Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Analisi dei Dati Sperimentali Disponibili dello Spool Piece per Stimare e Ridurre l'Incertezza sulla Misura della Portata di Fluido Bi-fase

C. Randaccio

Report RdS/PAR2013/094

Analisi dei Dati Sperimentali Disponibili dello Spool Piece per Stimare e Ridurre l'Incertezza sulla Misura della Portata di Fluido Bi-fase

C. Randaccio - SIET

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

ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS-LP1-037	L	1	84

Titolo

Analisi dei dati sperimentali disponibili dello Spool Piece per stimare e ridurre l'incertezza sulla misura della portata di fluido bi-fase

Ente emittente SIET

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Reattori e sistemi innovativi
Sicurezza Nucleare

Sommario

L'attività, descritta nel presente rapporto di analisi, contiene l'analisi approfondita di tutti i dati sperimentali ricavati nelle varie campagne di prova dello Spool Piece con lo scopo di definirne potenzialità e limiti di utilizzo per impiego in sperimentazioni su sistemi integrali tipo SPES-3.
Considerando una matrice di prove tridimensionale portata-titolo-pressione, sono state definite le zone in cui lo Spool Piece non può essere impiegato per limiti tecnici e le zone in cui invece può essere impiegato.
Sulla base dell'analisi dei dati precedentemente acquisiti e di nuovi test di stabilità, è stata valutata in modo accurato l'incertezza introdotta dai diversi strumenti dello spool piece nella misura del parametro "portata massica". Il valore dell'incertezza globale associata all'impiego dello spool piece attuale risulta eccessivamente elevata in varie zone della matrice dei parametri di riferimento.
Le cause principali sono dovute all'incertezza associata alla misura di grado di vuoto, penalizzata da derive di origine termica dell'elettronica della sonda capacitiva e all'incertezza della misura del flusso di quantità di moto dovuta ad alcuni limiti intrinseci nel drag disk e nel tubo di Pitot disponibili. Per queste specifiche cause d'incertezza sono stati individuati alcuni miglioramenti fattibili che potranno essere realizzate su nuovi strumenti e che sono in grado di ridurre il valore dell'incertezza media al di sotto del 15%.

Note

Copia n.			In carico a:			
2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	17/09/2014	NOME	P. Meloni		F. De Rosa
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE

		EMITTENTE *issued by* **Unità di Produzione (Sezione Ingegneria)** *Production Unit (Engineering Section)*	
CLIENTE: *client* **SIET S.p.A.**	**COMMESSA:** *job* **1IIADJSS40077**	**PAGINA:** *page* **1**	**DI:** *of* **83**
IDENTIFICATIVO: *document*	**02314 RA 14**	**Classe Ris.:** *confidentiality*	**Allegati:** *enclosures* **1**
TITOLO: *title*	**Analisi dei dati sperimentali disponibili dello Spool Piece per stimare e ridurre l'Incertezza sulla misura della portata di fluido bi-fase**		
REDATTORI: *prepared by*	**C.Randaccio**		

LISTA DI DISTRIBUZIONE
Distribution list

ENEA (P.Meloni)

REV *rev*	DATA EMISSIONE *issue date*	DATA AUTORIZZAZIONE (*) *authorization date*	DESCRIZIONE *description*	REDAZIONE *prepared by*	APPROVAZIONE *approved by*
0	25-07-2014	ENEA	ISSUE	C.Randaccio	A. Achilli

(*) Autorizzazione esterna: *External authorization* ☐ Necessaria / *Required* ☒ Non necessaria */Not required* Organismo esterno: *External organization* --

Informazioni strettamente riservate di proprietà SIET SpA - Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui sono state fornite. *Confidential information property of SIET SpA - Not to be used for any purpose other than those for which it is supplied*.

SOMMARIO

SOMMARIO 2
LISTA DELLE TABELLE 3
LISTA DELLE FIGURE 4
1. Obiettivo 7
2. Introduzione 8
3. Spool Piece 9
4. Sperimentazione sullo Spool Piece 11
5. Modello matematico per il calcolo della portata bifase 12
6. Analisi dei dati sperimentali disponibili dello Spool Piece 14
7. Analisi della stabilità del segnale degli elettrodi della sonda 22
7.1 Prove con solo vapore 22
7.2 Prove con sola acqua 32
7.3 Influenza dei parametri ambientali sulla deriva del segnale 38
8. Modifiche alla Sonda capacitiva 49
9. Limiti di utilizzo dello Spool Piece 50
10. Dimensionamento del Venturimetro 53
11. Calcolo dell'incertezza degli strumenti dello Spool Piece 58
11.1 Vortex 58
11.2 Sonda capacitiva 58
11.3 Misuratori di flusso di quantità di moto 60
11.4 Venturi 63
12. Calcolo dell'incertezza sulla misura di portata con lo spool piece 65
13. Conclusioni 80
14. Bibliografia 81

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1: Massimi e minimi valori dei parametri termoidraulici a valle della generica rottura in SPES3 9
Tabella 2: strumentazione e sistema acquisizione dati 11
Tabella 3: Limiti della matrice sperimentale 14
Tabella 4: prima campagna sperimentale di prove 15
Tabella 5: seconda campagna sperimentale di prove 18
Tabella 6: Misure Spool Piece 20
Tabella 7: Test con solo vapore 22
Tabella 8: Test in solo vapore: segnali sonda capacitiva per ciascuna coppia di elettrodi 28
Tabella 9: Variazione media di segnale di elettrodi omologhi durante i test in solo vapore 31
Tabella 10: Deriva percentuale media del segnale in presenza di solo vapore rispetto al range di variazione degli elettrodi 36
Tabella 11: Temperatura e umidità assoluta 47
Tabella 12: Massimi e Minimi valori delle grandezze termoidrauliche 50
Tabella 13: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea SPLIT del DVI 53
Tabella 14: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea SPLIT del EBT 53
Tabella 15: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea SPLIT del ADS ST 53
Tabella 16: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS ST stadio I 54
Tabella 17: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS DT stadio I 54
Tabella 18: dimensionamento venturimetro linea SPLIT del DVI 56
Tabella 19:dimensionamento venturimetro linea SPLIT del EBT 56
Tabella 20: dimensionamento venturimetro linea SPLIT del ADS 57
Tabella 21: Effetto della temperatura sulla misura di grado di vuoto 59
Tabella 22: errore di misura a seconda dei profili di flusso di quantità di moto 63
Tabella 23: Componenti di incertezza degli strumenti dello spool piece 76
Tabella 24: Componenti di incertezza degli strumenti dello spool piece "migliorato" 76

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1: Spool Piece con sonda capacitiva, drag disk, Pitot e vortex 10
Figura 2: Correlazione tra velocità della fase vapore (m/s) e segnale del Vortex (V) 16
Figura 3: Confronto tra il grado di vuoto sperimentale e quello teorico vs titolo di vapore 16
Figura 4:Correlazione Flusso di quantità di moto teorico vs sperimentale 17
Figura 5: Correlazione tra velocità della fase vapore (m/s) e segnale del Vortex (V) 17
Figura 6: Confronto tra il grado di vuoto sperimentale e quello teorico vs titolo di vapore 19
Figura 7: Portata massica bifase Coriolis vs Spool Piece 21
Figura 8: Errore percentuale sulla densità in funzione dell'errore sul grado di vuoto 21
Figura 9: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 180° 29
Figura 10: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 180° 29
Figura 11: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 45° 30
Figura 12: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 45° 30
Figura 13: Test con sola acqua: segnale elettrodi a 45° 32
Figura 14: Test con sola acqua: segnale elettrodi a 45° 32
Figura 15: Test con sola acqua: segnali elettrodi a 180° 33
Figura 16: Test con sola acqua: segnali elettrodi a 180° 33
Figura 17: range di variaizone elettrodi a 22.5° durante le prove del 1,2,3 e 5 luglio 34
Figura 18: range di variazione elettrodi a 90° durante le prove del 1,2,3 e 5 luglio 34
Figura 19: range di variazione elettrodi a 180° durante le prove del 1,2,3 e 5 luglio 35
Figura 20:Deriva percentuale media del segnale di riferimento rispetto al range di variazione degli elettrodi 36
Figura 21: segnale elettrodi a 22.5° vs temperatura ambiente (2 luglio) 38
Figura 22: segnale elettrodi a 22.5° vs temperatura ambiente (3 luglio) 39
Figura 23: segnale elettrodi a 22.5° vs temperatura ambiente (8 luglio) 39
Figura 24: segnale elettrodi a 180° vs temperatura ambiente (2 luglio) 40
Figura 25: segnale elettrodi a 180° vs temperatura ambiente (3 luglio) 40
Figura 26: segnale elettrodi a 180° vs temperatura ambiente (8 luglio) 41
Figura 27: segnale elettrodi 1-16 nei tre giorni di prove vs temperatura 41
Figura 28:segnale elettrodi 7-15 nei tre giorni di prove vs temperatura 42
Figura 29: segnale elettrodi a 22.5° vs umidità (2 luglio) 43
Figura 30: segnale elettrodi a 22.5° vs umidità (3 luglio) 43
Figura 31: segnale elettrodi a 22.5 vs umidità (8 luglio) 44
Figura 32: segnali elettrodi a 180° vs umidità (2 luglio) 44
Figura 33: segnali elettrodi a 180° vs umidità (3 luglio) 45
Figura 34: segnali elettrodi a 180° vs umidità (prove 8 luglio) 45
Figura 35: segnale coppia di elettrodi 1-16 vs umidità nei tre giorni di prova 46
Figura 36: segnale coppia elettrodi 7-15 vs umidità nei tre giorni di prova 46
Figura 37: segnale elettrodi a 22.5° in funzione della temperatura dell'elettronica 47
Figura 38: segnale elettrodi a 180° in funzione della temperatura dell'elettronica 48
Figura 39: Velocità della fase vapore vs Grado di vuoto: campi di impiego degli strumenti 51
Figura 40: Flusso di quantità di moto vs grado di vuoto: campi di impiego degli strumenti 52
Figura 41: Flusso di quantità di moto vs velocità della fase vapore: campi di impiego degli strumenti 52
Figura 42: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea dell'ADS ST 54
Figura 43: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea dell'ADS DT 55
Figura 44: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea SPLIT del DVI 55
Figura 46: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea SPLIT dell'ADS 56
Figura 47: Effetto della temperatura sulla misura del grado di vuoto 59
Figura 48: Effetto della pressione statica sulla misura del drag disk 60
Figura 49: profili di velocità 61
Figura 50: profili di densità 62
Figura 51: distribuzioni di flusso di quantità di moto 62
Figura 52: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 15 bar 73
Figura 53: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 10 bar 73
Figura 54: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 5 bar 74
Figura 55: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 3 bar 74
Figura 56: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 1.5 bar 75
Figura 57: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a titoli di vapore del 90% 75
Figura 58: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 15 bar 78

Figura 59: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 10 bar..... 78
Figura 60: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 5 bar..... 79
Figura 61: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 3 bar..... 79

LISTA DEGLI ALLEGATI

Schema di flusso strumentato dell'impianto di prova SPOOL PIECE……83

1. Obiettivo

Questo documento contiene l'analisi approfondita dei dati sperimentali disponibili delle varie campagne di prova effettuate sullo spool piece, complesso strumentale utilizzato per la misura della portata massica di fluidi bifase. Tale analisi è stata condotta con lo scopo di definire le potenzialità ed i limiti di utilizzo dello spool piece, e per quanto possibile individuare interventi di riduzione di questi limiti, per essere impiegato in sperimentazioni su facility integrali tipo SPES-3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza).

2. Introduzione

Negli anni passati la SIET ha svolto un'attività di sviluppo di un dispositivo di misura complesso, "Spool Piece", per la misura della portata massica bifase nelle linee per la simulazione delle rotture e nelle linee di scarico dell'ADS (Automatic Depressurization System) dell'impianto sperimentale SPES-3. L'attività si è svolta in diverse fasi riguardanti la definizione del modello matematico, la sperimentazione su singoli componenti (per esempio la caratterizzazione della sonda capacitiva per la misurazione del grado di vuoto), fino alla sperimentazione dello spool piece nel suo complesso, oggetto delle attività del PAR-2012.

L'obiettivo dell'attività prevista nel PAR 2012 consisteva nella messa a punto finale dello spool piece. A tale scopo, la sonda capacitiva ed il drag disk sviluppati da SIET sono stati integrati con uno strumento per la misura della velocità della fase vapore, un flussimetro a generazione di vortici, "vortex". La sperimentazione sullo spool piece, realizzata su un impianto in grado di erogare vapore con potenze termiche di alcune centinaia di kW, ha messo in evidenza alcuni aspetti critici legati sia alla strumentazione sia al modello matematico per il calcolo della portata bifase.

Il drag disk si è rivelato poco sensibile alle variazioni di pressione cinetica del fluido. Questo perché il segnale efficace del drag disk risulta, per i bassi flussi della quantità di moto generati alla potenza disponibile, dell'ordine del 1% del fondo scala dello strumento.
D'altra parte il vortex non è in grado di misurare velocità del vapor saturo superiore ai 100-120 m/s e quindi non è idoneo a coprire l'interno campo specificato per le prove SPES-3.
L'aspetto più critico messo in evidenza dalle prove riguarda, però, la sensibilità del modello matematico rispetto alle variazioni di densità della miscela. Infatti, l'incertezza nella misura del grado di vuoto, peraltro ragionevole, determina errori ben più elevati nei valori di portata bifase calcolati.

Sulla base delle risultanze sopra esposte, la prosecuzione della ricerca in questo campo deve necessariamente passare attraverso un'analisi approfondita di tutti i dati sperimentali ricavati nelle varie campagne di prova effettuate e delle problematiche tecniche emerse, con lo scopo primario di definire chiaramente le potenzialità ed i limiti di utilizzo dello spool piece per utilizzi in sperimentazioni tipo SPES-3.

Tale studio è oggetto del seguente rapporto di analisi.

3. Spool Piece

La determinazione della portata massica bifase non è realizzabile mediante una misura diretta, ma richiede l'utilizzo di un set di strumenti eterogenei, denominati SPOOL PIECE, che, nel caso di SPES3, è composto da tre strumenti: un misuratore di grado di vuoto, un misuratore di flusso della quantità di moto e un misuratore di velocità della fase vapore [3].

Tale strumentazione non è disponibile commercialmente o, se disponibile, richiede delle modifiche. Per questo motivo negli anni scorsi sono state avviate attività di ricerca finalizzate allo sviluppo e messa a punto di strumentazione per la misurazione di parametri tipici della termoidraulica bifase.

Dallo studio dei transitori incidentali in SPES3, tramite simulazione con il codice di calcolo RELAP5 [1], [2], sono stati ricavati gli intervalli di misura delle grandezze d'interesse (Tabella 1) e, quindi, definite le specifiche tecniche per la misurazione della portata bifase [3], [4].

Note le grandezze rilevate dagli strumenti facenti parte dello SPOOL PIECE, sono state ricavate le correlazioni matematiche che permettono di ottenere la portata massica bifase [5].

PARAMETRO TERMOIDRAULICO		MIN	MAX
Temperatura	[°C]	36	216
Pressione	[MPa]	0.1	2
Flusso quantità di moto	[Pa]	0	900796
Velocità fase vapore	[m/s]	0	400
Velocità fase liquida	[m/s]	0	200
Velocità media miscela	[m/s]	0	330
Grado di vuoto	[%]	60	100

Tabella 1: Massimi e minimi valori dei parametri termoidraulici a valle della generica rottura in SPES3

Per la misura del grado di vuoto della miscela si è deciso di intraprendere lo sviluppo di una sonda capacitiva. Tale dispositivo si basa sulla rilevazione della variazione della costante dielettrica del fluido in presenza di liquido o vapore [6], [7].
Il progetto e lo sviluppo della sonda capacitiva è descritto approfonditamente nei documenti [6],[7],[9]. Il modello di interpretazione dei segnali è descritto nei documenti [9] e [10].

Per la misura del flusso della quantità di moto è stato sviluppato un sistema tipo "drag disk" che impiega come elemento sensibile una cella di carico stagna da 20 kg per applicazioni ad alta temperatura [8]. L'elemento sensibile alla forza esercitata dal fluido è costituito da un disco forato, posto al centro della tubazione da 3'' ed è connesso con un'asta alla cella di carico equipaggiata con un sensore costituito da un ponte di wheatstone. Lo sviluppo e la caratterizzazione del sistema è descritto nei documenti [8], [9] e [10].

Nella campagna sperimentale del 2013 è stata evidenziata una scarsa sensibilità del drag disk ai bassi valori di flusso di quantità di moto generati che sono limitati dalla potenza disponibile. Il segnale efficace del drag disk risulta infatti, per i bassi flussi della quantità di moto generati, dell'ordine dell'1% del fondo scala dello strumento ($20\ kg$).
Per questa ragione si è deciso di utilizzare un sistema alternativo costituito da un tubo di Pitot disposto trasversalmente rispetto alla direzione del flusso e collegato ad un trasmettitore differenziale di pressione.
Il tubo di Pitot è collegato alla presa positiva di un trasmettitore differenziale di pressione. La presa negativa è collegata idraulicamente alla sezione di prova stessa. Pertanto, il trasmettitore differenziale di pressione ci dà direttamente in uscita la pressione cinetica del fluido.

Figura 1: Spool Piece con sonda capacitiva, drag disk, Pitot e vortex

Completa lo spool piece un flussimetro a generazione di vortici per la misura di velocità della fase vapore della miscela bifase. La velocità massima rilevabile dallo strumento è pari a 120 m/s corrispondenti a circa il 30 % del range di variazione atteso nei transitori incidentali dell'impianto SPES-3. Lo strumento presenta un errore massimo di misura inferiore all'1% del valore istantaneo di velocità, per velocità del vapore inferiori a 75 m/s e un errore di misura massimo inferiore allo 0.75% del valore di fondo scala dello strumento, per velocità comprese tra 75 e 120 m/s.

4. Sperimentazione sullo Spool Piece

Le attività di sviluppo dello spool piece per la misura della portata massica bifase sulle linee di rottura e dell'ADS di SPES-3 si sono svolte in diverse fasi riguardanti l'elaborazione del modello matematico [5], il progetto [6] e la sperimentazione sui singoli componenti [8], [9], fino alla sperimentazione sullo spool piece completo avvenuta nel corso del PAR2012.

La facility sperimentale utilizzata per effettuare le prove sullo spool piece è costituita da un impianto in grado di erogare vapore a portata e titolo controllati, con potenze termiche dell'ordine di alcune centinaia di kW ad una sezione orizzontale in cui è installata la strumentazione speciale. La produzione di vapore avviene grazie a generatori di corrente continua collegati tramite clamp direttamente a spire elicoidali all'interno delle quali scorre l'acqua che alimenta la sezione di prova.

La portata di liquido in ingresso, la stessa che alimenta la sezione di prova in cui è installato lo spool piece, è misurata attraverso un flussimetro ad accelerazione di Coriolis con fondo scala di 1000 l/h.
Il titolo di vapore in ingresso alla sezione di prova è desumibile dal bilancio energetico del preriscaldatore note la potenza elettrica ceduta al preriscaldatore, la potenza termica dispersa, la pressione e la temperatura in ingresso e in uscita dal preriscaldatore.

La sezione di prova, mostrata in Figura 1, è compresa tra due valvole elettropneumatiche a sfera a chiusura rapida che vengono utilizzate per intercettare un volume di controllo. Su tale volume viene effettuata, per pesatura, la misura di grado vuoto volumetrico medio della miscela bifase.

L'impianto sperimentale, oltre agli strumenti appartenenti allo spool piece, presenta altri strumenti necessari per ricavare le informazioni sul flusso di vapore prodotto. Con riferimento allo schema strumentato riportato in Allegato 1 , la seguente tabella riassume le principali caratteristiche degli strumenti utilizzati.

Plant code [Ref. Allegato 1]	SIET code	Upper Range Value	Measurement description
P0001	S16577	50 bar	Pressione uscita preriscaldatore
P0002	S14736	20 bar	Pressione sezione di prova
DP0001	S 2653	50 kPa	Pressione differenziale al tubo di Pitot
Q0001	S14828	1000 l/h	Portata volumetrica all'uscita della pompa di alimento
TF0001	S16851	250 °C	Temperatura uscita preriscaldatore
TF0001	S15453	250 °C	Temperatura sezione di prova
SAD 1	S3287	-	Sistema acquisizione dati per segnali termoidraulici
SAD 2	S11598	-	Sistema d'acquisizione dati per sonda capacitiva
M0001	CSM 005	5 kg	Bilancia per la misura della massa spillata

Tabella 2: strumentazione e sistema acquisizione dati

A partire dalla conoscenza del titolo, della pressione e della temperature nella sezione di prova, è possibile ricavare il grado di vuoto teorico con il modello semiempirico di Zuber e Findlay [10], [11], [12].
Il grado di vuoto medio calcolato per via teorica sarà confrontato con quello misurato con la sonda capacitiva.

5. Modello matematico per il calcolo della portata bifase

Le grandezze misurate e gli strumenti utilizzati nella sezione di prova dello spool piece sono:

T : temperatura (Termocoppia tipo K TF0002)

p: pressione (Trasmettitore relativo di pressione P0002)

α: grado di vuoto volumetrico (Sonda capacitiva SC0001)

ρV^2: flusso della quantità di moto (Drag disk, Tubo di Pitot F0001 e DP0001)

V_V: velocità della fase vapore (Vortex V0001)

La portata massica bifase può essere ricavata utilizzando due soli strumenti, per esempio sonda capacitiva e drag disk (o Pitot), attraverso l'equazione (1):

$$\dot{m} = A(\rho_{TP}(\rho V^2))^{1/2} \quad (1)$$

In cui :

A: area sezione di prova orizzontale

ρ_{TP}: densità della miscela bifase ricavabile dall'equazione (2)

ρV^2: flusso di quantità di moto ricavabile dalla misura del drag disk (o del Pitot)

La densità media della miscela bifase ρ_{TP} è la media pesata secondo il grado di vuoto α delle densità della fase vapore e della fase liquida ρ_V e ρ_L.

$$\rho_{TP} = \alpha\rho_V + (1-\alpha)\rho_L \quad (2)$$

ρ_V e ρ_L sono calcolate a partire dalla misura di pressione e temperatura del fluido.

Si può dimostrare [5] che l'accoppiamento di drag disk (o Pitot) e sonda capacitiva non fornisce il valore esatto di portata massica . L'errore è descritto dal coefficiente K_S, dato dalla relazione:

$$K_S = \left((x + (1-x)S)\left(x + \frac{(1-x)}{S}\right)\right) \quad (3)$$

In cui:

x : titolo di vapore in ingresso alla sezione di prova

S : slip factor, rapporto tra le velocità della fase vapore e liquida

Per ottenere la portata massica bifase esatta è necessario dividere l'equazione (2) per l'equazione (3). Pertanto l'equazione massica bifase è data dalla relazione:

$$\dot{m} = A\left(\frac{\rho_{TP}(\rho V^2)}{(x+(1-x)S)\left(x+\frac{(1-x)}{S}\right)}\right)^{1/2} \quad (4)$$

Lo slip factor S è pari al rapporto tra le velocità delle fasi vapore e liquido:

$$S = \frac{V_V}{V_L} \quad (5)$$

Mentre l'equazione (6) esplicita la dipendenza del flusso della quantità di moto ρV^2 da altri parametri termoidraulici:

$$(\rho V^2) = \alpha\rho_V V_V^2 + (1-\alpha)\rho_L V_L^2 = V_L^2(\alpha\rho_V S^2 + (1-\alpha)\rho_L) \quad (6)$$

Lo slip factor viene calcolato combinando l'equazione (5) con la (6):

$$S = \sqrt{\frac{(1-\alpha)\rho_L V_V^2}{(\rho V^2)-\alpha V_V^2\rho_V}} \quad (7)$$

Il titolo di vapore invece, viene calcolato, noti α, S, ρ_V e ρ_L dall'equazione fondamentale della termoidraulica:

$$S = \frac{(1-\alpha)}{\alpha}\frac{\rho_L}{\rho_V}\frac{x}{(1-x)} \quad (8)$$

In definitiva per calcolare la portata massica bifase $\dot{m}$ è necessario risolvere il sistema di 5 equazioni (2, 4, 5, 6 e 8) nelle 5 incognite $\dot{m}$, ρ_{TP}, ρV^2, x e S.

