liquid flow in laborator scale Venturis, *ICHemE*, 77 (1999), pp. 205-211
21. Chisholm D., Two-phase flow through sharp edged orifices. *J. Mech. Eng. Sci.*, 1977;19(3):128-30
22. Abdul-Razzak A, Shoukri M., Chang J. S., Measurement of two-phase refrigerant liquid – vapor mass flow rate- Part I: Venturi and void fraction meters, Part II: Turbine and void fraction flow meters, Part III: Comminated turbine and Venturi meters and comparison with other methods, *ASHRAE Transactions* 1995; 101(2):511-538
23. Fang Lide, Zhang Tao, Performance of a Horizontally mounted venuri in low pressure wet gas flow, *Chinese J. of Chemical Engineering* 16(2) 320-324 (2008)
24. Murdock J.W., Two-phase flow measuraments with orifices, *J. Basic Eng. Trans. ASME* 1962;84(4):419-33
25. Cadalen Sebastien, Lance Michel, A mechanics approach for wet gas flow metering, theory and application to flow loop test, *International Journal of Multiphase Flow* 37 (2011) 260-267

26. Denghui He, Bofeng Bai, Numerical investigation of wet gas flow in Venturi meter, *Flow Measurement and Instrumentation* 28 (2012) 1-6
27. A. Lupeau, B. Platet, P. Gajan, A. Strzelecki, J. Escande, J. P. Couput, Influence of the presence of an upstream annular liquid film on the wet gas flow measured by a Venturi in a downward vertical configuration, *Flow Measurement and Instrumentation* 18 (2007) 1-11
28. Ishii, M., Mishima, K., 1989. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* 32, 1835–1846
29. A. Bieberle, D. Hoppe, E. Schleicher, U. Hampel, Void measurement using high-resolution gamma-ray computed tomography, *Nuclear Engineering and Design* 241 (2011) 2086-2092
30. F., H. Haeghel, E. Zimmermann, O. Essetr, K. B reede, J. A. Huisman, W. Glaas, J. Berwwix, H. Vereecken, Determination of the distribution of air and water in porous media by electrical impedance tomography and magneto-electrical imaging, *Nuclear Engineering and Design* 241(2011) 1959-1969
31. B. Zhou, J. Zhang, C. Xu, S. Wang, Image reconstruction in electrostatic tomography using a priori knowledge from ECT, *Nuclear Engineering and Design* 241 (2011) 1952-1958.
32. M. De Salve, G. Monni, B. Panella, A Model for a Spool Piece made up of Venturi and Void fraction Flow Meter in Horizontal Flow, *Trans. ANS*, Vol. 108 1013-1016, Atlanta, Georgia, June 16–20 (2013)

ALLEGATI

ALLEGATO I

Disegno Venturi



1.2 ALLEGATO II

Matrice Sperimentale I: valori medi misurati dei principali parametri in deflusso verticale anulare