6. Analisi dei dati sperimentali disponibili dello Spool Piece

Le prove effettuate sullo spool piece completo, svolte nel corso del PAR2012, possono essere divise in due campagne sperimentali. Nella prima campagna sperimentale, per la misura del flusso della quantità di moto del fluido, è stato utilizzato un sistema simile ad un drag disk. Nella seconda campagna, a causa della scarsa sensibilità del drag disk ai bassi flussi della quantità di moto generati, è stato utilizzato un tubo di Pitot.
Le condizioni termoidrauliche che caratterizzano i punti sperimentali sono riportati all'interno di una matrice tridimensionale portata-titolo-pressione i cui limiti sono riportati in Tabella 3:

Grandezza	**U.M.**	**Min**	**Max**
Portata	[kg/s]	0.132	0.235
Titolo	[%]	70	100
Pressione	[bar]	1	4

Tabella 3: Limiti della matrice sperimentale

La Tabella 4 mostra le caratteristiche principali dei punti sperimentali della prima campagna sperimentale: il numero associato alla prova, la portata misurata con il Coriolis, temperatura e pressione in ingresso al preriscaldatore, la potenza ceduta dal preriscaldatore, pressione e temperatura misurata nella sezione di prova e titolo calcolato dal bilancio energetico nel preriscaldatore.

test numero	**portata [kg/s]**	**T in (°C)**	**p in (bar)**	**Potenza [kW]**	**p sonda [bar]**	**T sonda [°C]**	**X in sonda**
94	0.234	167	39	270	1.3	105	0.62
90	0.236	165	41	290	1.3	106	0.65
86	0.234	167	42	310	1.3	106	0.70
78	0.235	164	44	350	1.3	106	0.76
71	0.236	163	46	390	1.3	106	0.83
82	0.235	166	45	330	1.3	107	0.73
74	0.235	165	46	370	1.3	107	0.81
68	0.236	163	47	410	1.3	107	0.87
83	0.235	165	44	330	2.2	122	0.71
69	0.236	162	46	410	2.2	122	0.86
79	0.235	165	44	350	2.2	123	0.75
72	0.236	164	45	390	2.2	123	0.82
75	0.235	164	45	370	2.2	123	0.79
87	0.234	185	34	310	2.2	123	0.72
91	0.236	166	41	290	2.3	124	0.63
95	0.234	167	39	270	2.4	125	0.60
70	0.236	163	45	410	3.0	133	0.85
73	0.236	164	45	390	3.0	133	0.82
92	0.236	166	41	290	3.0	133	0.62

test numero	portata [kg/s]	T in (°C)	p in (bar)	Potenza [kW]	p sonda [bar]	T sonda [°C]	X in sonda
76	0.235	166	45	370	3.0	133	0.78
84	0.235	166	44	330	3.0	133	0.70
80	0.234	166	44	350	3.0	133	0.75
88	0.236	166	42	310	3.1	134	0.66
96	0.233	167	39	270	3.1	134	0.59
89	0.236	166	42	310	4.0	144	0.65
77	0.235	165	45	370	4.0	143	0.72
93	0.235	166	40	290	4.0	144	0.61
81	0.234	166	45	350	4.0	143	0.74
85	0.234	167	44	330	4.0	143	0.70
97	0.234	167	39	270	4.1	144	0.57
65	0.184	164	32	210	1.2	103	0.61
59	0.184	164	34	250	1.2	103	0.70
62	0.183	165	34	230	1.2	103	0.66
53	0.182	166	36	310	1.2	104	0.86
56	0.183	165	37	280	1.2	104	0.78
47	0.182	165	38	350	1.2	153	0.96
50	0.183	165	36	330	1.2	166	0.90
57	0.183	165	37	280	2.2	122	0.76
48	0.182	166	38	350	2.2	185	0.94
63	0.185	164	34	230	2.2	123	0.63
66	0.184	164	32	210	2.2	123	0.58
51	0.183	165	36	330	2.2	155	0.89
60	0.183	165	34	250	2.2	123	0.69
54	0.182	167	37	310	2.2	123	0.85
58	0.184	163	36	280	3.0	133	0.75
64	0.185	164	34	230	3.0	133	0.62
49	0.183	166	37	350	3.0	195	0.93
52	0.183	166	36	330	3.0	156	0.88
61	0.183	165	34	250	3.0	133	0.68
67	0.183	165	32	210	3.0	133	0.58
55	0.182	167	37	310	3.0	133	0.84

Tabella 4: prima campagna sperimentale di prove

Il segnale in Volt misurato con il Vortex è stato confrontato con la velocità teorica della fase vapore calcolata come:

$$V_V = \frac{x\dot{m}}{A\rho_V}$$

Le velocità rilevate con il vortex sono in buon accordo con le velocità teoriche della fase vapore.
Il grafico mostrato in Figura 2 ci consente di ricavare la correlazione sperimentale tra segnale in uscita in *Volt* del vortex e la velocità della fase vapore.

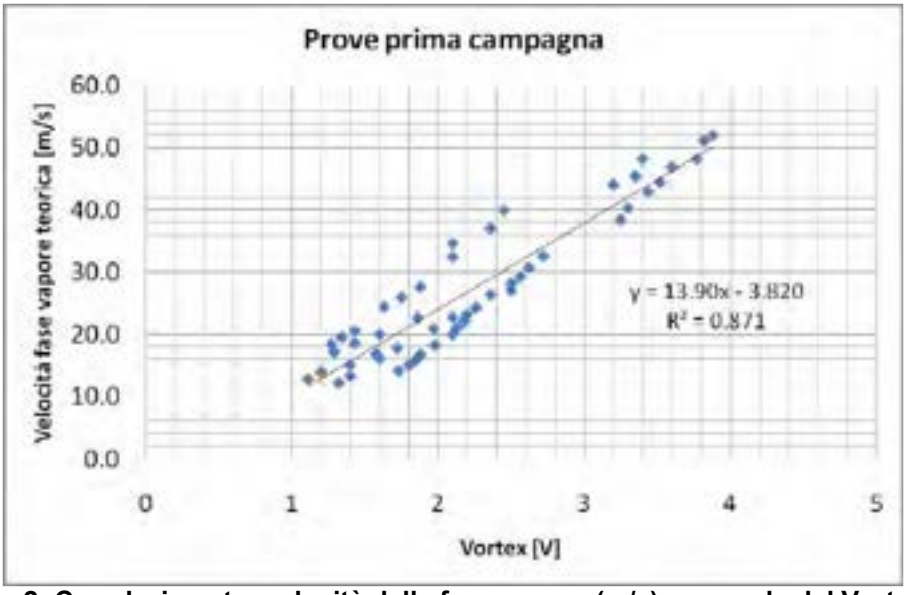


Figura 2: Correlazione tra velocità della fase vapore (m/s) e segnale del Vortex (V)

.

La Figura 3 invece, riporta il confronto tra il grado di vuoto sperimentale, misurato con la sonda capacitiva e il grado di vuoto teorico ricavato dalla modello di Zuber in funzione del titolo di vapore nella sezione di prova.

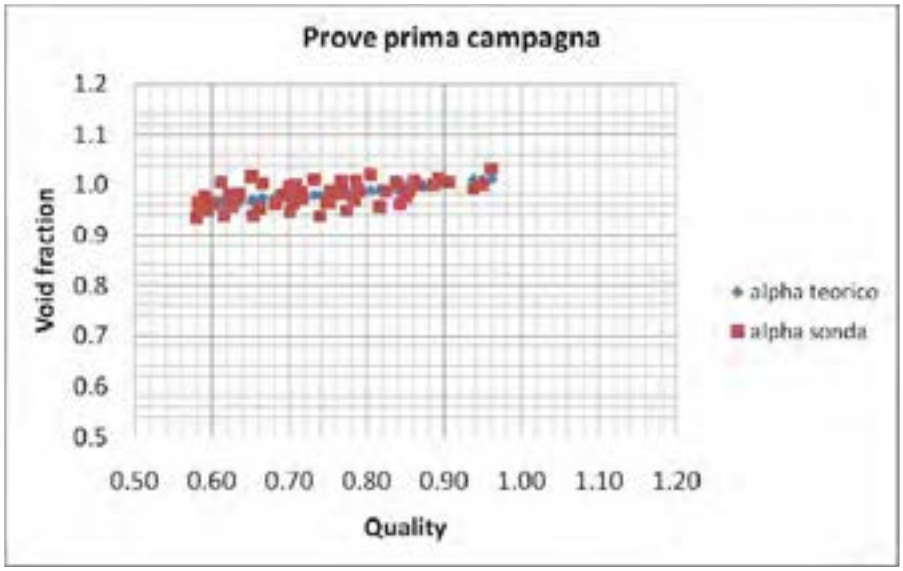


Figura 3: Confronto tra il grado di vuoto sperimentale e quello teorico vs titolo di vapore

Anche per la misura di grado di vuoto esiste un buon accordo tra valori teorici e valori rilevati sperimentalmente.

Il drag disk invece, nel range di portate in cui è stato testato, non può essere utilizzato per misurare correttamente il flusso della quantità di moto. Il segnale efficace del drag disk risulta infatti, per i bassi flussi della quantità di moto generati, dell'ordine dell'1% del fondo scala dello strumento (*20 kg*).

Il drag disk realizzato presso i laboratori SIET, in effetti, era stato concepito per coprire anche i picchi di flusso di quantità di moto previsti nei transitori incidentali di SPES-3, che possono raggiungere valori anche di due ordini di grandezza superiore ai valori raggiunti durante le prove sperimentali condotte nel corso del PAR2012.

Per questa ragione è stata condotta una seconda campagna sperimentale utilizzando come misuratore di flusso della quantità di moto un sistema alternativo [10] basato su tubo di Pitot, connesso ad un trasmettitore differenziale di pressione, installato in direzione trasversale rispetto al flusso, a monte della sonda capacitiva.

La Figura 4 mostra la correlazione tra il flusso della quantità di moto sperimentale, misurata con il Pitot e quello teorico, calcolato a partire dai valori teorici di velocità, grado di vuoto e titolo.

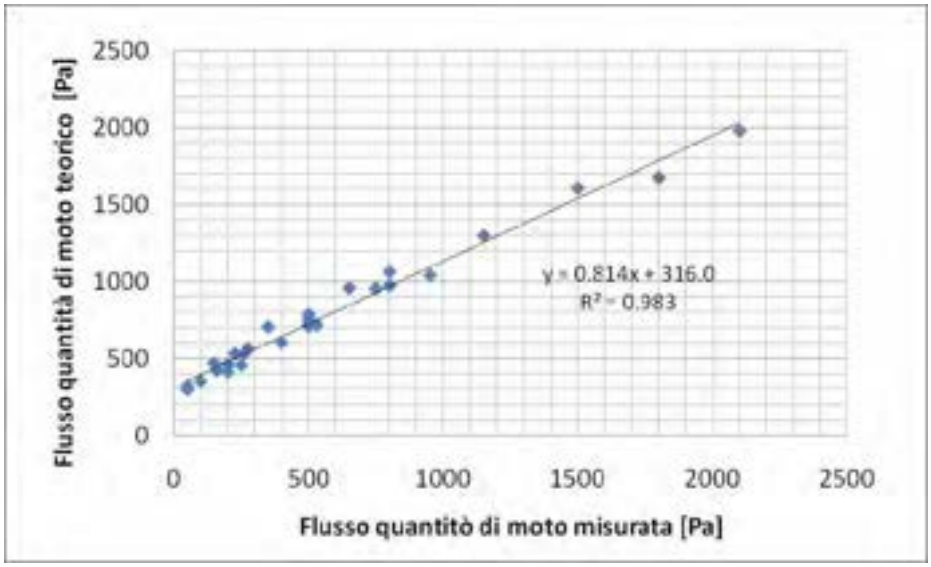


Figura 4:Correlazione Flusso di quantità di moto teorico vs sperimentale

La Figura 5 mostra la correlazione tra la velocità teorica della fase vapore e il segnale in *Volt* misurato dal vortex.

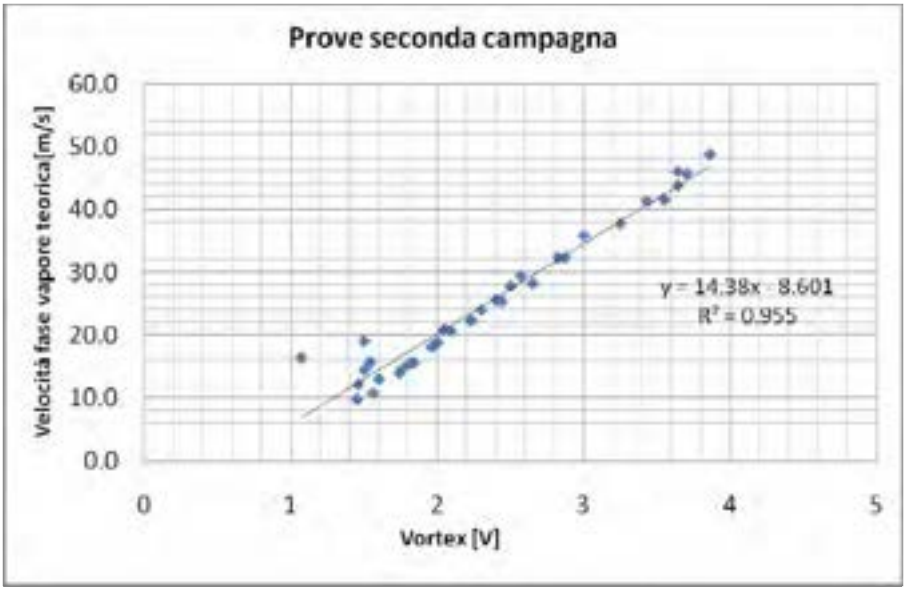


Figura 5: Correlazione tra velocità della fase vapore (m/s) e segnale del Vortex (V)

La Tabella 5 mostra le caratteristiche principali dei punti sperimentali della prima campagna sperimentale: il numero associato alla prova, la portata misurata con il Coriolis, temperatura e pressione in ingresso al preriscaldatore, la potenza ceduta dal preriscaldatore, pressione e temperatura misurata nella sezione di prova e titolo calcolato dal bilancio energetico nel preriscaldatore.

test numero	portata [kg/s]	T in (°C)	p in (bar)	Potenza [kW]	p sonda [bar]	T sonda [°C]	X in sonda
105	0.233	158	47	370	1.4	108	0.89
109	0.234	160	44	330	1.4	107	0.82
113	0.234	161	46	350	1.4	108	0.86
101	0.233	158	50	410	1.4	109	0.97
102	0.233	158	50	410	2.2	122	0.96
106	0.233	158	46	370	2.2	123	0.88
114	0.234	161	45	350	2.2	122	0.84
110	0.234	160	44	330	2.3	124	0.80
103	0.233	158	50	410	3.0	134	0.95
115	0.234	161	45	350	3.0	134	0.84
107	0.233	158	46	370	3.1	135	0.87
111	0.234	160	44	330	3.1	135	0.80
104	0.233	158	50	410	4.0	143	0.95
108	0.233	158	47	370	4.0	144	0.87
116	0.234	161	46	350	4.0	144	0.83
112	0.234	160	40	330	4.1	144	0.79
125	0.183	165	40	270	1.3	105	0.88
121	0.185	164	42	310	1.3	106	0.97
117	0.183	165	44	350	1.3	106	1.08
122	0.185	164	42	310	2.1	121	0.96
126	0.183	165	40	270	2.1	122	0.87
118	0.183	165	44	350	2.2	123	1.07
123	0.185	164	42	310	3.0	134	0.95
119	0.183	165	44	350	3.0	133	1.06
127	0.183	165	40	270	3.1	135	0.86
124	0.185	164	42	310	4.0	144	0.94
120	0.183	165	44	350	4.0	143	1.06
128	0.183	165	40	270	4.0	145	0.85
134	0.133	164	31	220	1.2	102	1.01
130	0.133	162	32	250	1.2	103	1.11
135	0.133	164	31	220	2.1	121	1.00
131	0.133	162	32	250	2.3	124	1.09
132	0.133	162	32	250	3.0	133	1.09
136	0.133	164	31	220	3.0	135	0.99
137	0.133	164	31	220	4.0	145	0.99
133	0.133	162	32	250	4.1	144	1.08

Tabella 5: seconda campagna sperimentale di prove

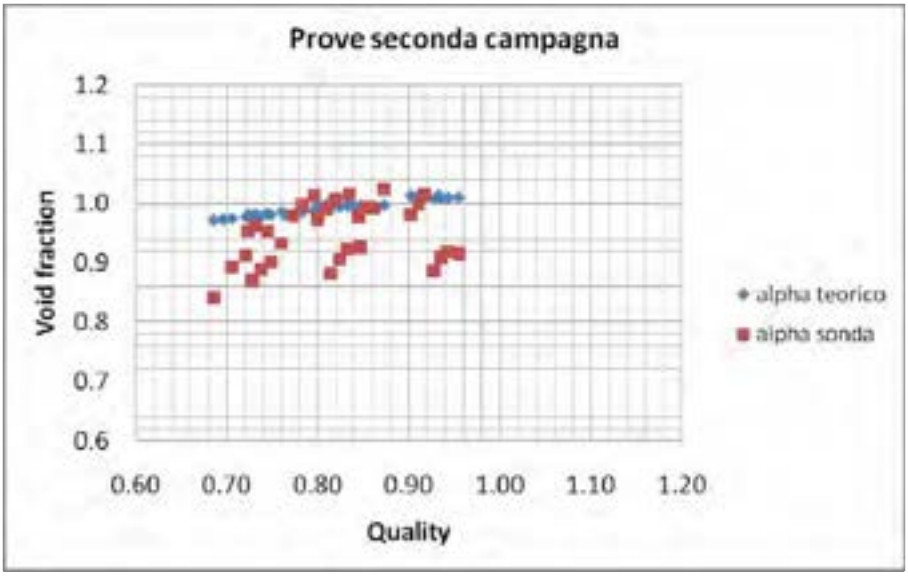


Figura 6: Confronto tra il grado di vuoto sperimentale e quello teorico vs titolo di vapore

Se confrontiamo i dati di grado di vuoto sperimentali tra le due campagne, quella con il drag disk (Figura 3) e quella con il Pitot (Figura 6) si nota che la deviazione standard dei dati sperimentali è molto maggiore nella seconda campagna.

Come è già stato spiegato nel documento [10] , la maggiore dispersione dei dati sperimentali dipende dalla presenza del tubo di Pitot a monte della sonda capacitiva. Il tubo di Pitot, pur avendo uno spessore di soli 8 mm rispetto al diametro di 80 mm della tubazione della sezione di prova, disturba notevolmente il flusso.

Il diverso regime di moto, con alte concentrazioni della fase liquida in zone ben precise all'interno della sonda capacitiva, non viene correttamente interpretato dal modello sperimentale alla base della misura del grado di vuoto, ricavato a partire dall'ipotesi di distribuzione uniforme.

Il calcolo della portata bifase è avvenuta sulla base dei valori misurati di grado di vuoto, velocità della fase vapore e di flusso di quantità di moto attraverso il modello matematico descritto nel capitolo 5.

Siccome il drag disk non ha dato risultati soddisfacenti, si sono considerati i punti sperimentali della seconda campagna sperimentale, ovvero quelli in cui è stato utilizzato il tubo di Pitot per la misura di flusso della quantità di moto. I valori di grado di vuoto associati a tali punti sperimentali però, sono affetti da un errore dovuto al disturbo causato dalla presenza del tubo di Pitot nel tratto a monte della sonda capacitiva.
Pertanto si è deciso di effettuare una estrapolazione dai dati di grado di vuoto della prima campagna sperimentale corrispondenti ai titoli dei punti sperimentali della seconda.

I valori della velocità della fase vapore sono quelli della seconda campagna sperimentale.

In Tabella 6 sono riportate le misure effettuate con gli strumenti facenti parte dello Spool Piece confrontati con i valori teorici delle grandezze stesse.
Il grado di vuoto teorico è calcolato, come descritto nel documento [10], attraverso la relazione di Zuber Findlay.
La velocità teorica della fase vapore è calcolata a partire dalla misura della portata con il Coriolis, dal calcolo del titolo di vapore e della densità della fase vapore.
Il flusso di quantità di moto teorico è calcolato utilizzando l'equazione (6) considerando i valori teorici di velocità della fase vapore, slip factor e grado di vuoto.

test numero	portata Coriolis [kg/s]	T in (°C)	p in (bar)	α teorico [%]	α misurato [%]	rhoV [kg/m^3]	rhoL [kg/m^3]	V vapore teorica [m/s]	V vapore misurata [m/s]	S teo	M teo [Pa]	M mis [Pa]	Portata Spool Piece [kg/s]
105	0.233	158	46	0.99	1.01	0.81	951.49	45.7	44.6	60.6	1671	1781	0.181
109	0.234	160	44	0.98	0.91	0.81	951.49	41.6	42.5	69.7	1374	5200	0.173
113	0.234	161	45	0.98		0.81	951.49	43.9	43.7	66.5	153	1781	0.178
101	0.233	158	50	1.00	1.02	0.83	950.85	48.7	46.9	27.0	1976	2025	0.196
115	0.234	161	45	0.98	0.89	1.65	931.81	20.8	20.7	34.2	708	723	0.352
107	0.233	158	46	0.98	0.98	1.70	930.84	21.0	20.9	31.1	745	723	0.242
116	0.234	161	45	0.98	0.87	2.16	922.88	15.7	13.5	26.8	527	527	0.502
112	0.234	160	44	0.97	0.84	2.21	922.07	14.4	12.9	27.0	454	519	0.538
125	0.183	165	40	0.99	0.93	0.73	953.82	37.8	38.1	59.8	1036	1089	0.140
121	0.185	164	42	1.00	0.92	0.75	953.14	41.3	40.7	24.6	1292	1252	0.154
117	0.183	165	44	1.01	0.91	0.75	953.14	46.1	43.7	0.00	1602	1537	0.166
128	0.183	165	40	0.98	0.95	2.16	922.88	12.2	12.4	23.2	320	356	0.287
134	0.133	164	31	1.00	1.01	0.68	955.41	32.3	32.7	0.00	714	747	0.112
130	0.133	162	32	1.01		0.69	955.23	35.8	34.5	0.00	884	885	0.120
135	0.133	164	31	1.00	1.00	1.18	941.68	18.3	19.7	1.28	466	438	0.117
131	0.133	162	32	1.01	1.01	1.29	939.28	18.9	20.1	0.00	457	478	0.130
136	0.133	164	31	1.00	0.99	1.65	931.81	13.0	14.4	3.49	296	356	0.189
137	0.133	164	31	1.00	0.97	2.16	922.88	9.8	12.2	4.23	219	316	0.144

Tabella 6: Misure Spool Piece

La Figura 7 riporta, per ogni test considerato, il confronto tra la misura di portata massica effettuata con lo spool piece e quella di riferimento effettuata con il Coriolis.
L'errore medio commesso sulla misura della portata massica bifase è dell'ordine del 35% rispetto al valore di riferimento.

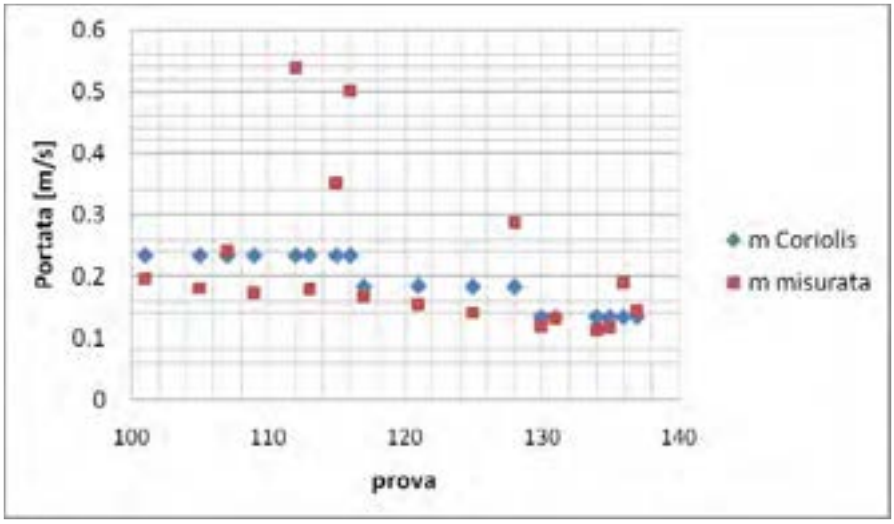


Figura 7: Portata massica bifase Coriolis vs Spool Piece

Nonostante gli strumenti facenti parte dello spool piece siano abbastanza accurati, con errori pari o inferiori al 5% del valore misurato, il modello matematico risulta estremamente sensibile alle variazioni di densità media della miscela.
Come mostra la Figura 8, un errore dell'ordine del 2% sulla misura del grado di vuoto, genera un errore dell'ordine del 100% sulla stima della densità media della miscela.