RUN	p_{inlet} [bar]	T_{inlet} [°C]	W_{air} [kg/s]	W_{water} [kg/s]	x	α	$Dp_{Venturi}$ in-thr [mbar]	$Dp_{Venturi}$ in-out [mbar]
1	1.01	32	0.104	0.0042	0.961	0.991	39.5	18.7
2	1.01	32	0.104	0.0083	0.926	0.987	39.8	20.2
3	1.02	32	0.103	0.0167	0.861	0.985	40.6	21.7
4	1.02	32	0.103	0.0194	0.842	0.982	40.4	22.1
5	1.01	32	0.095	0.0042	0.958	0.989	32.5	14.0
6	1.01	32	0.094	0.0083	0.919	0.983	32.8	16.2
7	1.01	32	0.094	0.0139	0.871	0.980	33.6	18.8
8	1.01	32	0.094	0.0194	0.829	0.977	33.5	20.2
9	1.00	31	0.085	0.0042	0.953	0.982	26.2	13.2
10	1.00	31	0.084	0.0083	0.910	0.980	26.3	14.5
11	1.01	31	0.084	0.0139	0.859	0.976	27.0	15.7
12	1.01	31	0.084	0.0194	0.812	0.973	26.9	16.3
13	1.00	33	0.103	0.0042	0.961	0.991	39.4	17.7
14	1.00	32	0.103	0.0083	0.925	0.987	39.4	19.3
15	1.01	32	0.103	0.0139	0.881	0.985	39.3	20.6
16	1.01	33	0.103	0.0194	0.841	0.978	40.3	21.9
17	1.00	33	0.094	0.0042	0.957	0.988	32.6	14.0
18	1.00	33	0.093	0.0083	0.918	0.983	32.4	16.3
19	1.00	33	0.093	0.0139	0.870	0.980	32.6	16.8
20	1.00	33	0.093	0.0194	0.827	0.975	32.9	21.6
21	1.00	33	0.090	0.0042	0.956	0.985	29.5	12.6
22	1.00	33	0.090	0.0083	0.915	0.982	29.5	14.3
23	1.00	33	0.076	0.0042	0.948	0.980	20.9	10.6
24	1.00	33	0.079	0.0042	0.950	0.985	22.8	10.7
25	1.00	33	0.085	0.0042	0.953	0.986	26.1	12.0
26	1.01	33	0.085	0.0083	0.910	0.982	26.2	13.3
27	1.01	33	0.084	0.0139	0.859	0.978	27.0	14.0
28	1.01	33	0.084	0.0194	0.812	0.973	26.7	14.6
29	1.01	34	0.095	0.0042	0.958	0.988	33.1	14.3
30	1.01	33	0.095	0.0083	0.919	0.984	33.5	16.1
31	1.01	33	0.094	0.0139	0.872	0.981	33.8	17.4
32	1.02	33	0.094	0.0194	0.829	0.977	33.4	18.4
33	1.01	32	0.094	0.0250	0.790	0.973	33.7	19.3
34	1.01	32	0.103	0.0042	0.961	0.991	39.0	18.1
35	1.01	33	0.102	0.0083	0.925	0.987	39.2	19.9
36	1.01	33	0.102	0.0139	0.881	0.985	39.7	21.2
37	1.02	33	0.102	0.0194	0.840	0.982	39.8	22.5
38	1.02	33	0.102	0.0250	0.804	0.975	39.8	23.6
39	1.00	31	0.085	0.0042	0.953	0.988	26.1	12.2
40	1.00	31	0.095	0.0042	0.958	0.989	32.5	14.5
41	1.01	31	0.103	0.0042	0.961	0.994	39.2	18.4
42	1.00	31	0.084	0.0083	0.909	0.980	26.7	13.2
43	1.01	31	0.094	0.0083	0.918	0.983	33.7	16.4
44	1.01	32	0.102	0.0083	0.925	0.988	39.4	19.9
45	1.01	32	0.083	0.0167	0.833	0.977	26.8	14.3
46	1.01	32	0.094	0.0167	0.850	0.981	33.9	18.0
47	1.01	32	0.102	0.0167	0.859	0.984	39.9	21.8
48	1.00	32	0.083	0.0222	0.788	0.975	27.0	15.0
49	1.00	32	0.083	0.0222	0.789	0.974	27.2	14.9
50	1.01	32	0.102	0.0222	0.821	0.983	40.4	22.8

Matrice Sperimentale II: valori medi misurati dei principali parametri in deflusso orizzontale stratificato e anulare-stratificato

RUN	p _{inlet} [bar]	T _{inlet} [°C]	W _{air} [kg/s]	W _{water} [kg/s]	x	α	Dp _{Venturi in-thr} [mbar]	Dp _{Venturi in-out} [mbar]
1	1.00	79	0.065	0.0039	0.944	0.995	16.7	8.8
2	0.99	76	0.064	0.0083	0.885	0.991	16.2	10.2
3	0.99	75	0.063	0.0208	0.752	0.987	15.7	9.8
4	0.99	75	0.063	0.0278	0.693	0.985	15.4	9.9
5	0.99	74	0.063	0.0389	0.617	0.979	15.3	10.8
6	1.00	85	0.082	0.0044	0.948	0.997	27.7	14.6
7	1.00	87	0.081	0.0083	0.907	0.996	27.5	15.5
8	1.00	88	0.081	0.0208	0.795	0.992	27.1	16.7
9	1.00	89	0.080	0.0278	0.742	0.989	26.6	18.8
10	1.00	90	0.079	0.0389	0.671	0.987	26.2	20.5
11	1.00	106	0.096	0.0039	0.961	0.998	41.1	23.3
12	1.01	107	0.097	0.0083	0.921	0.998	41.8	25.2
13	1.01	107	0.098	0.0208	0.825	0.997	42.4	27.8
14	1.01	108	0.099	0.0278	0.781	0.996	43.3	30.0
15	1.01	110	0.099	0.0389	0.718	0.995	43.6	32.4
16	0.98	75	0.063	0.0039	0.942	0.997	14.9	8.1
17	0.99	71	0.063	0.0083	0.884	0.990	15.1	11.3
18	0.99	71	0.063	0.0208	0.751	0.985	15.5	9.9
19	0.99	66	0.063	0.0278	0.695	0.982	16.0	10.6
20	0.99	66	0.063	0.0389	0.619	0.978	16.7	11.8
21	0.99	76	0.085	0.0039	0.956	0.998	26.3	15.2
22	1.00	77	0.085	0.0083	0.911	0.997	26.8	16.4
23	1.00	78	0.085	0.0208	0.802	0.993	27.3	17.4
24	1.00	78	0.084	0.0278	0.752	0.990	27.4	18.4
25	1.00	76	0.084	0.0389	0.684	0.988	28.8	20.4
26	1.00	89	0.102	0.0039	0.963	0.998	41.0	23.3
27	1.01	84	0.103	0.0083	0.925	0.997	41.4	25.7
28	1.01	88	0.104	0.0208	0.833	0.996	42.2	28.1
29	1.01	88	0.103	0.0278	0.788	0.996	43.0	29.7
30	1.01	85	0.103	0.0389	0.726	0.995	44.2	32.2

Appendice : modelli per i Venturi-scrubber

Pressure drop in Venturi scrubber

Calvert (1968)	$\Delta p = \rho_l u_{gt}^2 \left(\frac{Q_l}{Q_g} \right)$	sovrastima le cadute di pressione per accelerazione Q _l portata volumetrica fase liquida, Q _g portata volumetrica fase gas
Goel (1975)	$\Delta p = \beta \rho_l u_{gt}^2 \left(\frac{Q_l}{Q_g} \right)$ $\chi = \frac{3l_t \rho_g C_{Da}}{16d_D \rho_l} + 1 ; \text{lunghezza dimensionata gola}$ $\beta = 2 \left[1 - \chi^2 + \sqrt{\chi^4 + \chi^2} \right]$	d _D diametro gocce
Leith (1985)	$\Delta p = \rho_l u_{gt}^2 \frac{Q_l}{Q_g} \left[\beta \left(1 - \frac{u_{gf}}{u_{gt}} \right) + \left(\frac{u_{gf}}{u_{gt}} \right)^2 \right]$	u _{gf} velocità del gas all'uscita del condotto u _{gt} velocità del gas nella gola

Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Il gruppo di lavoro impegnato nell'attività è costituito da due professori ordinari di Impianti nucleari del Politecnico di Torino (Dipartimento Energia), Mario De Salve e Bruno Panella, dal neo Dottore di ricerca, Grazia Monni e dal Dottorando Marco Caramello.

De Salve e Panella lavorano da più di 35 anni al Politecnico nel campo della Ingegneria nucleare, con particolare riferimento alla termoidraulica e alla sicurezza e hanno portato avanti molte ricerche sperimentali nel laboratorio di termoidraulica del Dipartimento di Energetica (ora Dipartimento Energia) del Politecnico di Torino, pubblicando i risultati su rivista o in atti di Congresso nazionali e internazionali. Sono anche autori di diversi rapporti nell'ambito dei PAR trascorsi.

Grazia Monni, laureata con una tesi di termo - fluidodinamica computazionale sul combustibile dei reattori veloci a gas, svolta a Cadarache, sotto la loro guida ha portato avanti ricerche sperimentali nel campo della strumentazione bifase, ed è coautrice di alcune pubblicazioni apparse in Atti di Congressi anche internazionali., ha completato il suo dottorato con una tesi sulla strumentazione speciale da impiegare nei simulatori degli impianti nucleari.

Marco Caramello, nell'ambito del dottorato, svolge attività di ricerca nella simulazione con codici di sistema (RELAP) dei sistemi di rimozione della potenza degli impianti nucleari con sistemi passivi ed attivi. E' attivo anche nella ricerca sperimentale nel contesto della termo fluidodinamica bifase.

Maggiori dettagli e l'elenco delle pubblicazioni più recenti si possono trovare nella rubrica del sito Web del Politecnico di Torino (<http://www.polito.it>).