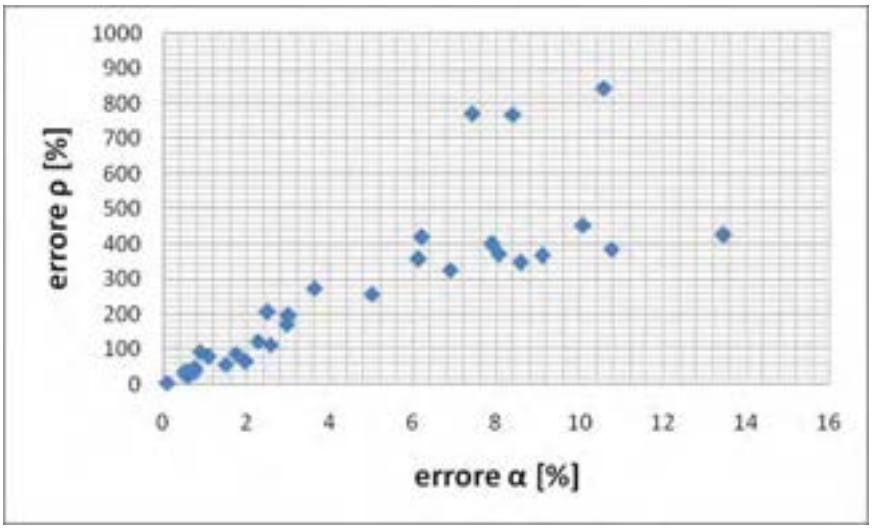


Figura 8: Errore percentuale sulla densità in funzione dell'errore sul grado di vuoto

7. Analisi della stabilità del segnale degli elettrodi della sonda

Il segnale RMS in output da ogni coppia di elettrodi della sonda capacitiva attivata $V = f(\alpha, d)$, funzione del grado di vuoto α, e della distanza tra gli elettrodi d, viene normalizzato nel modo seguente:

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

rapportando il segnale V, al range di variazione di ogni singola coppia di elettrodi, si rendono confrontabili i segnali ottenuti attivando coppie di elettrodi a distanze differenti.
In questo modo, il segnale normalizzato $V^*(\alpha, d)$ varia tra 0 (tutto vapore) e 1 (tutto liquido).

Nel corso della campagna sperimentale 2013 sono state effettuate diverse acquisizioni in solo acqua e solo vapore per poter normalizzare il segnale degli elettrodi.

7.1 Prove con solo vapore

In Tabella 7 sono mostrate le caratteristiche delle acquisizioni in solo vapore.

Data	test	serie	T fluido [°C]	T elettronica [°C]
1-lug	19	1	100	52
1-lug	11	2	100	52
2-lug	24	3	102	52
2-lug	27	4	100	52
2-lug	28	5	101	51
2-lug	32	6	100	53
2-lug	37	7	106	55
2-lug	40	8	100	53
3-lug	46	9	120	60
3-lug	67	10	120	60
5-lug	112344	11	104	56
5-lug	112458	12	104	56
5-lug	124913	13	106	57
5-lug	125029	14	106	57
5-lug	145841	15	100	70
5-lug	150010	16	100	70
5-lug	150133	17	100	70

Tabella 7: Test con solo vapore

Oltre al numero del test e alla data in cui è stato effettuato il test, la tabella mostra la temperatura del vapore misurata all'interno della sonda e la temperatura misurata nell'intercapedine tra la parte esterna della sonda capacitiva e il contenitore in acciaio in prossimità del circuito stampato a monte della sonda.
In Tabella 8 sono riportati i segnali misurati da ciascuna coppia di elettrodi espressi in Volt.

		data	01-lug	01-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	03-lug	03-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug
elettrodi attivati		test	19	11	24	27	28	32	37	40	46	67	112344	112458	124913	125029	145841	150010	150133
1	2	22.5	0.383	0.381	0.381	0.384	0.384	0.382	0.382	0.381	0.383	0.382	0.382	0.382	0.317	0.317	0.379	0.379	0.379
1	3	45	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.315	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
1	4	67.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.314	0.316	0.315	0.315	0.315	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
1	5	90	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.314	0.316	0.315	0.315	0.315	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
1	6	112.5	0.356	0.358	0.353	0.357	0.357	0.354	0.354	0.354	0.360	0.356	0.354	0.354	0.354	0.354	0.351	0.353	0.353
1	7	135	0.355	0.357	0.352	0.356	0.356	0.353	0.354	0.353	0.359	0.355	0.353	0.353	0.353	0.353	0.350	0.352	0.353
1	8	157.5	0.355	0.357	0.353	0.356	0.356	0.352	0.353	0.353	0.359	0.355	0.353	0.353	0.354	0.354	0.351	0.352	0.353
1	9	180	0.354	0.356	0.352	0.355	0.356	0.353	0.353	0.353	0.358	0.355	0.352	0.352	0.353	0.353	0.350	0.351	0.352
1	10	157.5	0.352	0.351	0.350	0.352	0.353	0.350	0.351	0.350	0.353	0.351	0.350	0.350	0.352	0.352	0.348	0.348	0.348
1	11	135	0.352	0.350	0.349	0.352	0.352	0.350	0.350	0.349	0.352	0.350	0.350	0.350	0.351	0.351	0.348	0.348	0.348
1	12	112.5	0.353	0.351	0.351	0.353	0.354	0.351	0.351	0.351	0.353	0.351	0.351	0.351	0.353	0.353	0.349	0.349	0.349
1	13	90	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.316	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
1	14	67.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.316	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
1	15	45	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.314	0.316	0.315	0.315	0.315	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
1	16	22.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.316	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
2	1	22.5	0.383	0.381	0.381	0.384	0.384	0.381	0.382	0.381	0.383	0.381	0.381	0.381	0.383	0.383	0.379	0.379	0.379
2	3	22.5	0.317	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.315	0.314	0.315	0.314	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
2	4	45	0.317	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.315	0.314	0.315	0.314	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.312
2	5	67.5	0.317	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.314	0.314	0.315	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
2	6	90	0.357	0.358	0.354	0.358	0.357	0.355	0.355	0.355	0.360	0.357	0.355	0.355	0.355	0.355	0.352	0.354	0.354
2	7	112.5	0.355	0.357	0.353	0.356	0.356	0.354	0.354	0.354	0.359	0.356	0.353	0.353	0.354	0.353	0.351	0.352	0.353
2	8	135	0.355	0.357	0.353	0.356	0.356	0.352	0.353	0.353	0.359	0.356	0.354	0.353	0.354	0.354	0.351	0.352	0.353
2	9	157.5	0.353	0.356	0.351	0.355	0.355	0.352	0.353	0.353	0.358	0.355	0.351	0.351	0.352	0.352	0.349	0.351	0.352
2	10	180	0.351	0.350	0.349	0.351	0.352	0.349	0.350	0.349	0.352	0.350	0.349	0.349	0.350	0.350	0.347	0.347	0.348
2	11	157.5	0.350	0.349	0.348	0.351	0.351	0.349	0.349	0.348	0.350	0.349	0.349	0.349	0.350	0.350	0.347	0.347	0.347
2	12	135	0.351	0.349	0.349	0.351	0.352	0.349	0.349	0.349	0.351	0.350	0.349	0.349	0.351	0.351	0.348	0.347	0.347
2	13	112.5	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.315	0.314	0.315	0.314	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
2	14	90	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.314	0.314	0.315	0.314	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
2	15	67.5	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.314	0.314	0.315	0.314	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
2	16	45	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.315	0.314	0.315	0.314	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
3	1	45	0.364	0.362	0.362	0.365	0.365	0.362	0.363	0.362	0.364	0.362	0.363	0.363	0.365	0.365	0.360	0.360	0.360
3	2	22.5	0.382	0.381	0.381	0.383	0.384	0.382	0.382	0.381	0.383	0.381	0.381	0.382	0.316	0.316	0.379	0.379	0.379
3	4	22.5	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.315	0.314	0.315	0.314	0.314	0.314	0.316	0.316	0.313	0.312	0.312
3	5	45	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.314	0.314	0.315	0.314	0.314	0.315	0.316	0.316	0.313	0.312	0.312
3	6	67.5	0.359	0.361	0.357	0.360	0.361	0.358	0.359	0.358	0.363	0.360	0.357	0.357	0.358	0.358	0.355	0.356	0.357
3	7	90	0.356	0.359	0.354	0.358	0.358	0.355	0.356	0.355	0.361	0.358	0.355	0.354	0.355	0.355	0.352	0.354	0.355
3	8	112.5	0.356	0.359	0.354	0.358	0.358	0.353	0.354	0.354	0.360	0.358	0.355	0.354	0.355	0.355	0.352	0.354	0.355
3	9	135	0.354	0.358	0.352	0.355	0.356	0.353	0.353	0.354	0.359	0.358	0.352	0.352	0.353	0.353	0.350	0.351	0.354
3	10	157.5	0.351	0.350	0.349	0.351	0.352	0.350	0.350	0.349	0.352	0.351	0.349	0.349	0.350	0.350	0.347	0.348	0.348
3	11	180	0.350	0.349	0.348	0.350	0.351	0.348	0.349	0.348	0.350	0.349	0.348	0.348	0.350	0.350	0.346	0.347	0.347
3	12	157.5	0.350	0.349	0.348	0.351	0.351	0.349	0.349	0.348	0.350	0.350	0.349	0.349	0.350	0.350	0.347	0.347	0.347

		data	01-lug	01-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	03-lug	03-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug
elettrodi attivati		test	19	11	24	27	28	32	37	40	46	67	112344	112458	124913	125029	145841	150010	150133
3	13	135	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.314	0.314	0.315	0.314	0.314	0.315	0.316	0.316	0.313	0.312	0.312
3	14	112.5	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.314	0.314	0.315	0.314	0.314	0.314	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
3	15	90	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.315	0.314	0.315	0.314	0.314	0.315	0.316	0.316	0.313	0.312	0.312
3	16	67.5	0.316	0.314	0.314	0.316	0.317	0.314	0.314	0.314	0.315	0.314	0.314	0.314	0.316	0.316	0.313	0.312	0.312
4	1	67.5	0.358	0.356	0.356	0.359	0.359	0.357	0.357	0.356	0.358	0.357	0.356	0.356	0.358	0.358	0.354	0.354	0.354
4	2	45	0.364	0.363	0.362	0.365	0.366	0.364	0.364	0.363	0.365	0.363	0.363	0.363	0.316	0.316	0.361	0.361	0.361
4	3	22.5	0.317	0.315	0.314	0.317	0.317	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
4	5	22.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.317	0.315	0.316	0.315	0.316	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
4	6	45	0.366	0.368	0.364	0.367	0.368	0.369	0.369	0.366	0.370	0.367	0.364	0.364	0.365	0.365	0.362	0.363	0.364
4	7	67.5	0.361	0.365	0.358	0.363	0.363	0.362	0.362	0.361	0.366	0.364	0.359	0.359	0.359	0.359	0.357	0.359	0.361
4	8	90	0.361	0.364	0.358	0.362	0.361	0.358	0.359	0.359	0.365	0.364	0.358	0.358	0.358	0.358	0.356	0.358	0.360
4	9	112.5	0.356	0.362	0.354	0.358	0.359	0.357	0.356	0.356	0.362	0.362	0.354	0.354	0.354	0.354	0.352	0.354	0.357
4	10	135	0.352	0.353	0.350	0.353	0.354	0.351	0.353	0.351	0.354	0.353	0.350	0.350	0.351	0.351	0.348	0.349	0.350
4	11	157.5	0.351	0.350	0.349	0.351	0.352	0.350	0.350	0.349	0.352	0.351	0.349	0.349	0.350	0.350	0.347	0.348	0.348
4	12	180	0.351	0.350	0.349	0.351	0.352	0.350	0.350	0.349	0.352	0.351	0.349	0.349	0.351	0.351	0.347	0.348	0.348
4	13	157.5	0.317	0.315	0.314	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
4	14	135	0.317	0.315	0.314	0.317	0.317	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
4	15	112.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.317	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
4	16	90	0.317	0.315	0.315	0.317	0.317	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.313	0.313
5	1	90	0.355	0.356	0.353	0.356	0.357	0.354	0.354	0.354	0.358	0.356	0.353	0.353	0.354	0.354	0.351	0.352	0.353
5	2	67.5	0.358	0.359	0.355	0.358	0.360	0.357	0.358	0.356	0.360	0.359	0.356	0.356	0.316	0.316	0.354	0.354	0.355
5	3	45	0.317	0.318	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.314	0.315
5	4	22.5	0.317	0.318	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.314	0.315
5	6	22.5	0.383	0.386	0.382	0.384	0.388	0.390	0.389	0.387	0.387	0.386	0.381	0.381	0.382	0.382	0.379	0.380	0.382
5	7	45	0.370	0.378	0.367	0.373	0.374	0.374	0.375	0.372	0.378	0.378	0.367	0.366	0.366	0.366	0.365	0.369	0.373
5	8	67.5	0.368	0.376	0.364	0.371	0.370	0.365	0.368	0.367	0.376	0.376	0.364	0.364	0.363	0.363	0.362	0.367	0.371
5	9	90	0.360	0.371	0.357	0.363	0.365	0.361	0.362	0.362	0.371	0.371	0.357	0.357	0.357	0.357	0.355	0.359	0.365
5	10	112.5	0.354	0.359	0.352	0.356	0.357	0.355	0.356	0.355	0.359	0.359	0.352	0.352	0.353	0.353	0.350	0.352	0.354
5	11	135	0.352	0.355	0.350	0.353	0.354	0.352	0.352	0.352	0.356	0.355	0.350	0.350	0.351	0.351	0.348	0.350	0.351
5	12	157.5	0.352	0.354	0.349	0.353	0.354	0.351	0.352	0.351	0.355	0.354	0.350	0.350	0.351	0.351	0.348	0.349	0.350
5	13	180	0.317	0.318	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.315	0.318	0.317	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.314	0.315
5	14	157.5	0.317	0.318	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.314	0.315
5	15	135	0.317	0.318	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.314	0.315
5	16	112.5	0.317	0.318	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.315	0.315	0.316	0.316	0.313	0.314	0.315
6	1	112.5	0.357	0.359	0.354	0.358	0.357	0.354	0.354	0.354	0.361	0.358	0.354	0.354	0.355	0.355	0.352	0.353	0.354
6	2	90	0.358	0.360	0.355	0.359	0.358	0.355	0.356	0.355	0.361	0.358	0.355	0.355	0.318	0.318	0.353	0.355	0.355
6	3	67.5	0.320	0.322	0.317	0.321	0.320	0.317	0.317	0.317	0.323	0.320	0.318	0.317	0.318	0.318	0.315	0.317	0.318
6	4	45	0.320	0.322	0.317	0.321	0.320	0.317	0.317	0.317	0.323	0.320	0.318	0.318	0.318	0.318	0.315	0.317	0.318
6	5	22.5	0.320	0.322	0.317	0.321	0.320	0.317	0.317	0.317	0.322	0.320	0.318	0.318	0.318	0.318	0.315	0.317	0.318
6	7	22.5	0.399	0.403	0.393	0.402	0.399	0.395	0.394	0.396	0.404	0.403	0.394	0.393	0.391	0.390	0.391	0.398	0.399
6	8	45	0.390	0.397	0.383	0.394	0.387	0.375	0.376	0.384	0.397	0.396	0.385	0.383	0.380	0.379	0.380	0.390	0.392

		data	01-lug	01-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	03-lug	03-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug
elettrodi attivati		test	19	11	24	27	28	32	37	40	46	67	112344	112458	124913	125029	145841	150010	150133
6	9	67.5	0.372	0.386	0.366	0.377	0.374	0.367	0.368	0.371	0.385	0.384	0.367	0.366	0.365	0.365	0.364	0.372	0.378
6	10	90	0.362	0.367	0.358	0.364	0.362	0.359	0.358	0.359	0.368	0.366	0.358	0.358	0.358	0.357	0.356	0.360	0.362
6	11	112.5	0.357	0.362	0.354	0.359	0.358	0.355	0.354	0.355	0.363	0.360	0.355	0.355	0.355	0.354	0.352	0.355	0.357
6	12	135	0.356	0.360	0.353	0.358	0.357	0.353	0.354	0.354	0.361	0.358	0.354	0.353	0.353	0.354	0.351	0.354	0.355
6	13	157.5	0.320	0.322	0.317	0.321	0.320	0.317	0.317	0.317	0.322	0.320	0.318	0.318	0.318	0.318	0.315	0.317	0.318
6	14	180	0.320	0.322	0.317	0.321	0.320	0.317	0.318	0.317	0.323	0.320	0.318	0.318	0.318	0.318	0.315	0.317	0.318
6	15	157.5	0.320	0.322	0.317	0.321	0.320	0.317	0.318	0.317	0.323	0.320	0.318	0.317	0.318	0.318	0.315	0.317	0.318
6	16	135	0.320	0.322	0.317	0.321	0.320	0.317	0.317	0.317	0.322	0.320	0.318	0.317	0.318	0.318	0.315	0.317	0.318
7	1	135	0.356	0.358	0.353	0.357	0.356	0.354	0.354	0.354	0.360	0.357	0.353	0.353	0.354	0.354	0.351	0.352	0.354
7	2	112.5	0.356	0.359	0.353	0.357	0.357	0.354	0.355	0.354	0.360	0.357	0.354	0.353	0.318	0.318	0.351	0.353	0.354
7	3	90	0.319	0.322	0.317	0.320	0.320	0.317	0.318	0.318	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
7	4	67.5	0.320	0.321	0.317	0.320	0.320	0.318	0.317	0.317	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
7	5	45	0.320	0.322	0.317	0.320	0.320	0.318	0.317	0.317	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.317	0.317
7	6	22.5	0.399	0.403	0.393	0.402	0.397	0.395	0.395	0.396	0.404	0.403	0.394	0.393	0.391	0.390	0.391	0.398	0.399
7	8	22.5	0.401	0.403	0.398	0.402	0.398	0.394	0.392	0.396	0.403	0.402	0.398	0.397	0.395	0.395	0.395	0.398	0.399
7	9	45	0.375	0.387	0.372	0.379	0.379	0.377	0.374	0.377	0.387	0.386	0.371	0.371	0.370	0.370	0.369	0.375	0.380
7	10	67.5	0.362	0.368	0.360	0.364	0.364	0.363	0.363	0.362	0.369	0.366	0.360	0.360	0.360	0.360	0.358	0.361	0.362
7	11	90	0.358	0.362	0.356	0.359	0.359	0.356	0.357	0.357	0.363	0.360	0.355	0.355	0.356	0.356	0.353	0.355	0.357
7	12	112.5	0.356	0.360	0.354	0.357	0.357	0.354	0.355	0.355	0.361	0.358	0.354	0.354	0.354	0.354	0.351	0.353	0.355
7	13	135	0.320	0.322	0.317	0.320	0.320	0.317	0.317	0.317	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.317	0.317
7	14	157.5	0.320	0.321	0.317	0.320	0.320	0.318	0.317	0.317	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
7	15	180	0.320	0.322	0.317	0.320	0.320	0.317	0.318	0.317	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
7	16	157.5	0.320	0.322	0.317	0.320	0.320	0.317	0.317	0.317	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.317	0.317
8	1	157.5	0.357	0.359	0.354	0.358	0.357	0.353	0.353	0.354	0.360	0.357	0.354	0.354	0.355	0.354	0.352	0.353	0.354
8	2	135	0.357	0.359	0.354	0.358	0.357	0.354	0.354	0.354	0.360	0.358	0.355	0.354	0.319	0.319	0.352	0.354	0.355
8	3	112.5	0.321	0.322	0.318	0.321	0.321	0.317	0.317	0.318	0.323	0.320	0.318	0.318	0.319	0.319	0.316	0.317	0.318
8	4	90	0.320	0.322	0.318	0.321	0.321	0.317	0.317	0.318	0.323	0.320	0.318	0.318	0.319	0.319	0.316	0.317	0.318
8	5	67.5	0.321	0.322	0.318	0.321	0.321	0.317	0.317	0.318	0.323	0.320	0.318	0.318	0.319	0.319	0.316	0.317	0.318
8	6	45	0.391	0.397	0.383	0.395	0.387	0.378	0.377	0.384	0.398	0.396	0.385	0.384	0.380	0.379	0.380	0.390	0.392
8	7	22.5	0.401	0.403	0.398	0.402	0.400	0.394	0.392	0.397	0.404	0.403	0.399	0.398	0.396	0.396	0.395	0.399	0.399
8	9	22.5	0.386	0.394	0.385	0.388	0.392	0.394	0.391	0.392	0.394	0.393	0.384	0.384	0.385	0.384	0.382	0.384	0.388
8	10	45	0.367	0.371	0.366	0.368	0.369	0.369	0.369	0.368	0.371	0.369	0.365	0.365	0.366	0.366	0.363	0.365	0.366
8	11	67.5	0.360	0.363	0.359	0.361	0.361	0.360	0.359	0.359	0.364	0.362	0.359	0.358	0.359	0.359	0.357	0.358	0.359
8	12	90	0.358	0.361	0.356	0.359	0.359	0.356	0.357	0.356	0.362	0.359	0.356	0.356	0.357	0.356	0.354	0.355	0.356
8	13	112.5	0.321	0.322	0.318	0.321	0.321	0.318	0.318	0.318	0.323	0.320	0.318	0.318	0.319	0.319	0.316	0.317	0.318
8	14	135	0.320	0.322	0.318	0.321	0.320	0.318	0.317	0.318	0.323	0.320	0.318	0.318	0.319	0.319	0.316	0.317	0.318
8	15	157.5	0.321	0.322	0.318	0.321	0.320	0.318	0.318	0.318	0.323	0.320	0.318	0.318	0.319	0.319	0.316	0.317	0.318
8	16	180	0.321	0.322	0.318	0.321	0.321	0.318	0.318	0.318	0.323	0.320	0.318	0.318	0.319	0.319	0.316	0.317	0.318
9	1	180	0.355	0.358	0.352	0.356	0.356	0.354	0.354	0.353	0.358	0.357	0.352	0.352	0.353	0.353	0.350	0.352	0.353
9	2	157.5	0.354	0.358	0.351	0.355	0.356	0.353	0.353	0.353	0.358	0.357	0.352	0.352	0.318	0.318	0.349	0.351	0.353
9	3	135	0.319	0.321	0.317	0.320	0.320	0.317	0.318	0.318	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317

		data	01-lug	01-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	03-lug	03-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug
elettrodi attivati		test	19	11	24	27	28	32	37	40	46	67	112344	112458	124913	125029	145841	150010	150133
9	4	112.5	0.319	0.321	0.317	0.320	0.320	0.318	0.318	0.318	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.318
9	5	90	0.319	0.321	0.317	0.319	0.320	0.318	0.318	0.318	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.318
9	6	67.5	0.372	0.385	0.366	0.376	0.375	0.367	0.367	0.370	0.385	0.383	0.367	0.366	0.365	0.364	0.364	0.372	0.378
9	7	45	0.375	0.387	0.371	0.378	0.380	0.376	0.375	0.379	0.386	0.385	0.371	0.370	0.370	0.370	0.368	0.375	0.380
9	8	22.5	0.385	0.393	0.384	0.387	0.392	0.392	0.392	0.391	0.393	0.392	0.383	0.382	0.384	0.383	0.381	0.384	0.388
9	10	22.5	0.385	0.388	0.385	0.386	0.387	0.388	0.389	0.386	0.390	0.387	0.384	0.383	0.385	0.384	0.382	0.383	0.383
9	11	45	0.366	0.369	0.365	0.367	0.368	0.367	0.367	0.366	0.370	0.368	0.364	0.364	0.365	0.365	0.362	0.364	0.365
9	12	67.5	0.360	0.363	0.358	0.361	0.362	0.360	0.360	0.360	0.364	0.362	0.358	0.358	0.359	0.359	0.356	0.357	0.359
9	13	90	0.319	0.321	0.317	0.320	0.320	0.318	0.318	0.318	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
9	14	112.5	0.319	0.321	0.317	0.320	0.320	0.318	0.318	0.318	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
9	15	135	0.319	0.321	0.317	0.320	0.320	0.318	0.318	0.318	0.321	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
9	16	157.5	0.319	0.321	0.317	0.320	0.320	0.317	0.318	0.318	0.322	0.320	0.317	0.317	0.318	0.318	0.315	0.316	0.317
10	1	157.5	0.353	0.352	0.350	0.353	0.353	0.351	0.351	0.351	0.353	0.352	0.351	0.351	0.352	0.352	0.349	0.349	0.349
10	2	180	0.352	0.351	0.350	0.352	0.353	0.350	0.351	0.350	0.353	0.351	0.350	0.350	0.317	0.317	0.348	0.349	0.349
10	3	157.5	0.317	0.316	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
10	4	135	0.318	0.316	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
10	5	112.5	0.317	0.316	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
10	6	90	0.362	0.367	0.358	0.364	0.362	0.359	0.359	0.360	0.368	0.366	0.359	0.358	0.358	0.358	0.356	0.360	0.362
10	7	67.5	0.363	0.367	0.360	0.364	0.365	0.363	0.363	0.362	0.368	0.366	0.360	0.360	0.360	0.360	0.358	0.361	0.363
10	8	45	0.367	0.370	0.366	0.367	0.370	0.370	0.369	0.368	0.371	0.369	0.365	0.365	0.366	0.366	0.363	0.364	0.365
10	9	22.5	0.386	0.389	0.386	0.386	0.388	0.388	0.390	0.387	0.390	0.388	0.385	0.384	0.385	0.385	0.383	0.383	0.384
10	11	22.5	0.383	0.383	0.383	0.383	0.384	0.384	0.384	0.383	0.385	0.383	0.382	0.382	0.383	0.383	0.380	0.380	0.380
10	12	45	0.365	0.365	0.364	0.365	0.367	0.365	0.366	0.365	0.367	0.365	0.364	0.364	0.365	0.365	0.362	0.362	0.362
10	13	67.5	0.318	0.316	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
10	14	90	0.318	0.316	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
10	15	112.5	0.317	0.316	0.316	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.315	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
10	16	135	0.318	0.317	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
11	1	135	0.353	0.351	0.351	0.353	0.354	0.351	0.352	0.351	0.353	0.352	0.352	0.352	0.353	0.353	0.349	0.349	0.349
11	2	157.5	0.352	0.350	0.350	0.352	0.353	0.350	0.351	0.350	0.352	0.351	0.350	0.350	0.317	0.317	0.348	0.348	0.348
11	3	180	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.314	0.314	0.314
11	4	157.5	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
11	5	135	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
11	6	112.5	0.359	0.362	0.355	0.360	0.359	0.355	0.356	0.356	0.363	0.361	0.356	0.356	0.356	0.356	0.354	0.356	0.358
11	7	90	0.359	0.362	0.357	0.360	0.360	0.357	0.358	0.358	0.363	0.361	0.356	0.356	0.357	0.357	0.355	0.357	0.358
11	8	67.5	0.361	0.363	0.359	0.362	0.362	0.360	0.361	0.360	0.364	0.362	0.359	0.359	0.360	0.360	0.357	0.358	0.359
11	9	45	0.368	0.370	0.367	0.368	0.369	0.369	0.369	0.368	0.372	0.370	0.366	0.366	0.367	0.367	0.364	0.365	0.366
11	10	22.5	0.384	0.384	0.384	0.384	0.385	0.385	0.385	0.384	0.386	0.384	0.383	0.383	0.384	0.384	0.381	0.381	0.381
11	12	22.5	0.384	0.384	0.384	0.384	0.386	0.385	0.385	0.384	0.386	0.384	0.383	0.383	0.385	0.385	0.381	0.381	0.381
11	13	45	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.314	0.314	0.314
11	14	67.5	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
11	15	90	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.317	0.314	0.314	0.314

		data	01-lug	01-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	03-lug	03-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug
elettrodi attivati		test	19	11	24	27	28	32	37	40	46	67	112344	112458	124913	125029	145841	150010	150133
11	16	112.5	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.314
12	1	112.5	0.354	0.352	0.352	0.354	0.355	0.352	0.353	0.352	0.354	0.353	0.353	0.353	0.354	0.354	0.350	0.350	0.350
12	2	135	0.352	0.351	0.350	0.353	0.353	0.351	0.351	0.351	0.352	0.351	0.351	0.351	0.318	0.318	0.349	0.349	0.349
12	3	157.5	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
12	4	180	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
12	5	157.5	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
12	6	135	0.357	0.360	0.354	0.358	0.357	0.354	0.354	0.355	0.361	0.358	0.355	0.354	0.355	0.354	0.352	0.354	0.355
12	7	112.5	0.357	0.360	0.355	0.358	0.358	0.355	0.356	0.356	0.361	0.358	0.355	0.354	0.355	0.355	0.352	0.354	0.355
12	8	90	0.358	0.360	0.357	0.359	0.359	0.356	0.357	0.357	0.362	0.359	0.357	0.356	0.357	0.357	0.354	0.356	0.356
12	9	67.5	0.361	0.364	0.359	0.362	0.363	0.361	0.361	0.361	0.365	0.363	0.359	0.359	0.360	0.360	0.357	0.358	0.360
12	10	45	0.366	0.365	0.365	0.366	0.367	0.366	0.366	0.365	0.367	0.366	0.364	0.364	0.366	0.366	0.363	0.363	0.363
12	11	22.5	0.384	0.384	0.383	0.384	0.385	0.384	0.384	0.384	0.385	0.384	0.383	0.383	0.384	0.384	0.381	0.381	0.381
12	13	22.5	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
12	14	45	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.317	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
12	15	67.5	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
12	16	90	0.318	0.316	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
13	1	90	0.355	0.353	0.352	0.355	0.356	0.353	0.353	0.352	0.355	0.353	0.353	0.353	0.355	0.355	0.351	0.351	0.351
13	2	112.5	0.353	0.350	0.350	0.353	0.353	0.351	0.351	0.350	0.352	0.351	0.351	0.351	0.317	0.317	0.349	0.349	0.349
13	3	135	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
13	4	157.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.313	0.313
13	5	180	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.315	0.316	0.317	0.317	0.314	0.313	0.313
13	6	157.5	0.355	0.358	0.352	0.356	0.356	0.353	0.353	0.353	0.359	0.356	0.353	0.353	0.353	0.353	0.350	0.353	0.353
13	7	135	0.355	0.357	0.352	0.356	0.356	0.353	0.353	0.353	0.358	0.356	0.353	0.353	0.353	0.353	0.351	0.352	0.353
13	8	112.5	0.356	0.358	0.354	0.357	0.357	0.354	0.354	0.354	0.359	0.357	0.354	0.354	0.355	0.355	0.352	0.353	0.354
13	9	90	0.357	0.360	0.355	0.358	0.359	0.356	0.357	0.356	0.361	0.359	0.355	0.355	0.356	0.356	0.353	0.354	0.356
13	10	67.5	0.358	0.357	0.356	0.358	0.359	0.357	0.358	0.357	0.359	0.358	0.357	0.357	0.358	0.358	0.355	0.355	0.355
13	11	45	0.365	0.363	0.363	0.365	0.366	0.364	0.364	0.364	0.366	0.364	0.363	0.364	0.365	0.365	0.361	0.361	0.361
13	12	22.5	0.386	0.385	0.385	0.386	0.387	0.386	0.386	0.385	0.387	0.386	0.385	0.385	0.386	0.386	0.382	0.382	0.382
13	14	22.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.315	0.317	0.317	0.314	0.313	0.313
13	15	45	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.313	0.313	0.313
13	16	67.5	0.317	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.313	0.313
14	1	67.5	0.359	0.356	0.356	0.359	0.360	0.357	0.357	0.356	0.359	0.357	0.357	0.357	0.359	0.359	0.355	0.355	0.355
14	2	90	0.355	0.352	0.352	0.355	0.356	0.352	0.353	0.352	0.354	0.353	0.353	0.353	0.318	0.318	0.351	0.351	0.351
14	3	112.5	0.318	0.315	0.316	0.318	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
14	4	135	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
14	5	157.5	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
14	6	180	0.355	0.357	0.352	0.357	0.356	0.352	0.353	0.353	0.359	0.356	0.353	0.353	0.353	0.353	0.351	0.353	0.353
14	7	157.5	0.355	0.357	0.352	0.356	0.356	0.353	0.354	0.353	0.358	0.356	0.353	0.353	0.353	0.353	0.351	0.352	0.353
14	8	135	0.356	0.357	0.354	0.357	0.356	0.353	0.353	0.354	0.359	0.356	0.354	0.354	0.354	0.354	0.352	0.353	0.353
14	9	112.5	0.356	0.358	0.354	0.357	0.358	0.355	0.355	0.355	0.359	0.358	0.354	0.354	0.355	0.355	0.352	0.353	0.355
14	10	90	0.355	0.354	0.353	0.355	0.356	0.354	0.354	0.354	0.356	0.355	0.354	0.354	0.355	0.355	0.352	0.352	0.352

		data	01-lug	01-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	02-lug	03-lug	03-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug	05-lug
elettrodi attivati		test	19	11	24	27	28	32	37	40	46	67	112344	112458	124913	125029	145841	150010	150133
14	11	67.5	0.358	0.356	0.356	0.358	0.359	0.357	0.357	0.356	0.358	0.357	0.357	0.357	0.358	0.358	0.355	0.355	0.354
14	12	45	0.366	0.364	0.364	0.366	0.367	0.364	0.365	0.364	0.366	0.365	0.364	0.364	0.366	0.366	0.362	0.362	0.362
14	13	22.5	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
14	15	22.5	0.318	0.316	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
14	16	45	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.315	0.316	0.316	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
15	1	45	0.367	0.363	0.363	0.366	0.367	0.364	0.365	0.364	0.366	0.364	0.365	0.365	0.367	0.367	0.362	0.362	0.361
15	2	67.5	0.358	0.355	0.355	0.358	0.359	0.356	0.357	0.356	0.358	0.356	0.357	0.357	0.317	0.318	0.354	0.354	0.354
15	3	90	0.318	0.315	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
15	4	112.5	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.315	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
15	5	135	0.318	0.315	0.315	0.317	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.317	0.318	0.314	0.314	0.314
15	6	157.5	0.355	0.357	0.352	0.356	0.356	0.353	0.353	0.353	0.359	0.356	0.353	0.353	0.354	0.353	0.351	0.352	0.353
15	7	180	0.355	0.357	0.352	0.356	0.356	0.353	0.354	0.353	0.358	0.356	0.353	0.353	0.353	0.353	0.350	0.352	0.353
15	8	157.5	0.356	0.357	0.353	0.356	0.356	0.353	0.353	0.353	0.358	0.356	0.354	0.354	0.354	0.354	0.351	0.352	0.353
15	9	135	0.355	0.357	0.352	0.356	0.357	0.354	0.354	0.354	0.358	0.357	0.353	0.353	0.354	0.354	0.351	0.352	0.353
15	10	112.5	0.354	0.352	0.351	0.354	0.354	0.352	0.352	0.352	0.354	0.353	0.352	0.352	0.353	0.353	0.350	0.350	0.350
15	11	90	0.355	0.353	0.352	0.355	0.355	0.353	0.353	0.353	0.355	0.354	0.353	0.353	0.355	0.355	0.351	0.351	0.351
15	12	67.5	0.359	0.356	0.356	0.359	0.359	0.357	0.357	0.356	0.358	0.357	0.357	0.357	0.359	0.358	0.355	0.354	0.354
15	13	45	0.318	0.316	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
15	14	22.5	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.316	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
15	16	22.5	0.318	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.316	0.315	0.317	0.316	0.316	0.316	0.318	0.318	0.314	0.314	0.314
16	1	22.5	0.387	0.383	0.383	0.387	0.387	0.384	0.385	0.384	0.386	0.384	0.384	0.385	0.386	0.386	0.382	0.381	0.381
16	2	45	0.365	0.362	0.362	0.365	0.366	0.363	0.363	0.363	0.364	0.363	0.364	0.364	0.318	0.318	0.361	0.361	0.361
16	3	67.5	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.318	0.314	0.313	0.313
16	4	90	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.315	0.316	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.318	0.314	0.313	0.313
16	5	112.5	0.318	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.316	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.313
16	6	135	0.356	0.357	0.353	0.357	0.356	0.353	0.353	0.353	0.359	0.356	0.353	0.353	0.354	0.354	0.351	0.353	0.353
16	7	157.5	0.355	0.357	0.352	0.356	0.356	0.353	0.353	0.353	0.358	0.355	0.353	0.353	0.353	0.353	0.351	0.352	0.353
16	8	180	0.355	0.357	0.353	0.356	0.356	0.353	0.353	0.353	0.358	0.356	0.354	0.353	0.354	0.354	0.351	0.352	0.353
16	9	157.5	0.354	0.357	0.352	0.356	0.356	0.353	0.353	0.354	0.358	0.356	0.352	0.352	0.353	0.353	0.350	0.352	0.353
16	10	135	0.353	0.351	0.350	0.353	0.354	0.351	0.352	0.351	0.353	0.352	0.351	0.351	0.352	0.352	0.349	0.349	0.349
16	11	112.5	0.353	0.351	0.351	0.353	0.354	0.351	0.351	0.351	0.353	0.351	0.351	0.351	0.353	0.353	0.349	0.349	0.349
16	12	90	0.355	0.353	0.352	0.355	0.356	0.353	0.353	0.353	0.355	0.353	0.353	0.354	0.355	0.355	0.351	0.351	0.351
16	13	67.5	0.318	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.313	0.313
16	14	45	0.318	0.315	0.315	0.317	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.313	0.313
16	15	22.5	0.318	0.315	0.315	0.318	0.318	0.315	0.315	0.315	0.316	0.315	0.316	0.316	0.317	0.317	0.314	0.314	0.313

Tabella 8: Test in solo vapore: segnali sonda capacitiva per ciascuna coppia di elettrodi

Alcuni dei risultati sono mostrati nelle figure seguenti.
La Figura 9 e la Figura 10 mostrano l'andamento del segnale misurato tra elettrodi posti a 180° l'uno rispetto all'altro mentre la Figura 11 e la Figura 12 riportano l'andamento del segnale misurato da elettrodi vicini (angolati di 45°) nei test condotti in presenza di solo vapore.

La variazione media di segnale rilevato da coppie di elettrodi omologhi è di circa 1 – 5 mV per le prove svolte nei giorni 1, 2, 3 luglio e sale di un ordine di grandezze per le prove svolte nel giorno 5 luglio per effetto dei valori anomali di segnale registrati nei test 125029 e 145841.

La Tabella 9 riassume la variazione media di segnale registrato da elettrodi omologhi nei diversi giorni di prova.

I numeri in ascissa fanno riferimento alla serie del test mostrato in Tabella 7

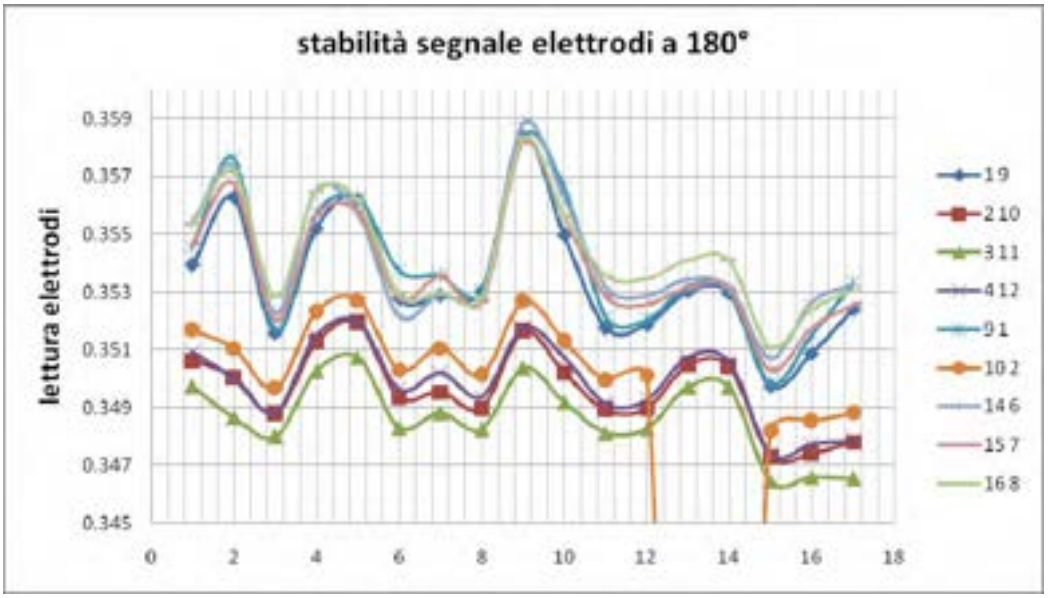


Figura 9: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 180°

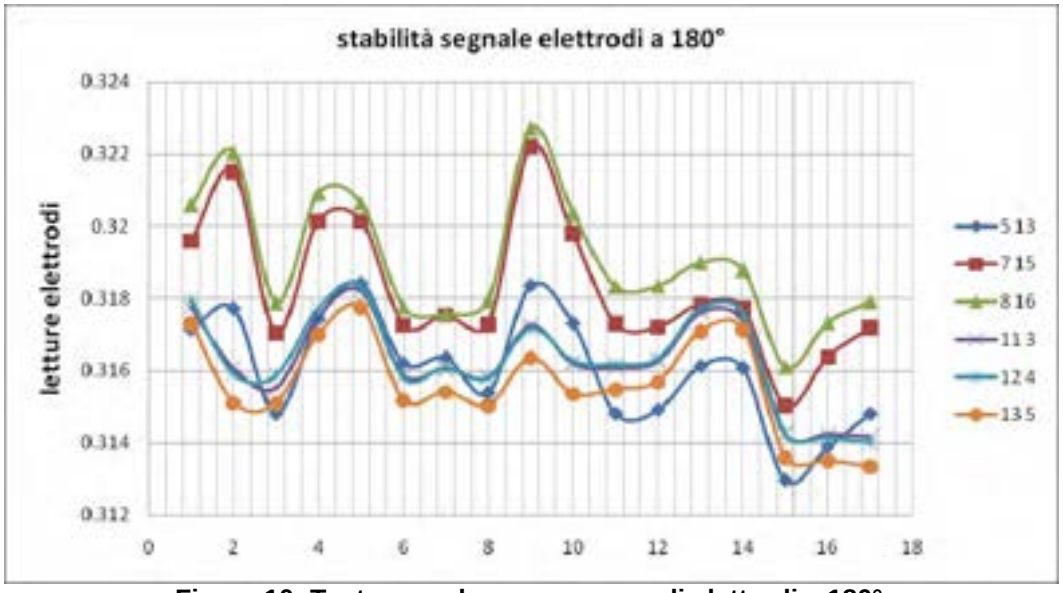


Figura 10: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 180°

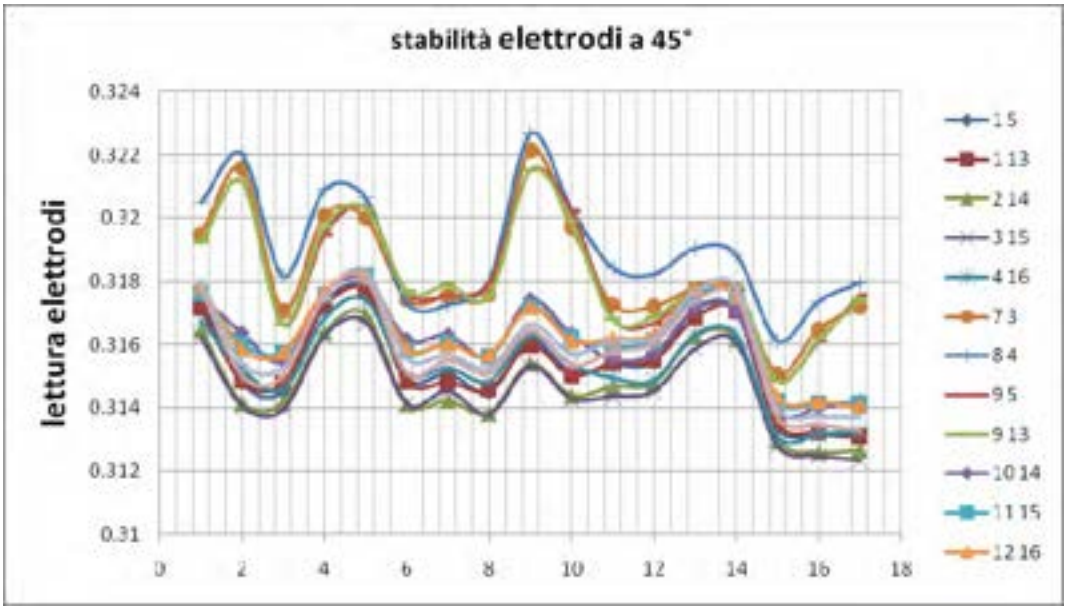


Figura 11: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 45°

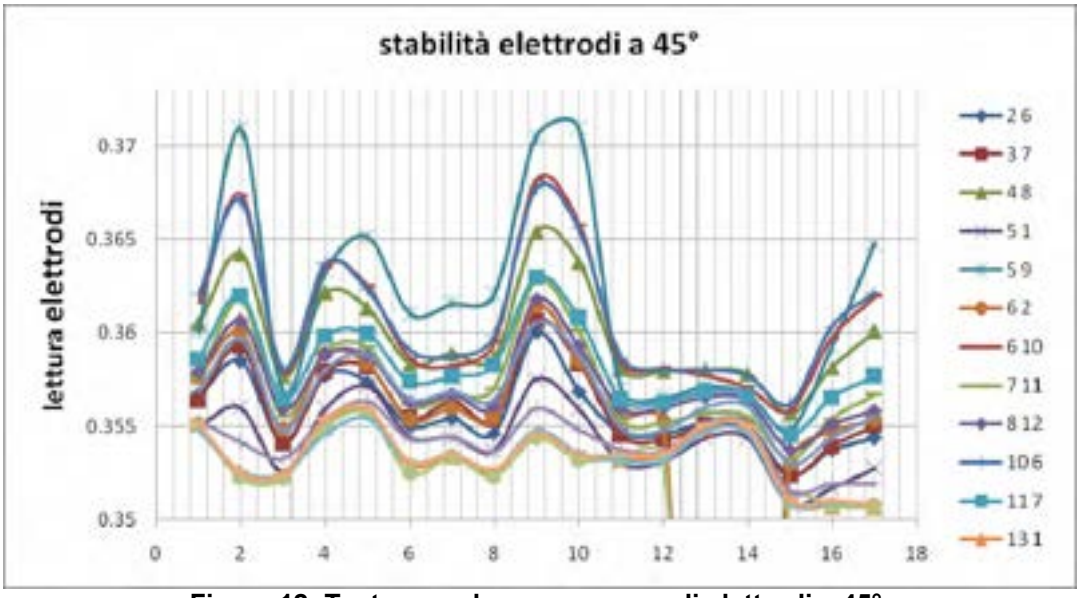


Figura 12: Test con solo vapore: segnali elettrodi a 45°

	01-lug	02-lug	03-lug	05-lug
22.5	0.002	0.003	0.002	0.037
45	0.002	0.004	0.001	0.039
67.5	0.004	0.005	0.002	0.029
90	0.004	0.005	0.002	0.026
112.5	0.002	0.003	0.002	0.028
135	0.002	0.003	0.001	0.033
157.5	0.002	0.003	0.001	0.024
180	0.003	0.004	0.001	0.016

Tabella 9: Variazione media di segnale di elettrodi omologhi durante i test in solo vapore

7.2 Prove con sola acqua

Le figure seguenti mostrano l'andamento del segnale misurato da alcune coppie di elettrodi nei test in presenza di sola acqua.

La Figura 13 e la Figura 14 mostrano l'andamento del segnale misurato tra elettrodi posti a 45° l'uno rispetto all'altro mentre la Figura 11, la Figura 15 e la Figura 16 riportano l'andamento del segnale misurato da elettrodi angolati di 180° nei test condotti in presenza di solo vapore.

La variazione media di segnale rilevato da coppie di elettrodi omologhi è di circa 0.3 mV per le prove svolte nel giorno 3 luglio. Mentre la variazione media di segnale in presenza di solo liquido durante i test è di circa 0.7 mV

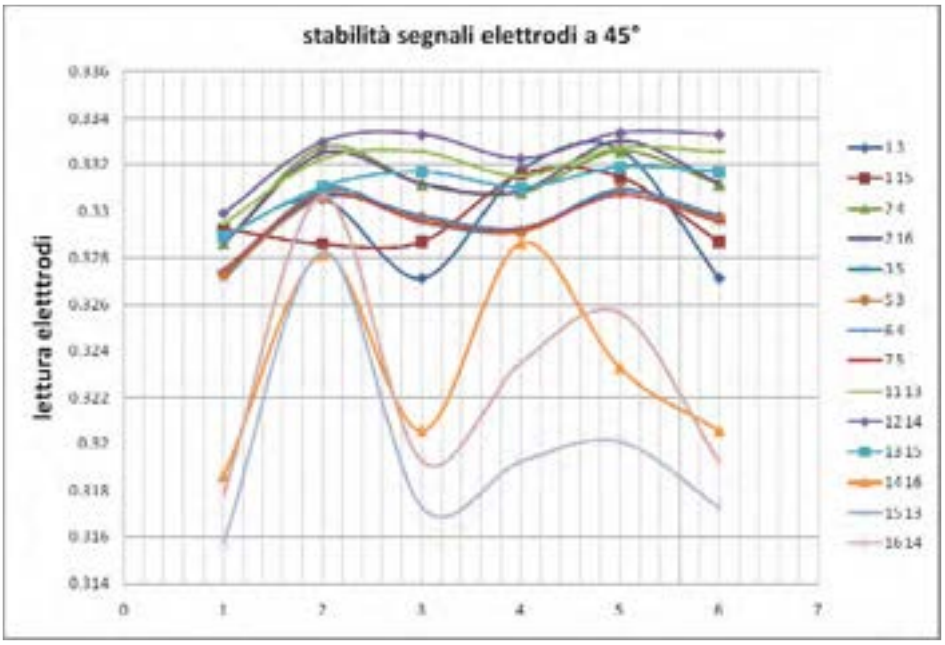


Figura 13: Test con sola acqua: segnale elettrodi a 45°

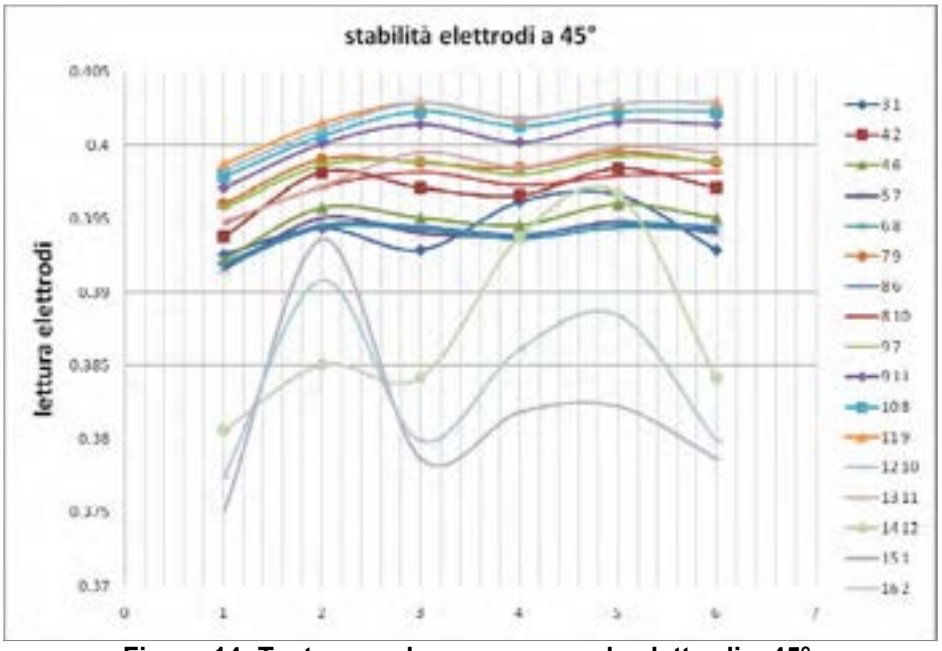


Figura 14: Test con sola acqua: segnale elettrodi a 45°

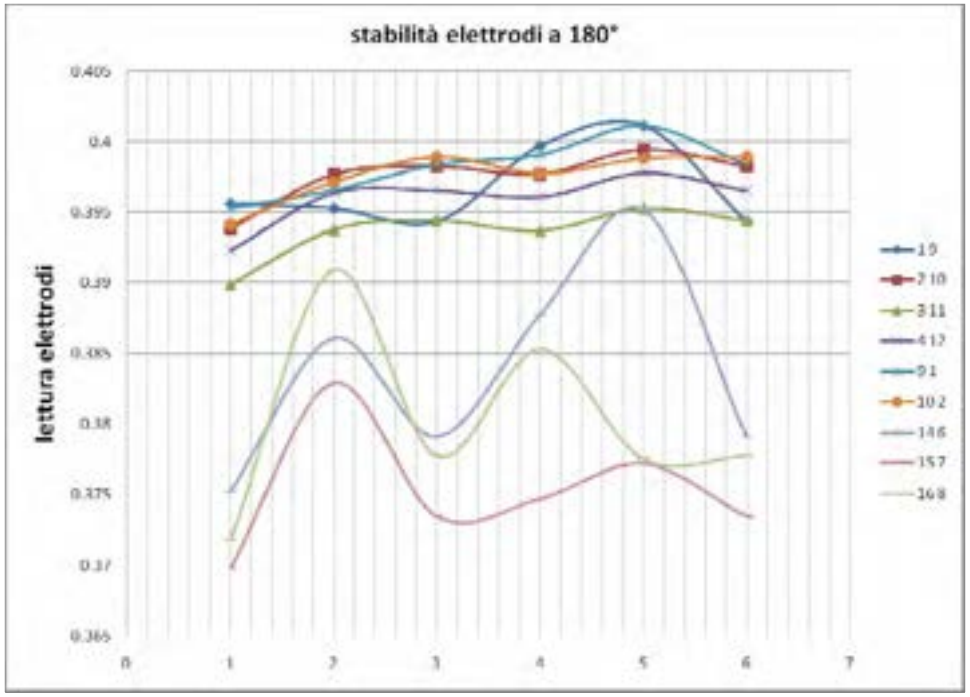


Figura 15: Test con sola acqua: segnali elettrodi a 180°

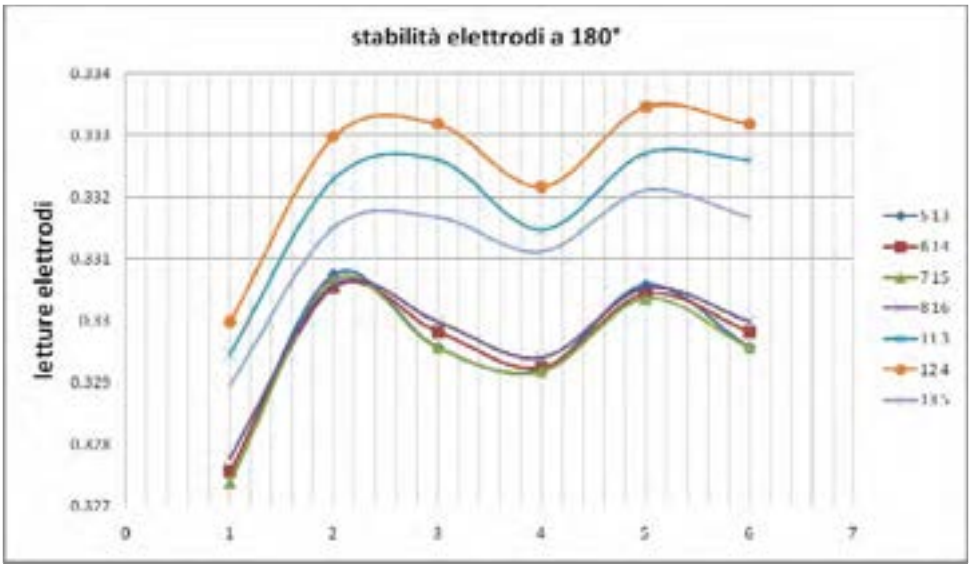


Figura 16: Test con sola acqua: segnali elettrodi a 180°

Per poter analizzare la stabilità dei segnali elettrici di riferimento V_V e V_L , ovvero i segnali degli elettrodi in presenza di solo vapore e solo liquido, è necessario confrontarli con il campo di variazione degli elettrodi.

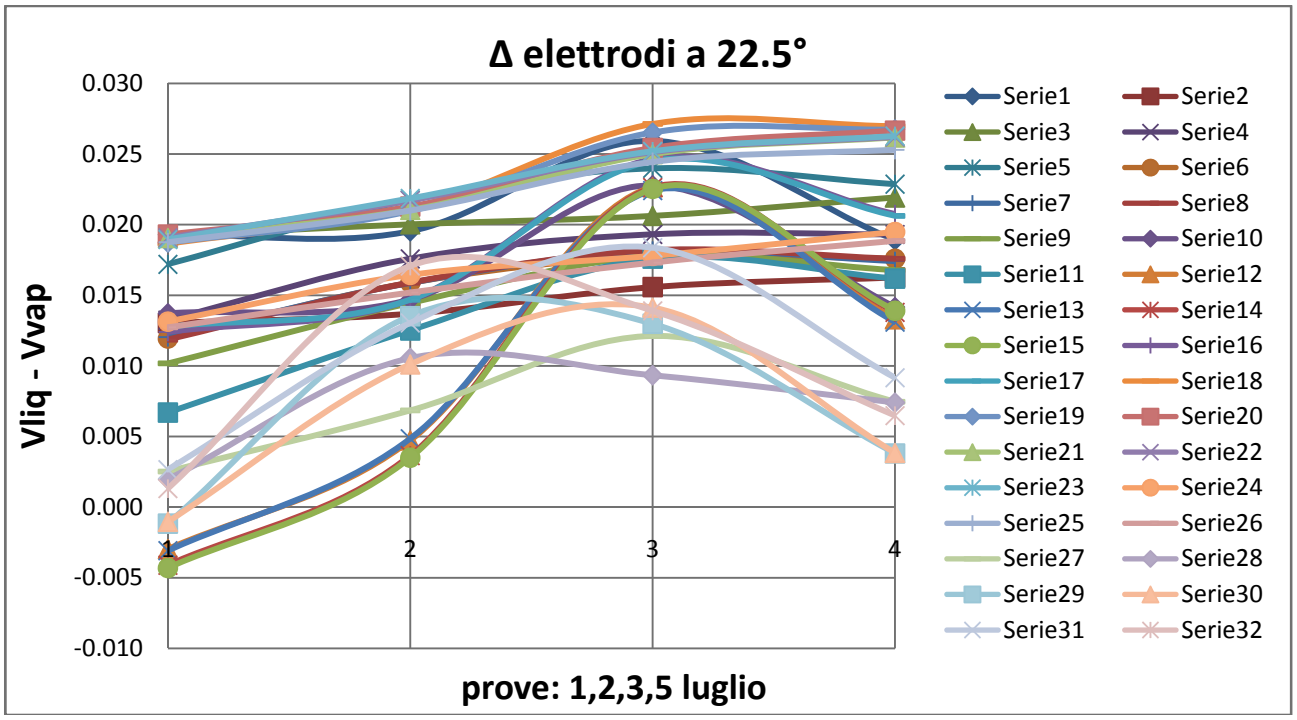


Figura 17: range di variaizone elettrodi a 22.5° durante le prove del 1,2,3 e 5 luglio

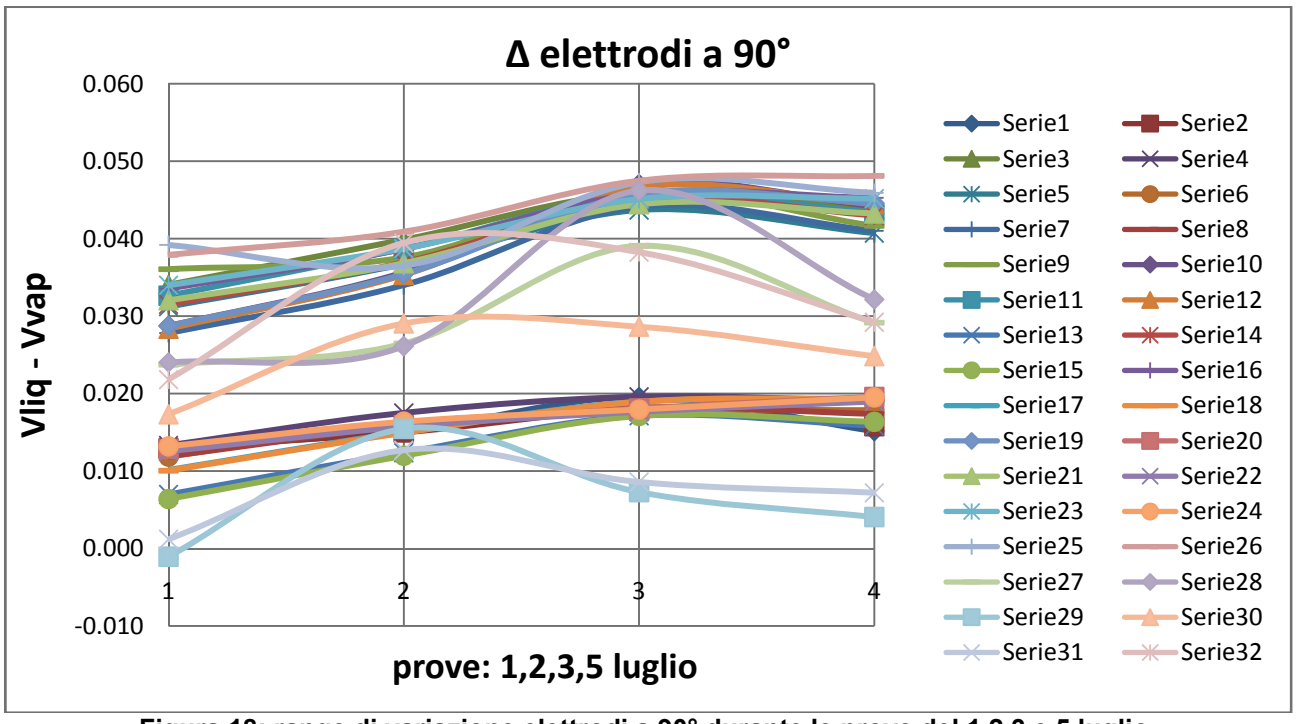


Figura 18: range di variazione elettrodi a 90° durante le prove del 1,2,3 e 5 luglio

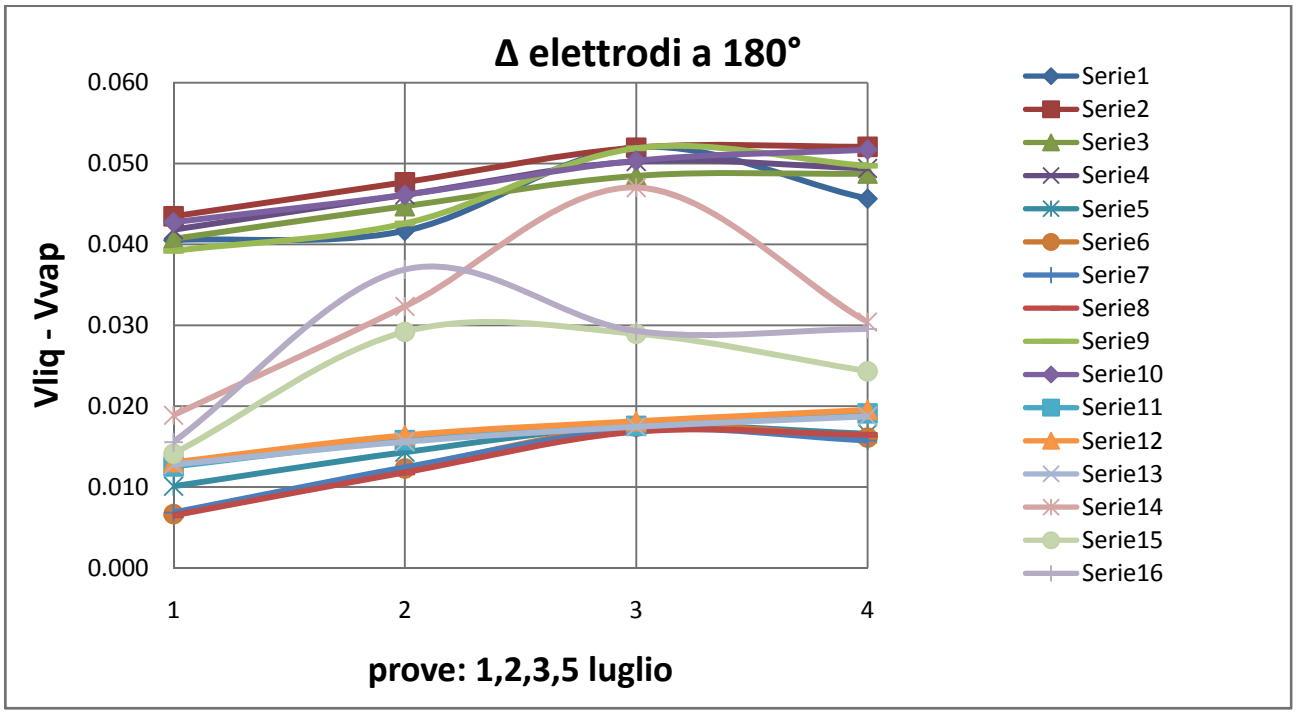


Figura 19: range di variazione elettrodi a 180° durante le prove del 1,2,3 e 5 luglio

La Figura 20 mostra la deriva percentuale media del segnale in presenza di solo vapore rispetto al range di variazione del segnale degli elettrodi calcolata come:

$$\frac{V_{vap}^{MAX} - V_{vap}^{MIN}}{\overline{V_{liq}} - \overline{V_{vap}}}$$

In cui :

V_{vap}^{MAX} : è il segnale massimo misurato da ciascuna coppia di elettrodi in presenza di solo vapore;

V_{vap}^{MIN} : è il segnale minimo misurato da ciascuna coppia di elettrodi in presenza di solo vapore;

$\overline{V_{liq}}$: è il segnale medio misurato da ciascuna coppia di elettrodi in presenza di solo liquido;

$\overline{V_{vap}}$: è il segnale medio misurato da ciascuna coppia di elettrodi in presenza di solo vapore.

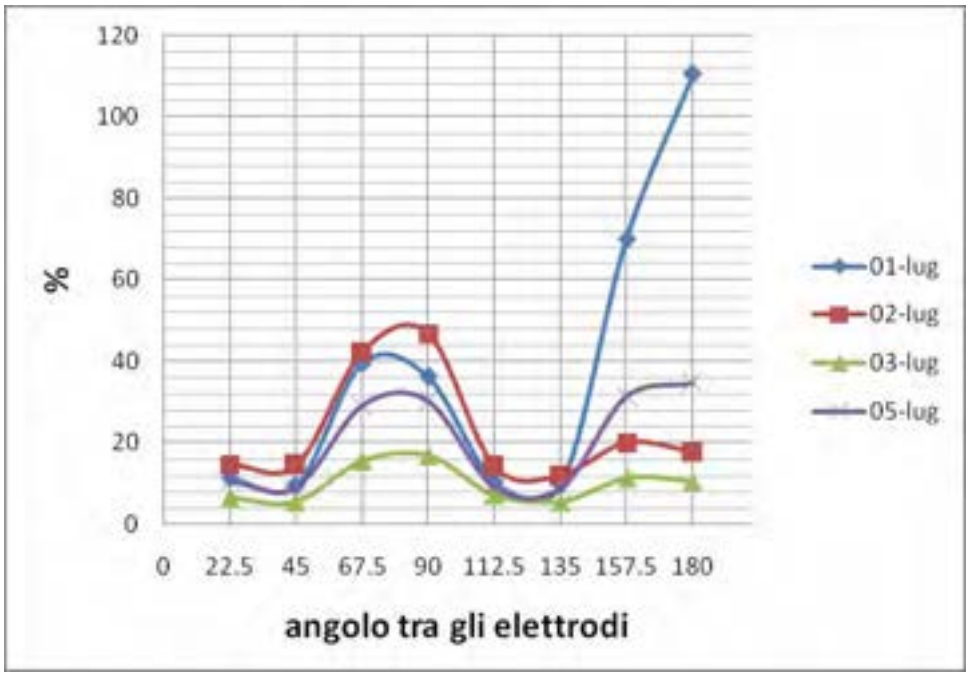


Figura 20:Deriva percentuale media del segnale di riferimento rispetto al range di variazione degli elettrodi

Il segnale degli elettrodi in presenza di solo vapore nella sezione di prova presenta una forte deriva in tutti i giorni di prova. La deriva media rispetto al range di variazione degli elettrodi varia da un minimo del 10% per le prove del 3 luglio ad un massimo del 37% per le prove del 1 luglio.
Gli elettrodi che mostrano la deriva meno marcata sono quelli orientati a 22.5°, 45°, 112.5° e 135° che comunque presentano derive dell'ordine del 10% rispetto al range di variazione degli elettrodi.

	1	2	3	5
22.5	11.4	14.6	6.6	10.7
45	9.5	14.5	5.5	9.0
67.5	39.6	42.3	15.6	29.1
90	36.2	46.8	16.9	30.2
112.5	10.3	14.2	7.2	9.2
135	9.7	12.1	5.6	9.0
157.5	70.0	20.1	11.4	31.3
180	110.5	17.8	10.6	34.7

Tabella 10: Deriva percentuale media del segnale in presenza di solo vapore rispetto al range di variazione degli elettrodi

Le derive del segnale degli elettrodi in presenza di solo vapore comportano una errata interpretazione del segnale della sonda durante i test effettuati in regime bifase. Tali segnali infatti vengono normalizzati rispetto ai valori di riferimento registrati in presenza di sola fase liquida e di sola fase vapore.
Per ogni giornata di prova e per ogni coppia di elettrodi è stato considerato, come segnale di riferimento, la media dei segnali acquisiti, in condizioni di vapore, in diversi momenti della giornata trascurando qualsiasi

tipo di fenomeno ambientale esterno. Discorso analogo per quanto riguarda i segnali degli elettrodi in presenza di solo liquido.

Ciò comporta, a parità di segnale elettrico in presenza di solo liquido, una sovrastima del grado di vuoto nel caso in cui il segnale in presenza di vapore cresca e viceversa, una sottostima del grado di vuoto nel caso in cui il segnale in presenza di solo vapore diminuisca.
L'aleatorietà della misura sul grado di vuoto genera una maggiore incertezza sulla misura della portata massica bifase.

7.3 Influenza dei parametri ambientali sulla deriva del segnale

Per meglio comprendere le cause della deriva dei segnali degli elettrodi e ridurre l'incertezza sulla misura di portata, si è deciso di condurre alcuni test in sola aria facendo variare alcuni parametri ambientali. Tali test hanno lo scopo di correlare le derive dei segnali degli elettrodi a fenomeni ambientali esterni e, in particolare, alle variazione di temperatura e umidità.

Il primo test è consistito semplicemente nella acquisizione dei segnali degli elettrodi a pressione e temperatura ambiente in diversi momenti della giornata ed in tre giornate differenti. Temperatura e umidità sono state misurate con una sonda igro-termo-anemometrica.

I risultati sono riassunti nei grafici seguenti.
Le Figure 21, 22 e 23 mostrano l'andamento del segnale di alcuni elettrodi orientati a 22.5° in funzione della temperatura ambiente misurata con la sonda termo-anemometrica nelle vicinanze della sonda capacitiva. Le tre serie di dati fanno riferimento ai tre giorni nei quali sono state effettuate le acquisizioni (2, 3 e 4 luglio).

Nei tre giorni considerati la temperatura varia di poco, mediamente si mantiene costante tra 23 e 25 °C e non sono rilevabili derive consistenti dei segnali degli elettrodi. Alcune misure, effettuate con la coppia di elettrodi 2-3 il giorno 2 luglio e con la coppia di elettrodi 1-2 il 3 luglio, si discostano considerevolmente dal segnale medio misurato con le altre coppie di elettrodi ma per ragioni non direttamente ascrivibili alla variazione di temperatura, presumibilmente per un disturbo elettrico.

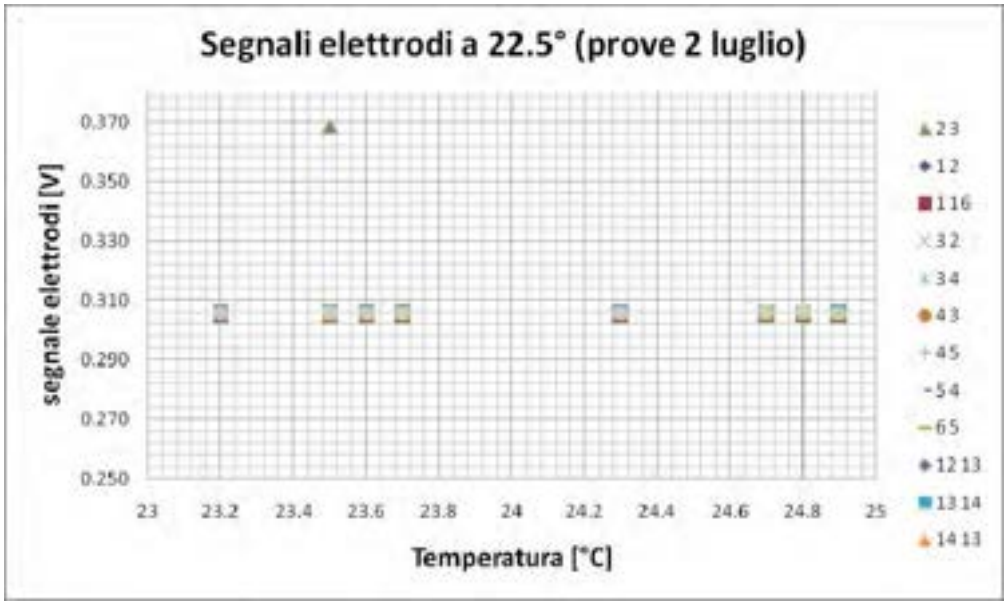


Figura 21: segnale elettrodi a 22.5° vs temperatura ambiente (2 luglio)

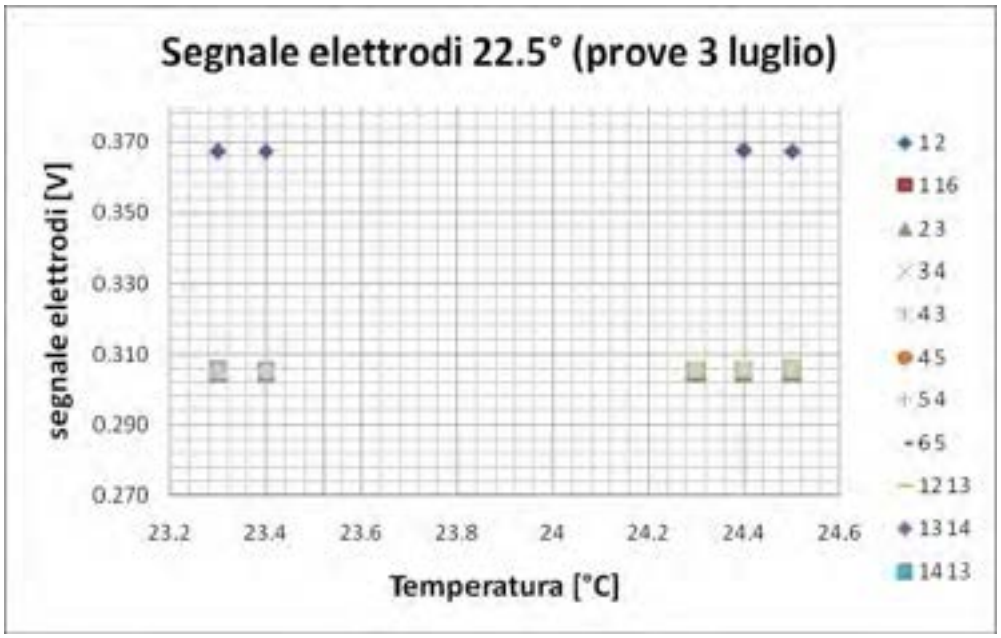


Figura 22: segnale elettrodi a 22.5° vs temperatura ambiente (3 luglio)

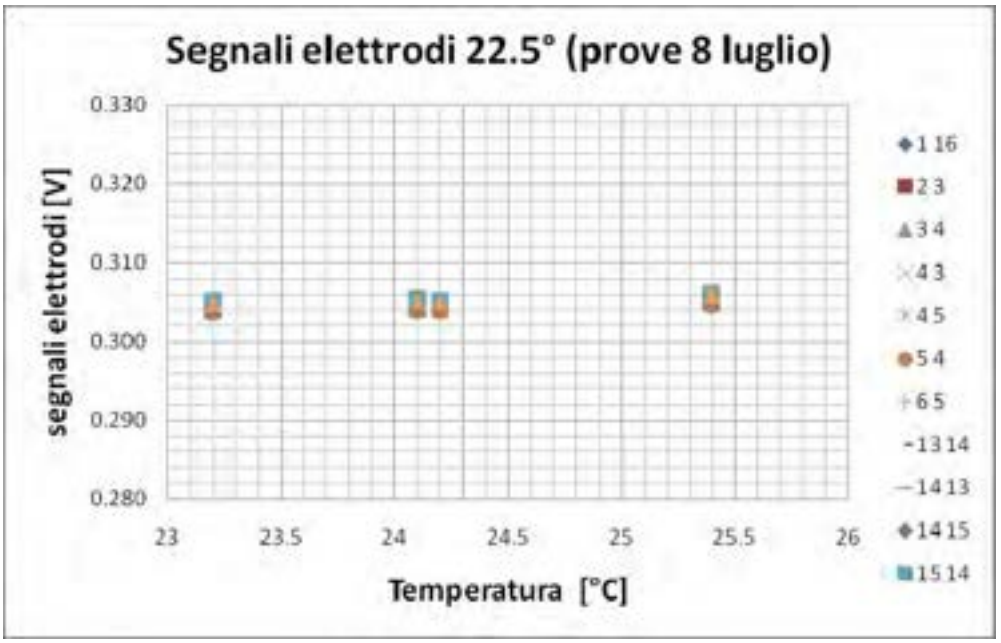


Figura 23: segnale elettrodi a 22.5° vs temperatura ambiente (8 luglio)

Le Figure 24, 25 e 26 invece, mostrano l'andamento del segnale di alcuni elettrodi orientati a 180° in funzione della temperatura nei giorni 2, 3 e 4 luglio. Anche per le misure effettuate con coppie di elettrodi orientati a 180° si possono ripetere considerazioni analoghe a quelle fatte per gli elettrodi orientati a 22.5°. Il segnale, a parte qualche eccezione (misura effettuata con la coppia 10-2 il 2 luglio), si mantiene costante al variare della temperatura nell'arco della giornata di prove.

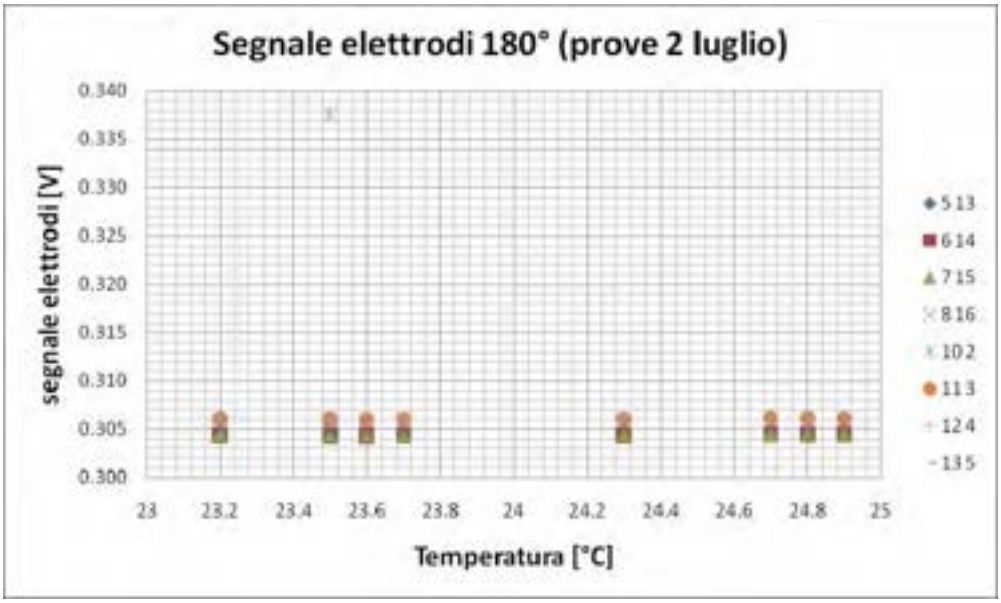


Figura 24: segnale elettrodi a 180° vs temperatura ambiente (2 luglio)

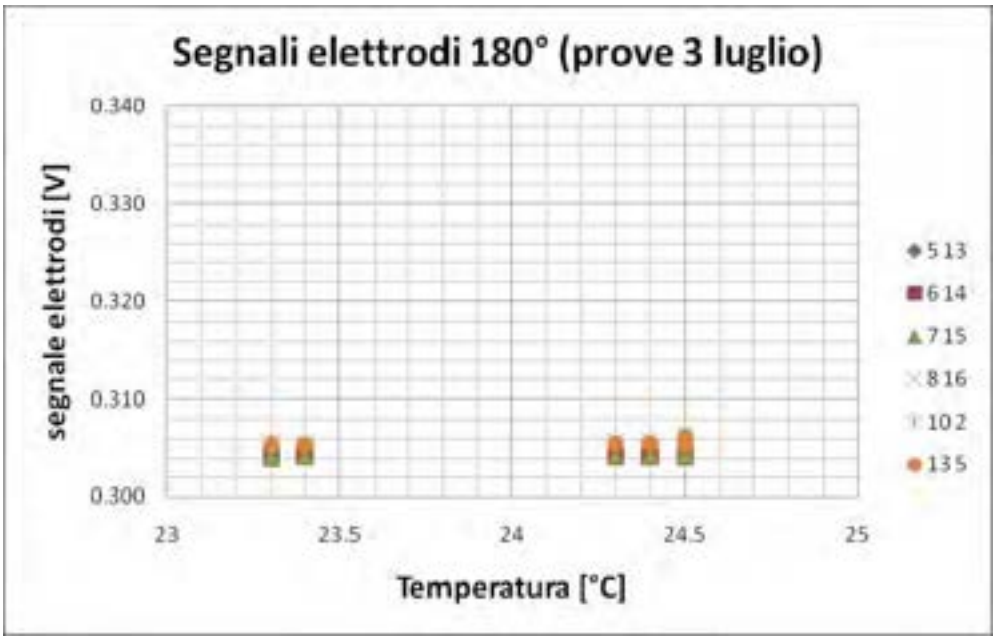


Figura 25: segnale elettrodi a 180° vs temperatura ambiente (3 luglio)

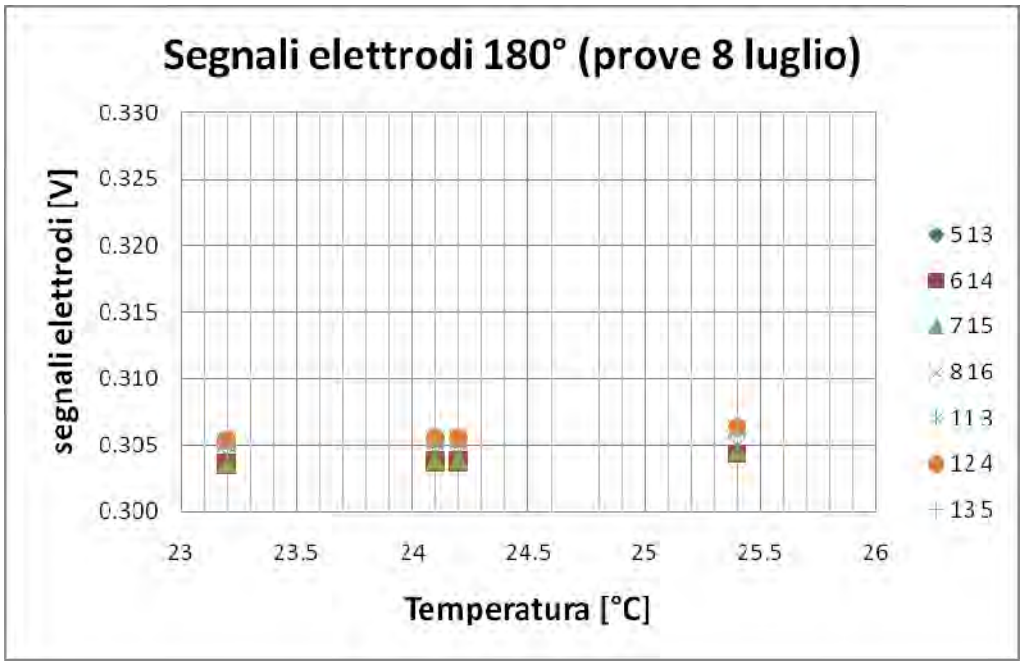


Figura 26: segnale elettrodi a 180° vs temperatura ambiente (8 luglio)

Confrontando i segnali misurati da una coppia di elettrodi vicini (Figura 27) e da una coppia di elettrodi lontani (Figura 28) si può notare una buona ripetibilità della misura a parità di temperatura.

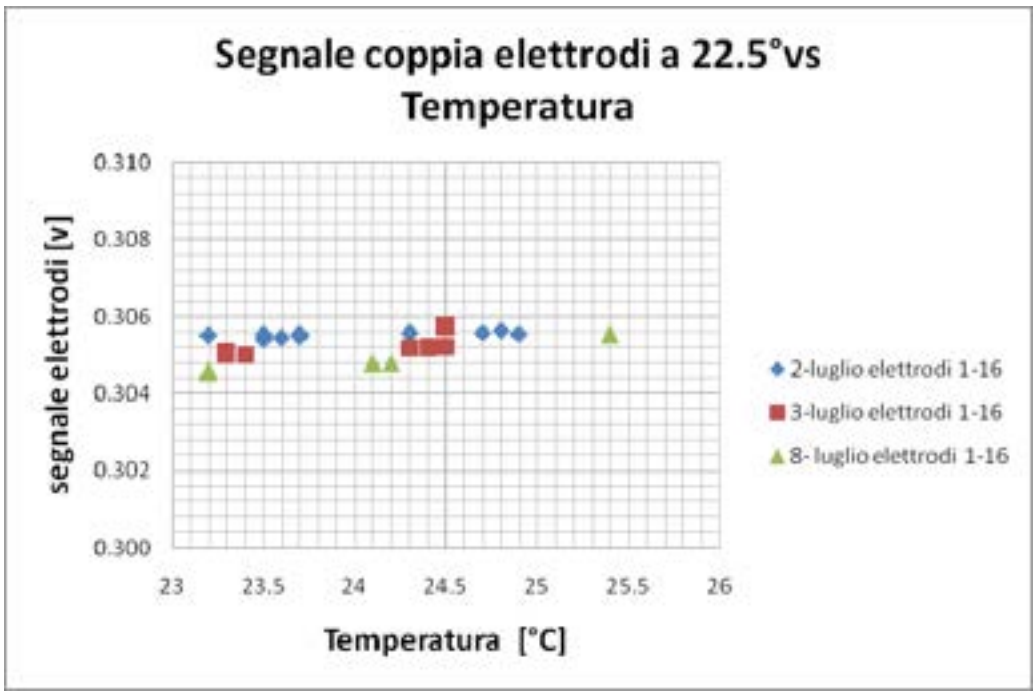


Figura 27: segnale elettrodi 1-16 nei tre giorni di prove vs temperatura

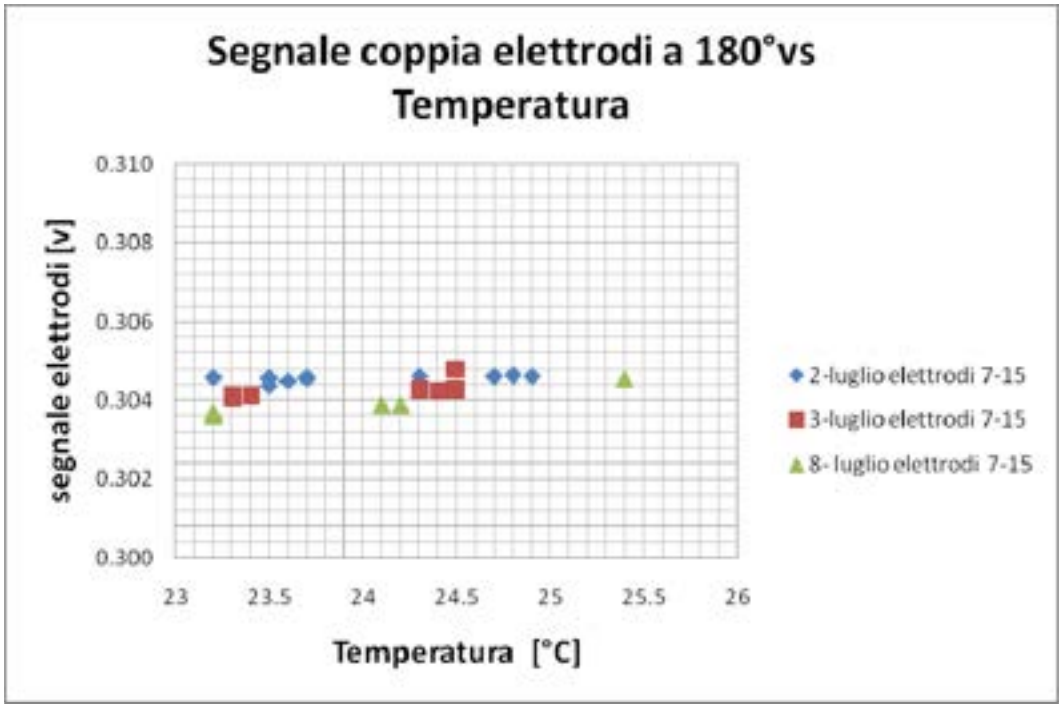


Figura 28:segnale elettrodi 7-15 nei tre giorni di prove vs temperatura

Il secondo test è consistito nel far variare l'umidità all'interno dell'intercapedine tra la superficie esterna della sonda in pyrex e la superficie interna del contenitore in acciaio, zona all'interno della quale si trovano i circuititi stampati, gli elettrodi, i trasformatori in ferrite e i tutti i cavi di collegamento.
Gli elettrodi, infatti, sono influenzati non sono dalla variazione delle condizioni del fluido all'interno della sonda ma anche dalla variazione dei parametri ambientali all'interno dell'intercapedine.
L'umidità dell'aria nella zona circostante alla sonda è stata fatta variare, seppur di poco, iniettando all'interno dell'intercapedine dell'aria compressa.
Il flusso d'aria è convogliato in uno scarico a cui è connessa la sonda igro-termo-anemometrica per monitorare temperatura e pressione.

Le Figure 29, 30, 31 mostrano i segnali registrati dagli elettrodi a 22.5° in funzione dell'umidità assoluta nei tre giorni di prova (2, 3 e 8 luglio) calcolata sulla base della temperatura e dell'umidità relativa misurata con la sonda termo-anemometrica.
Non sono rilevabili variazioni apprezzabili del segnale in funzione della variazione di umidità dell'aria nell'intercapedine tra sonda capacitiva e contenitore in acciaio.

Le Figure 32, 33 e 34 mostrano i segnali degli elettrodi a 180° in funzione dell'umidità assoluta misurata in prossimità dell'elettronica. Anche in questo caso non sono evidenziabili derive del segnali che si mantengono pressoché costanti.

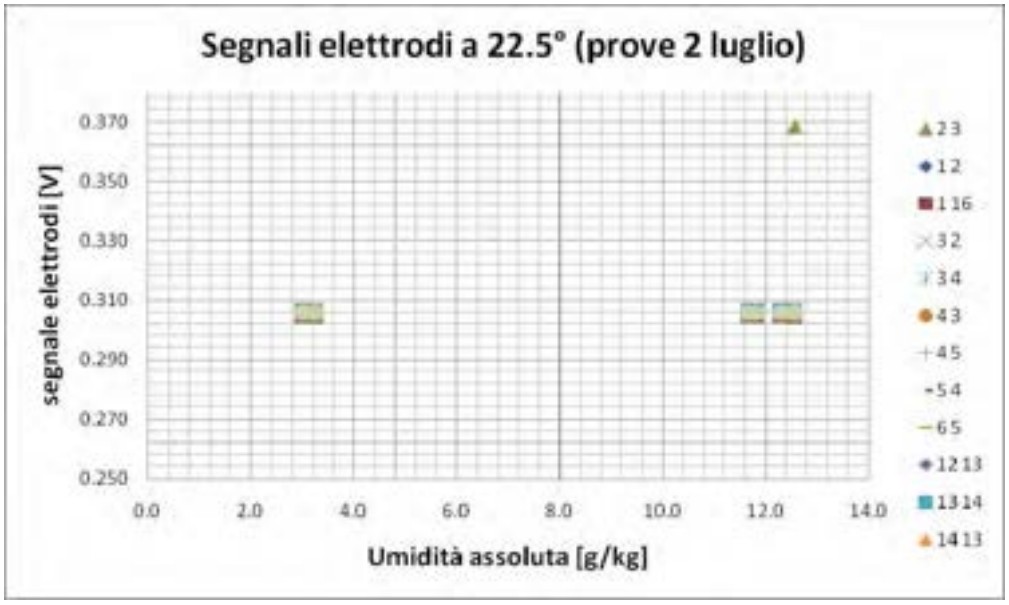


Figura 29: segnale elettrodi a 22.5° vs umidità (2 luglio)

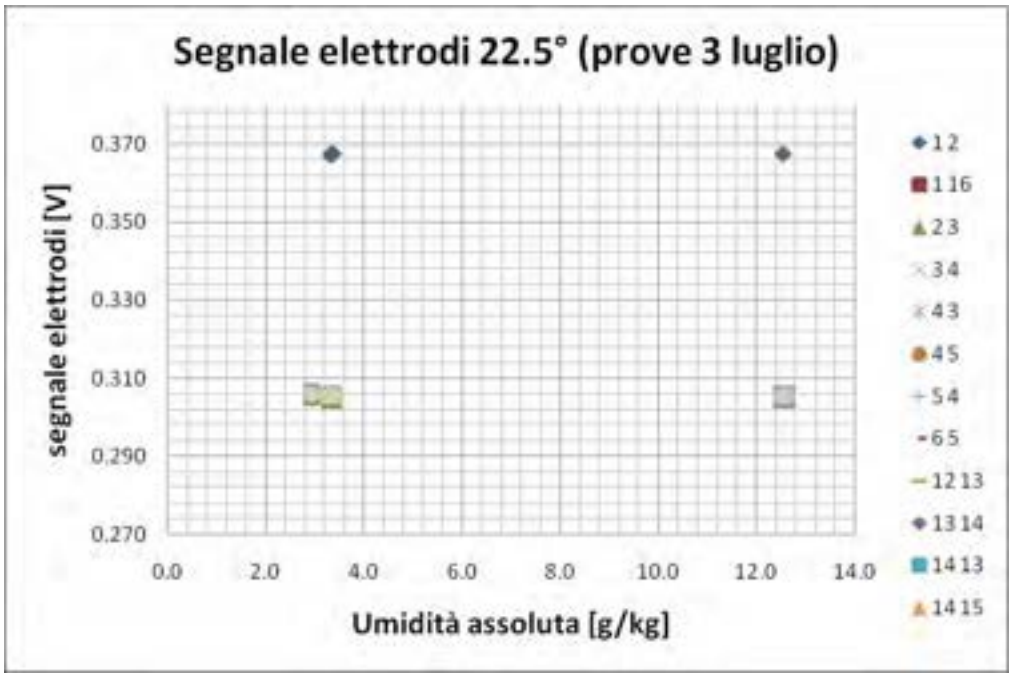


Figura 30: segnale elettrodi a 22.5° vs umidità (3 luglio)

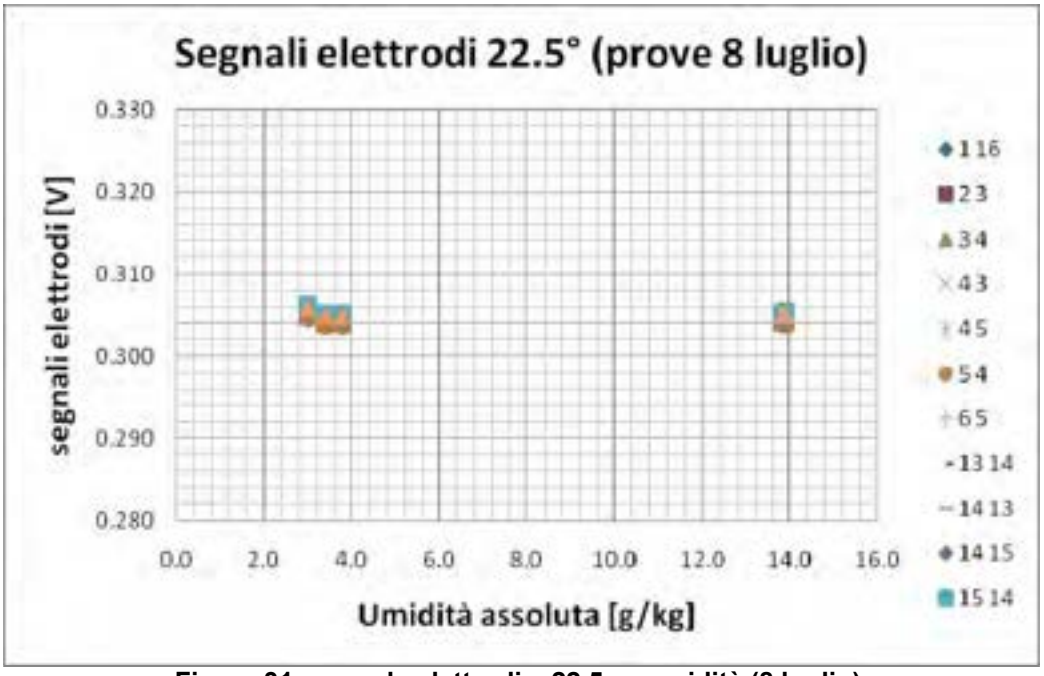


Figura 31: segnale elettrodi a 22.5 vs umidità (8 luglio)

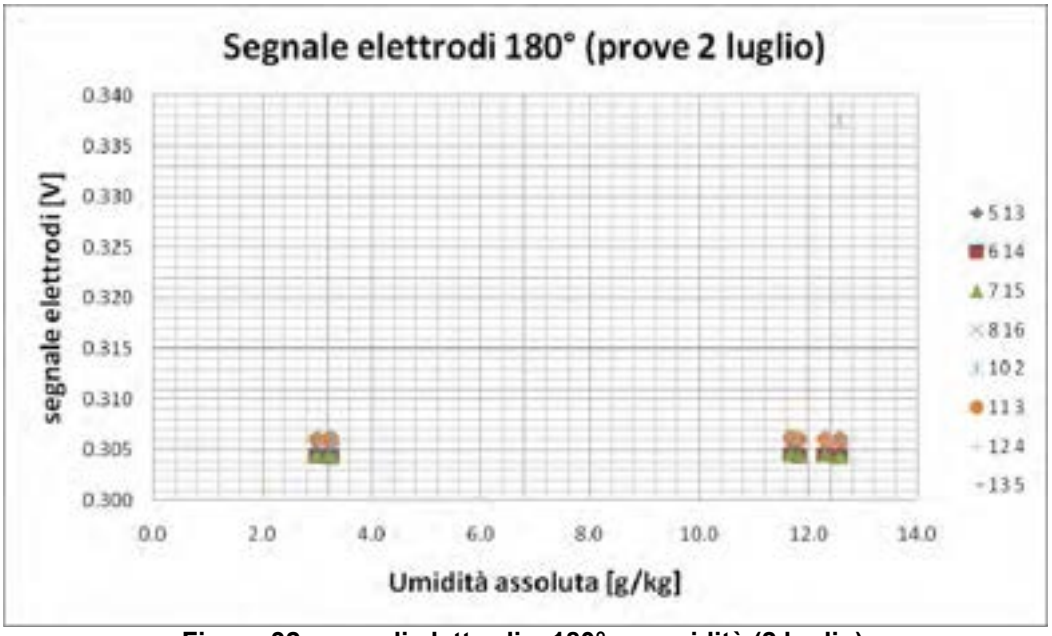


Figura 32: segnali elettrodi a 180° vs umidità (2 luglio)

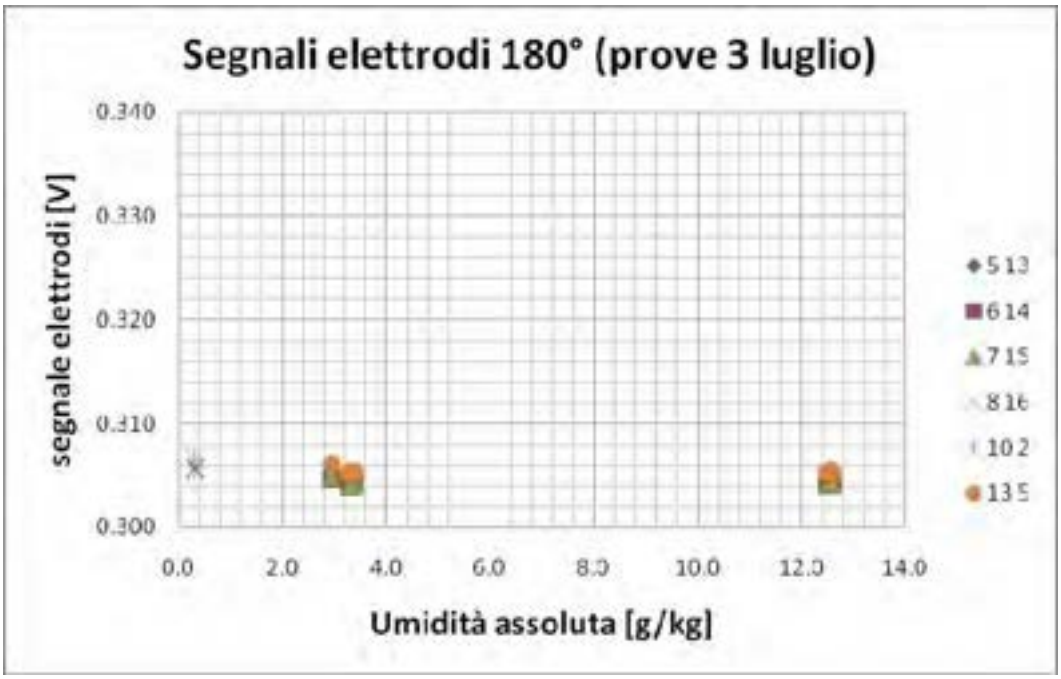


Figura 33: segnali elettrodi a 180° vs umidità (3 luglio)

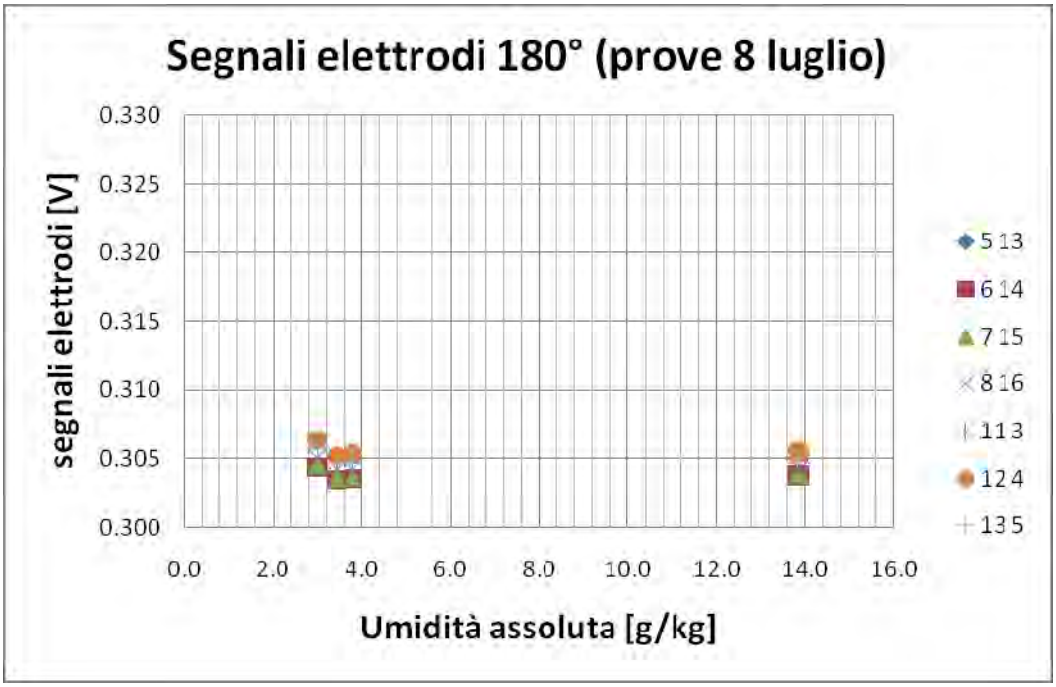


Figura 34: segnali elettrodi a 180° vs umidità (prove 8 luglio)

Confrontando i segnali misurati con una coppia di elettrodi vicini (Figura 35) ed i segnali misurati con una coppia di elettrodi distanti (Figura 36) si può notare una buona ripetibilità della misura a parità condizioni ambientali anche in giorni diversi.

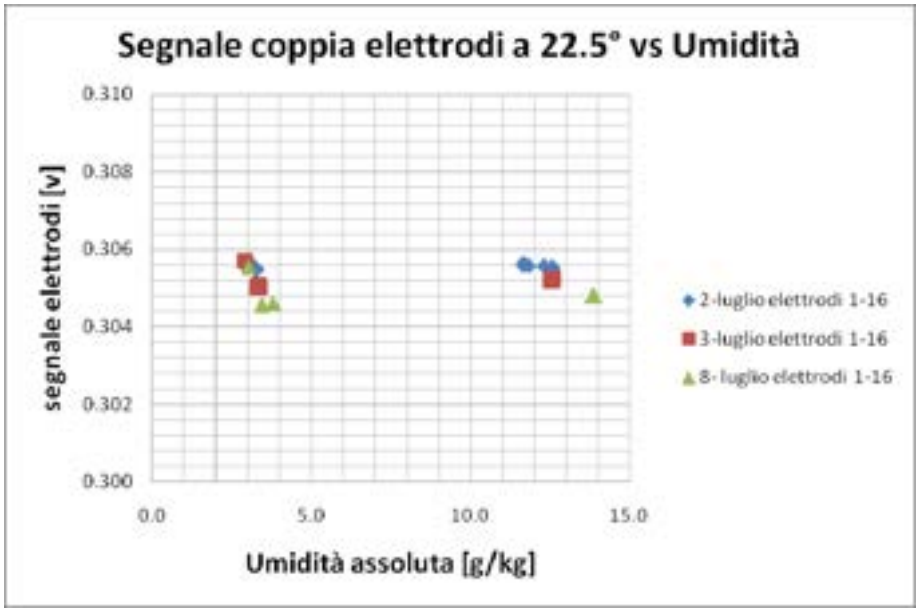


Figura 35: segnale coppia di elettrodi 1-16 vs umidità nei tre giorni di prova

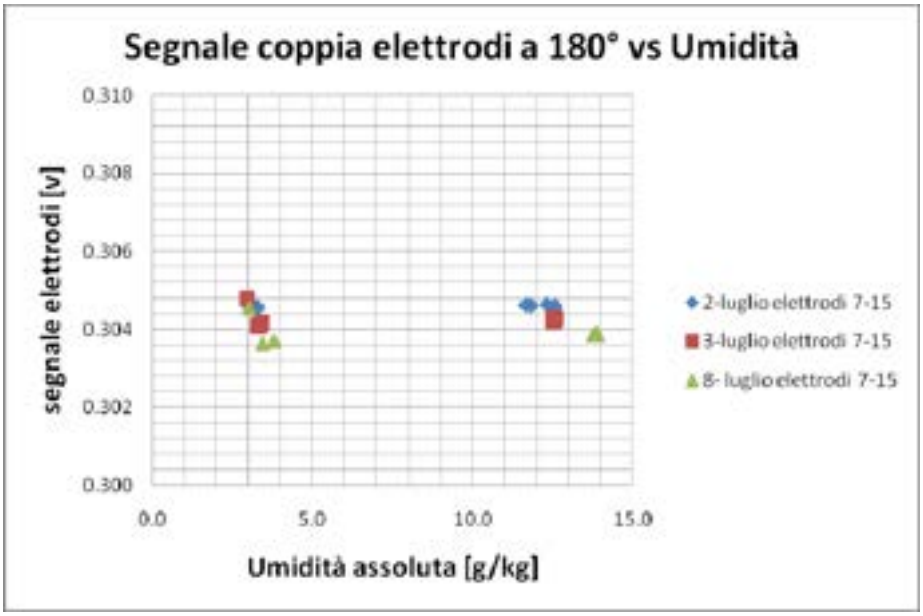


Figura 36: segnale coppia elettrodi 7-15 vs umidità nei tre giorni di prova

Il terzo test condotto consiste nell'aumentare progressivamente la temperatura dell'elettronica e registrare contemporaneamente il segnale misurato dagli elettrodi in presenza di sola aria.
Il contenitore in acciaio è stato esposto uniformemente alla fiamma prodotta da un cannello ossiacetilenico per qualche minuto. All'interno del contenitore è stata iniettata aria compressa per favorire e uniformare lo scambio termico.
Il flusso d'aria calda è stato convogliato ad uno scarico a cui è stata connessa la sonda igro-termo-anemometrica per misurare la temperatura e l'umidità all'interno del contenitore.

I valori di temperatura e umidità assoluta misurati durante il test sono mostrati in Tabella 11

prova	T [°C]	u [g/kg]
20	24.1	13.8
21	24.2	13.9
22	23.2	3.8
23	23.2	3.4
24	25.4	3.0
25	27.7	2.8
26	28.5	6.6
27	36.5	5.7
29	46.4	6.1
30	48.5	6.2
31	51.5	6.5

Tabella 11: Temperatura e umidità assoluta

In Figura 37 e in Figura 38 sono mostrati rispettivamente i segnali delle coppie di elettrodi orientati a 22.5° e a 180° in funzione della temperatura dell'elettronica.

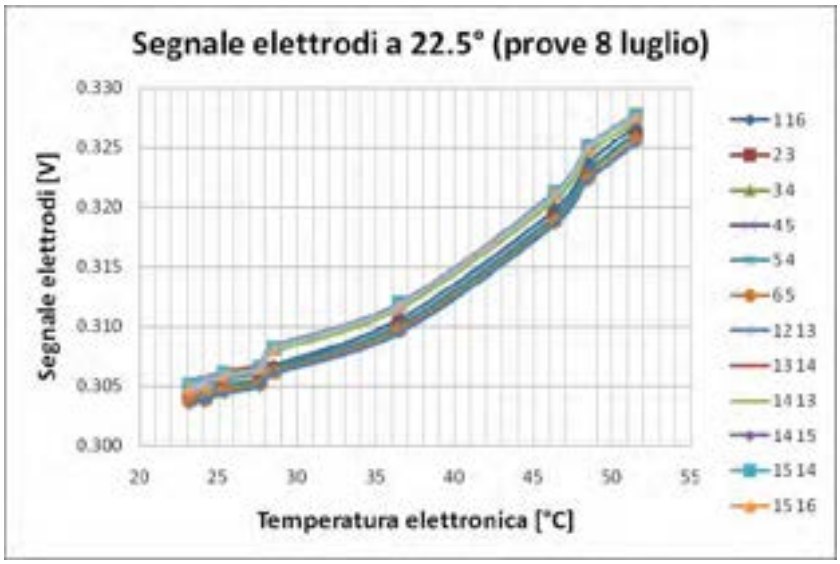


Figura 37: segnale elettrodi a 22.5° in funzione della temperatura dell'elettronica

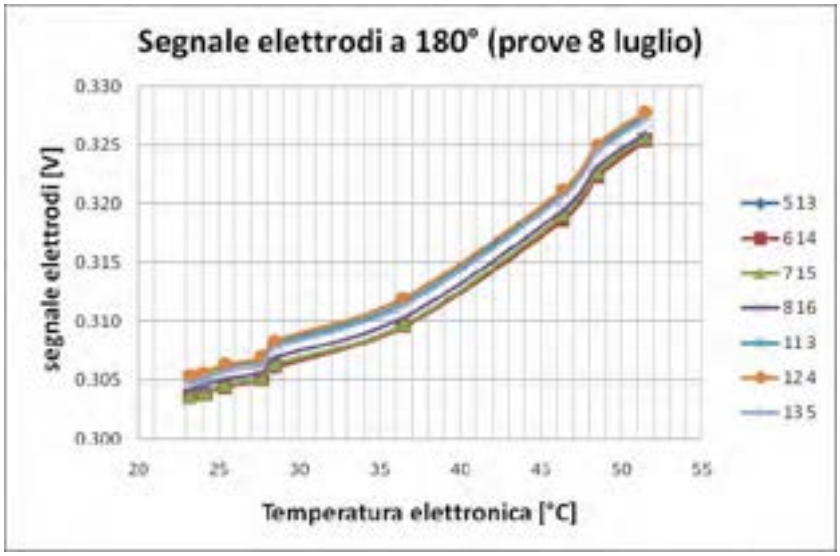


Figura 38: segnale elettrodi a 180° in funzione della temperatura dell'elettronica

I segnali registrati durante il test sono correlabili con i valori di temperatura dell'elettronica. In particolare, sia i segnali delle coppie di elettrodi vicine (a 22.5°), sia i segnali delle coppie distanti (a 180°) presentano un andamento monotono crescente con la temperatura.
La deriva del segnale in presenza di sola aria è piuttosto ampia e si aggira intorno ai 25-30 mV con una temperatura dell'elettronica che si aggira intorno a 50 °C. Questo dato, peraltro compatibile con le derive del segnale in presenza di solo vapore registrate durante le campagne di prova dell'anno scorso, se confrontato con i range di variazione del segnale degli elettrodi, giustifica l'aleatorietà dei valori di grado di vuoto calcolati.
I range di variazione degli elettrodi $V_{liq} - V_{vap}$ infatti, come si può osservare dalle Figure 17, 18 e 19, variano tra i 20 e i 50 mV e risultano pertanto dello stesso ordine di grandezza delle derive del segnale in presenza di sola aria.
Inoltre, durante le prove in bifase la temperatura dell'elettronica era salita anche fino a 70°C per cui ci aspettiamo che si fossero generate derive del segnale più alte di quelle registrate nel test in sola aria.

8. Modifiche alla Sonda capacitiva

Come detto, le variazioni di temperatura a cui è sottoposta l'elettronica della sonda capacitiva generano una forte deriva del segnale degli elettrodi. Tale deriva, quantificabile in circa 25mV a temperature di 50°C, risulta essere dello stesso ordine di grandezza del campo di variazione degli elettrodi nel passare da segnale in presenza di solo vapore a segnale in presenza di sola acqua all'interno del volume di controllo della sonda.
Tali derive influenzano pesantemente l'accuratezza della misura di grado di vuoto con la sonda capacitiva e di conseguenza il calcolo della portata bifase.

Per poter avere misure di grado di vuoto affidabili è necessario annullare o limitare l'effetto della temperatura sulla misura con gli elettrodi.

In futuro si potrà realizzare un modello alternativo di sonda con un sistema per la termostatazione delle schede in modo da mantenerle a temperatura costante eliminando l'effetto della variazione di temperatura sulle misure.

Le schede saranno inserite in scatole coibentate con rivestimento interno. All'interno delle scatole passeranno dei tubi in rilsan a contatto con entrambe le facce delle schede elettroniche. I tubi in rilsan saranno collegati ad un criostato che permetterà di mantenere costante la temperatura del fluido refrigerante che vi scorre all'interno.

Il fluido refrigerante potrà essere acqua demineralizzata oppure, ancora meglio un fluido diatermico privo di molecole polari come l'olio siliconico, in modo da non portare in vicinanza dei circuiti, sostanze in grado di alterare le caratteristiche dielettriche dello spazio.

A questo punto, per motivi di ingombro, il contenitore in acciaio, utilizzato come protezione per gli operatori in caso di superamento della massima pressione di esercizio del tubo in pyrex, sarà eliminato.
La sonda e gli elettrodi saranno avvolti con uno strato di fibre di vetro pretensionate con funzione sia di protezione sia di rinforzo meccanico. In questo modo potrà essere superata anche la massima pressione di esercizio della sonda in pyrex pari a 16 bar.

9. Limiti di utilizzo dello Spool Piece

Dallo studio dei transitori incidentali in SPES-3, tramite simulazioni RELAP5 [1], [2], sono stati ricavati gli intervalli di misura delle grandezze di interesse.

In Tabella 12 è riportato il confronto tra i valori minimi e massimi attesi per le grandezze termoidrauliche durante i transitori incidentali in SPES-3 e i valori degli stessi parametri ottenuti durante la sperimentazione sullo spool piece.

		Linee di rottura SPES-3		Sperimentazione Spool Piece	
Grandezza	**U.M.**	**MIN**	**MAX**	**MIN**	**MAX**
Temperatura	[°C]	36	216	100	145
Pressione	[bar]	1	20	1	4
Portata	[kg/s]	0	4.5	0	0.28
Grado di vuoto	[%]	0.65	1	0.65	1
Flusso di quantità di moto	[Pa]	0	900000	0	1600
Velocità fase vapore	[m/s]	0	400	0	50

Tabella 12: Massimi e Minimi valori delle grandezze termoidrauliche

Il grado di vuoto della miscela, durante i transitori incidentali in SPES-3, varia tra 0.65 e 1 anche se in realtà, a parte il transitorio di rottura sulla linea DVI, si mantiene sempre maggiore o uguale a 0.94.
In tale range può essere utilizzata la sonda capacitiva. Essa presenta un errore dell'ordine del 5% rispetto al valore teorico di grado di vuoto.

Il flusso della quantità di moto nelle linee di rotture e dell'ADS di SPES-3 varia tra 0 e 2.5 bar e, secondo i calcoli RELAP5, dovrebbe raggiungere il picco di 9 bar durante il transitorio incidentale sull'EBT (Emergency Boration Tank).
Il trasmettitore differenziale di pressione accoppiato al tubo di Pitot, che è stato utilizzato nella campagna sperimentale dello spool piece nel corso del PAR2012, ha un fondo scala di 10 kPa pertanto può essere utilizzato in range di flusso di quantità moto compresi tra 0 e 0.2 bar con un errore rispetto al valore teorico di flusso della quantità di moto dell'ordine del 5-7%.

Per valori di flusso di quantità di moto superiori si può utilizzare il drag disk, che presentava problema di sensibilità a causa delle basse portate generate durante le campagne di prova o, in alternativa, lo stesso tubo di Pitot accoppiato con un trasmettitore di pressione differenziale con un fondo scala più ampio.

Per quanto riguarda la misura di velocità della fase vapore, il vortex è stato testato nel range 0-50 m/s fornendo misure soddisfacenti, con errori inferiori al 5%.
Il range di variazione di velocità previsto durante i transitori incidentali di SPES-3 varia da 0 a 400 m/s.
Il vortex può essere utilizzato negli intervalli in cui la velocità a valle della valvola di rottura è inferiore ai 120 m/s.

Nei range in cui la velocità della fase vapore è superiore al fondo scala del vortex, sarà utilizzato il venturimetro previsto a monte della valvola di rottura, a patto che il flusso sia monofase.
Quando la portata a monte è bifase, la valutazione della portata sarà effettuata, utilizzando gli altri due strumenti, naturalmente commettendo un errore maggiore.

Considerando una matrice di prove tridimensionale basata sui parametri "grado di vuoto", "velocità della fase vapore" e "flusso di quantità di moto" possono essere individuate le zone della matrice in cui lo spool piece può essere impiegato e le zone in cui alcuni strumenti non possono essere utilizzati per limiti tecnici.

La Figura 39 mostra, all'interno del range di variazione dei parametri "velocità"-"grado di vuoto" previsti nella matrice di prova SPES-3, rispettivamente :

- i punti di prova della campagna sperimentale del PAR2012 (in blu).
- la zona in cui può essere utilizzata la sonda e il vortex (in verde). Tale zona comprende il range di variazione del grado di vuoto della miscela da 0.65 a 1 e velocità della fase vapore fino a 120 m/s, fondo scala del vortex.
- la zona in cui non è possibile effettuare la misura di velocità della fase vapore con il vortex (velocità superiori a 120 m/s) ma in cui può essere utilizzato il venturimetro a monte della valvola di rottura, quando il flusso è monofase (in giallo).

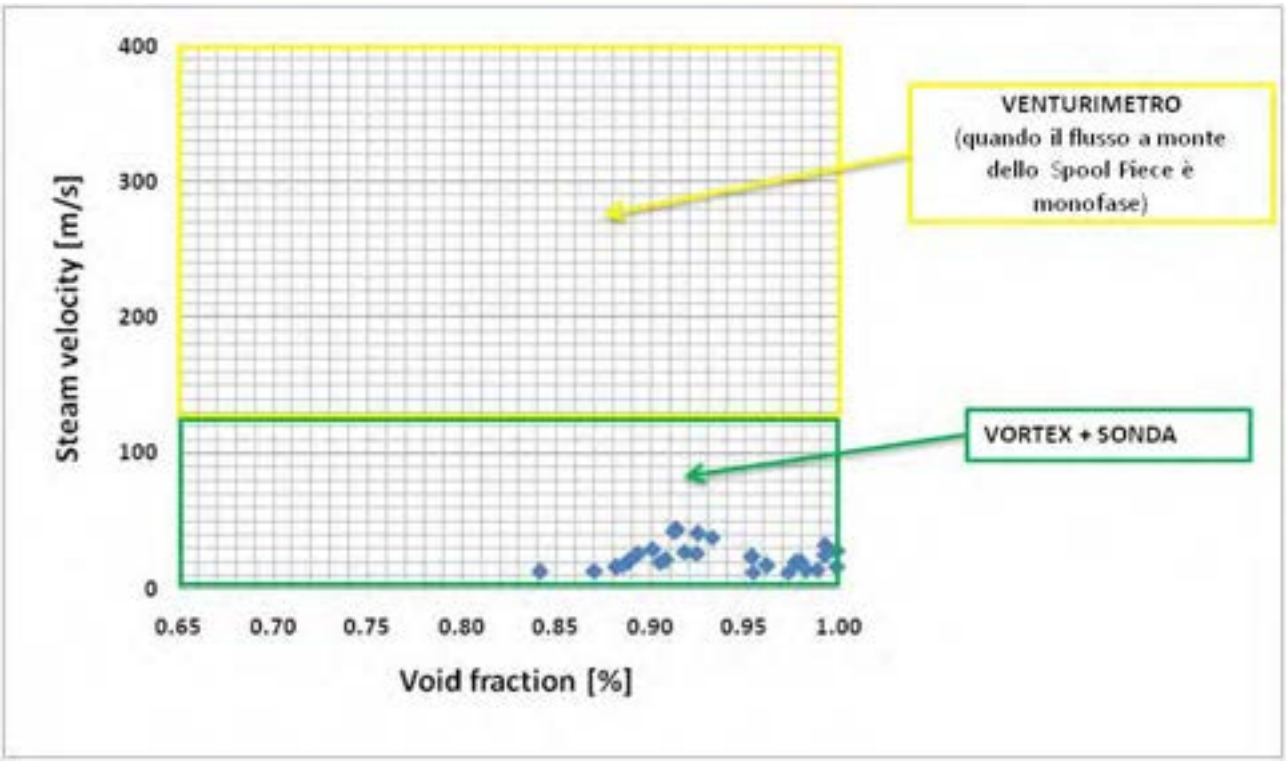


Figura 39: Velocità della fase vapore vs Grado di vuoto: campi di impiego degli strumenti

La Figura 40 riporta, all'interno del range di variazione dei parametri "flusso di quantità di moto" – "grado di vuoto" previsti nella matrice di prova SPES-3, rispettivamente:

- i punti di prova della campagna sperimentale del PAR2012 (punti in blu)
- la zona in cui può essere utilizzata la sonda capacitiva e il Pitot (in verde). Tale zona copre l'intero campo di variazione del grado di vuoto durante le prove SPES-3 e flussi di quantità di moto fino a 20 kPa, fondo scala del trasmettitore differenziale di pressione.
- la zona in cui il flusso di quantità di moto può essere misurato con il tubo di Pitot collegato ad un trasmettitore differenziale di pressione con fondo scala maggiore oppure con il drag disk (in arancio).

La Figura 41 infine, mostra, all'interno del range di variazione dei parametri "flusso di quantità di moto"-"velocità" previsti nella matrice di prove SPES-3, rispettivamente:

- i punti di prova della campagna sperimentale del PAR2012 (punti in blu)
- la zona in cui può essere utilizzato il vortex e il Pitot, compresa tra i rispettivi fondo scala degli strumenti (in verde chiaro).
- La zona in cui può essere utilizzato il vortex e il Pitot collegato ad un trasmettitore differenziale di pressione con fondo scala più grande, oppure, il drag disk (in verde scuro).
- La zona in cui può essere utilizzato il venturimetro, quando il flusso a monte della valvola di rottura è monofase (in giallo).

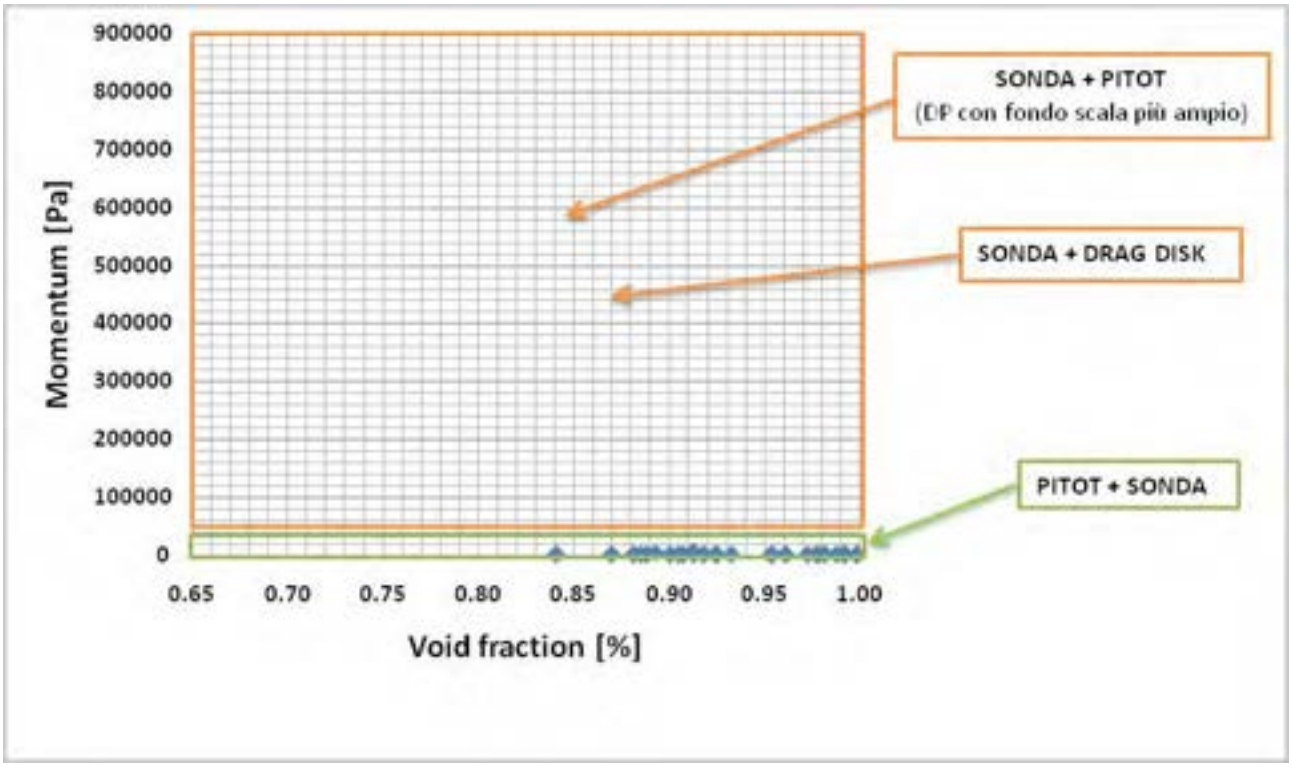


Figura 40: Flusso di quantità di moto vs grado di vuoto: campi di impiego degli strumenti

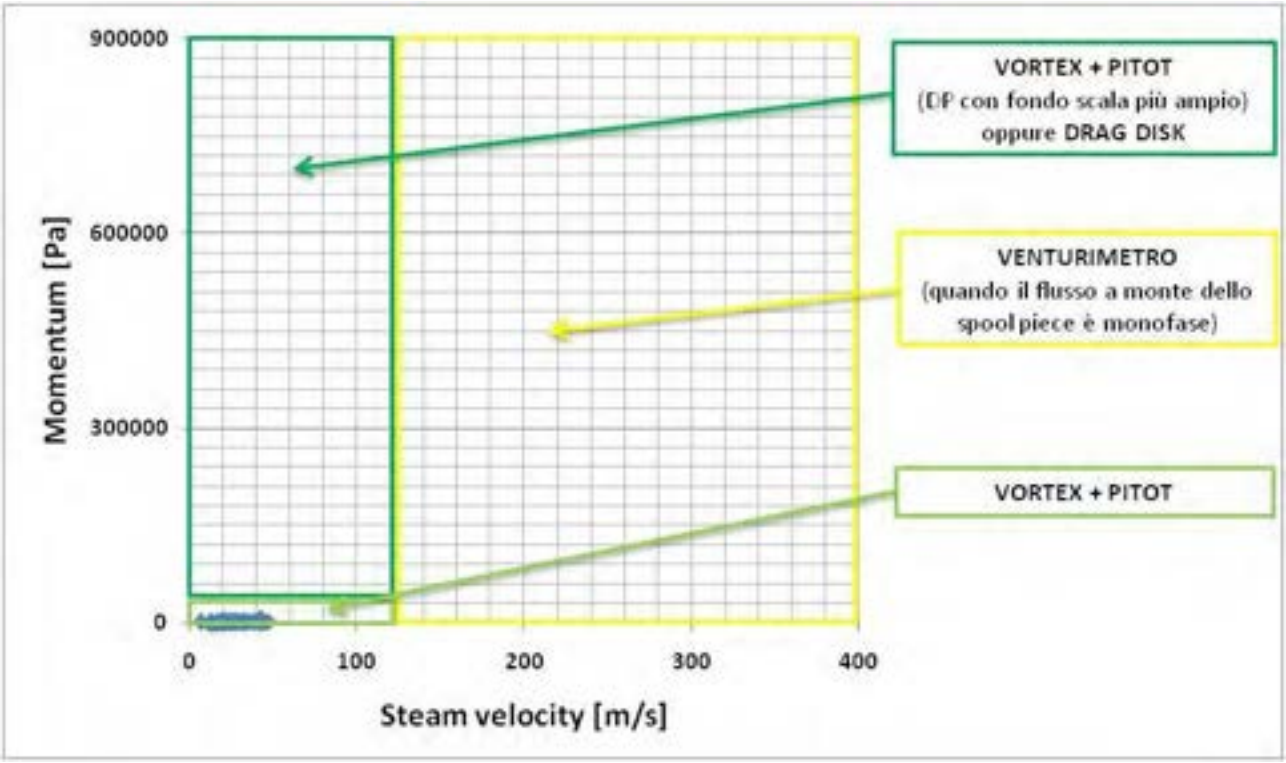


Figura 41: Flusso di quantità di moto vs velocità della fase vapore: campi di impiego degli strumenti

10. Dimensionamento del Venturimetro

Nei punti della matrice sperimentale di SPES-3 in cui non può essere utilizzato il vortex per misurare la velocità della fase vapore, a patto che il flusso a monte della valvola di rottura sia monofase, può essere utilizzato un venturimetro.

Analizzando i valori massimi e minimi delle grandezze termoidrauliche a monte e a valle della valvola (Tabella 13, 14, 15 16 e 17) e il loro andamento durante il transitorio incidentale [8], calcolato tramite simulazione RELAP5, si può osservare che:

DVI SPLIT		**A MONTE (Upstream)** ½'' Sch. 80 13.8 mm		**A VALLE (Downstream)** 2'' ½ Sch. 40 62.7 mm	
		MIN	**MAX**	**MIN**	**MAX**
void fraction		0	1	0.625	1
volume equilibrium quality		0	1	0	1
mass flowrate	kg/s	0	1.33	0	1.33
liquid velocity	m/s	0	12	0	55
gas velocity	m/s	0	154	0	188
liquid temperature	°C	102	320	82	164
gas temperature	°C	102	345	101	164
pressure	MPa	0.2	15	0.1	0.7
volumetric flow	m^3/s	0	0.002	0	0.464

Tabella 13: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea SPLIT del DVI

EBT SPLIT		**A MONTE (Upstream)** ¾'' Sch. 80 18.9 mm		**A VALLE (Downstream)** 1'' ¼ Sch. 40 35.1 mm	
		MIN	**MAX**	**MIN**	**MAX**
void fraction		0	1	0.97	1
volume equilibrium quality		0	1	0.19	1.04
mass flowrate	kg/s	0	4.67	0	4.67
liquid velocity	m/s	0	66	0	189
gas velocity	m/s	0	106	0	258
liquid temperature	°C	41.0	327	129	197
gas temperature	°C	133	345	133	204
pressure	MPa	0.34	15	0.10	1.39
volumetric flow	m^3/s	0	0.019	0	0.251

Tabella 14: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea SPLIT del EBT

ADS ST SPLIT		**A MONTE (Upstream)** 1'' ½ Sch. 80 38.1 mm		**A VALLE (Downstream)** 3'' Sch. 40 77.9 mm	
		MIN	**MAX**	**MIN**	**MAX**
void fraction		0	1	0.99	1
volume equilibrium quality		0	1.090	0.43	1.07
mass flowrate	kg/s	0	4.51	0	4.51
liquid velocity	m/s	0	35.8	0	205
gas velocity	m/s	0	35.8	0	405
liquid temperature	°C	76	342	91	170
gas temperature	°C	76	344	94	216
pressure	MPa	0.264	15.50	0.102	0.79
volumetric flow	m^3/s	0	0.013	0	1.93

Tabella 15: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea SPLIT del ADS ST

ADS ST stadio I		**A MONTE (Upstream)** 1'' ½ Sch. 80 38.1 mm		**A VALLE (Downstream)** 1''½ Sch. 40 40.9 mm	
		MIN	**MAX**	**MIN**	**MAX**
void fraction		0	1	0.9471	1
volume equilibrium quality		0	1.05	0	1.053
mass flowrate	kg/s	0	0.95	0	0.95
liquid velocity	m/s	0	10	0	25
gas velocity	m/s	0	10	0	66
liquid temperature	°C	61	338	36	216
gas temperature	°C	66	344	36	212
pressure	MPa	0.15	15.51	0.10	2.05
volumetric flow	m^3/s	0	0.012	0	0.075

Tabella 16: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS ST stadio I

ADS DT stadio I		**A MONTE (Upstream)** 2'' ½ Sch. 80 59.0 mm		**A VALLE (Downstream)** 2'' ½ Sch. 40 62.7 mm	
		MIN	**MAX**	**MIN**	**MAX**
void fraction		0.37	1	0.94	1
volume equilibrium quality		0.05	1	0	1.0
mass flowrate	kg/s	0	3.13	0	3.1
liquid velocity	m/s	0	9	0	32.9
gas velocity	m/s	0	9	0	96
liquid temperature	°C	57	344	37	216
gas temperature	°C	58	344	37	212
pressure	MPa	0.19	15.50	0.10	1.84
volumetric flow	m^3/s	0	0.023	0	0.261

Tabella 17: variabili termoidrauliche a monte e a valle della valvola sulla linea ADS DT stadio I

- Le linee ADS ST (single train) Stage I e ADS DT (double train) Stage I sono interessate, a valle della valvola di rottura, da velocità massime della fase vapore inferiori a 120 m/s, per cui può essere utilizzato il vortex e quindi lo spool piece, durante tutto il transitorio incidentale (Figura 42 e Figura 43).

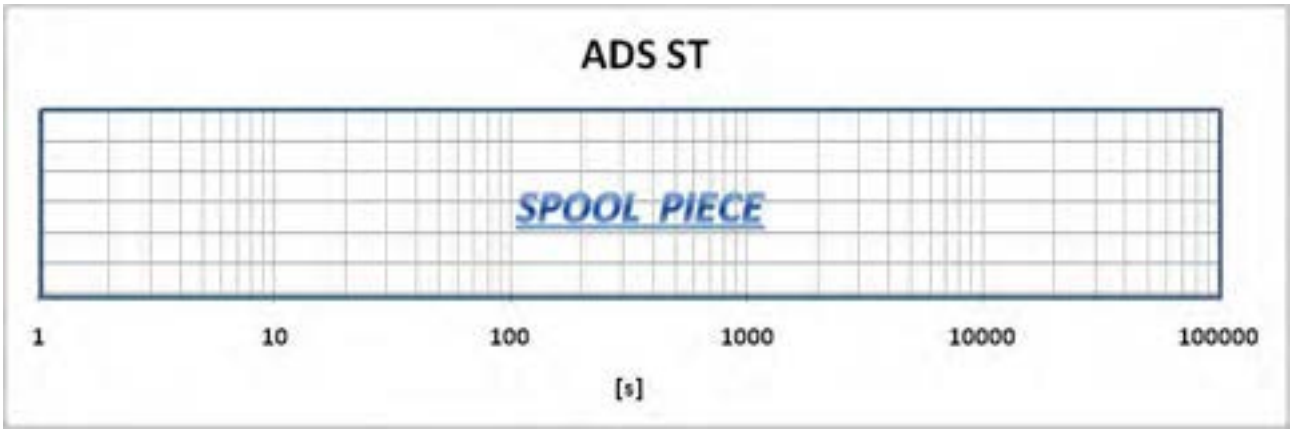


Figura 42: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea dell'ADS ST

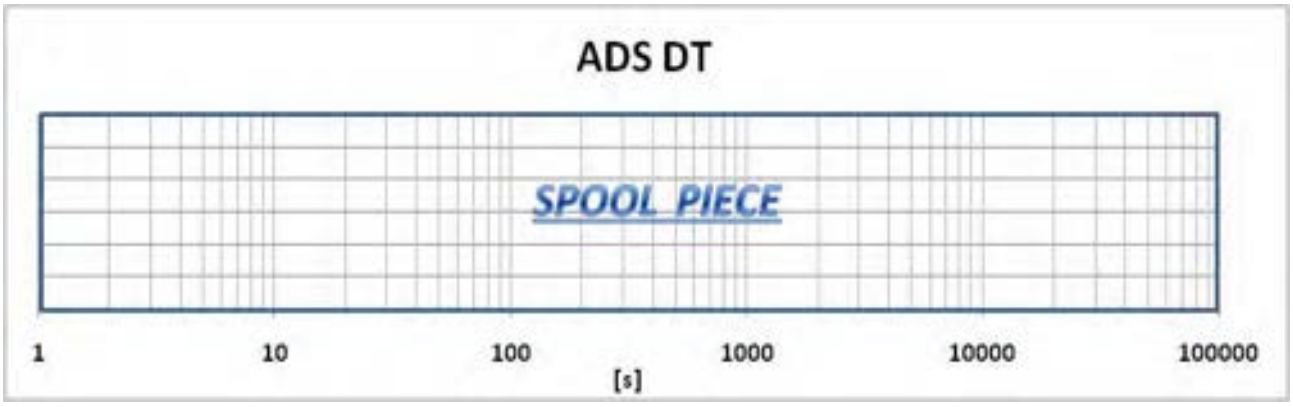


Figura 43: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea dell'ADS DT

- La linea SPLIT del DVI (Direct Vessel Injection), per i primi 200 secondi di transitorio, a monte della valvola, è interessata da un flusso monofase liquido, pertanto la portata può essere misurata con un venturi per liquidi. Dopo i primi 200 secondi di transitorio, le velocità a valle rientrano nel range misurabili con il vortex e quindi con lo spool piece.

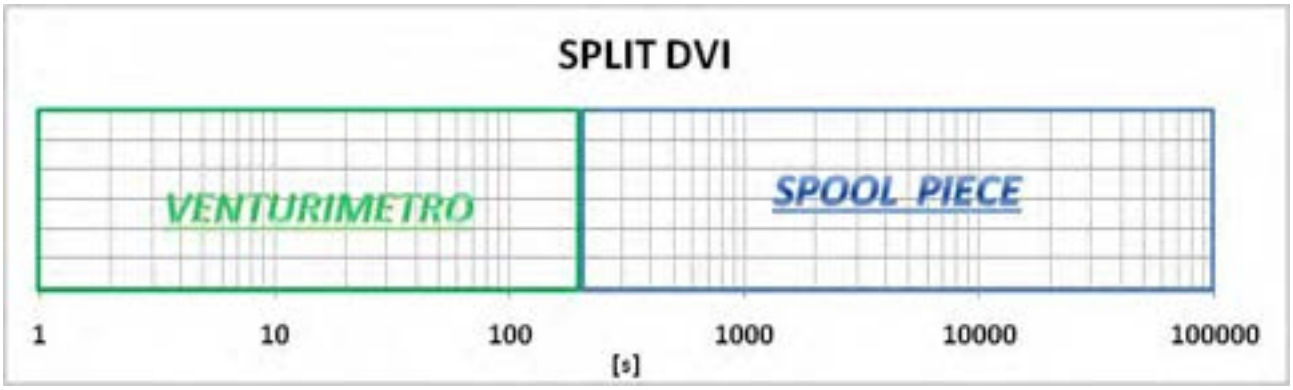


Figura 44: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea SPLIT del DVI

- Nella linea SPLIT del EBT , per i primi 90 secondi di transitorio, il flusso è monofase liquido e pertanto può essere utilizzato il venturimetro. Per i successivi 210 secondi il flusso è bifase e le velocità sono troppo alte per essere misurate con il vortex per cui la misura della portata sarà effettuata combinando i segnali di due soli strumenti. Dopo i primi 300 secondi di transitorio, le basse velocità a valle della valvola ci consentono di utilizzare lo spool piece.

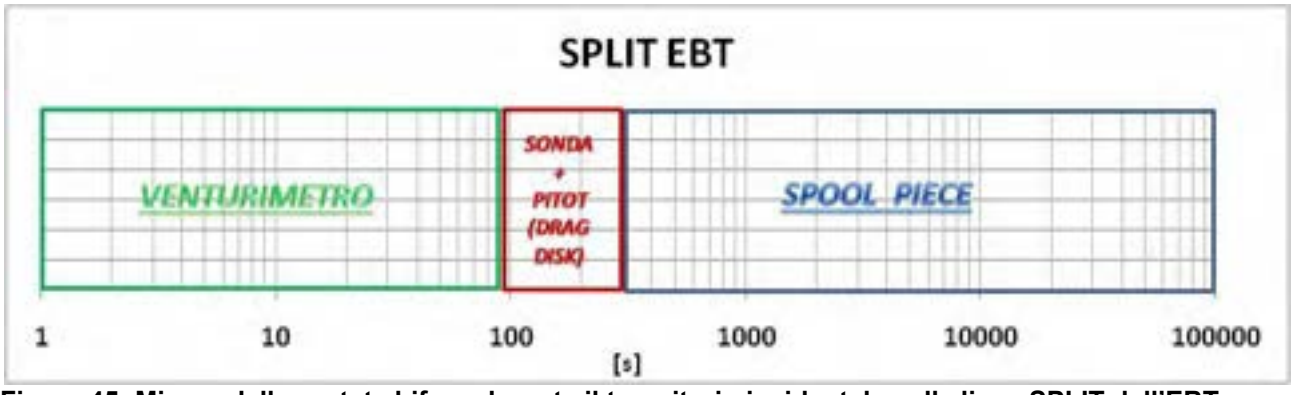


Figura 45: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea SPLIT dell'EBT

- Nella linea SPLIT dell'ADS, nei primi 20 secondi, il flusso a monte della valvola è monofase vapore per cui può essere utilizzato il venturi per vapore. Per i successivi 90 secondi il flusso è bifase per cui la misura di portata bifase sarà effettuata combinando i segnali di soli due strumenti. Dopo 110 secondi di transitorio potrà essere utilizzato lo spool piece.

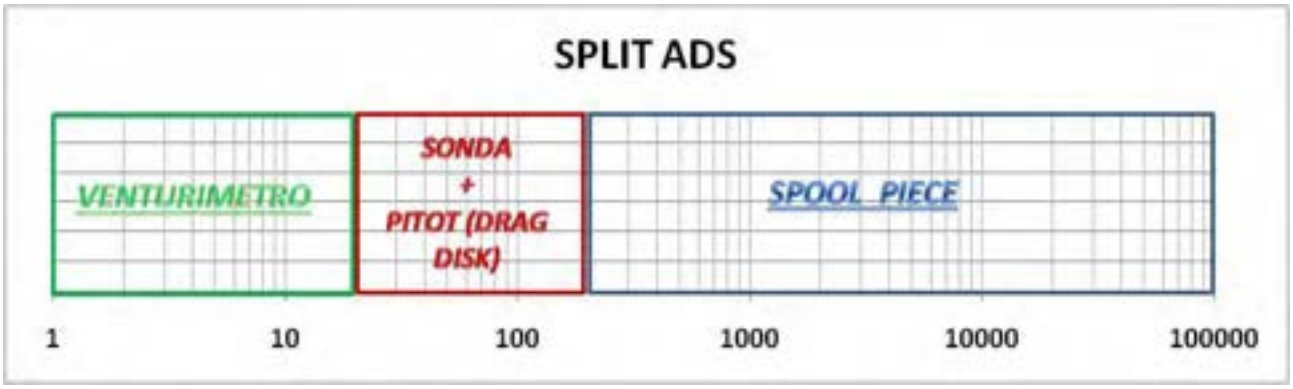


Figura 46: Misura della portata bifase durante il transitorio incidentale nella linea SPLIT dell'ADS

Nelle Tabelle 18, 19 e 20 è riportato il dimensionamento dei venturi per liquido e vapore da installare rispettivamente sulla linea SPLIT di DVI, EBT e ADS di SPES-3.
Il dimensionamento è stato svolto in accordo alla norma UNI EN ISO 5167 per il dimensionamento dei misuratori di portata mediante dispositivi a pressione differenziale.

Venturimetro per liquido (linea SPLIT del DVI)			
input		output	
fluido	acqua	Δp [kPa]	100
portata massima [kg/s]	1.33	β	0.8
pressione [bar]	156.4	diametro gola [mm]	11.04
temperatura [°C]	345		
diametro [mm]	13.8		

Tabella 18: dimensionamento venturimetro linea SPLIT del DVI

Venturimetro per liquido (linea SPLIT del EBT)			
input		output	
fluido	acqua	Δp [kPa]	170
portata massima [kg/s]	4.67	β	0.87
pressione [bar]	155.2	diametro gola [mm]	16.44
temperatura [°C]	345		
diametro [mm]	18.9		

Tabella 19:dimensionamento venturimetro linea SPLIT del EBT

Venturimetro per vapore (linea SPLIT del ADS)			
input		output	
fluido	vapore	Δp [kPa]	150
portata massima [kg/s]	4.51	β	0.76
pressione [bar]	155	diametro gola [mm]	28.96
temperatura [°C]	344		
diametro [mm]	38.1		

Tabella 20: dimensionamento venturimetro linea SPLIT del ADS

11. Calcolo dell'incertezza degli strumenti dello Spool Piece

In questo capitolo saranno valutate singolarmente le incertezze di ogni misura effettuata con ogni singolo strumento compreso nello spool piece per poter giungere nel capitolo successivo ad ottenere una valutazione dell'incertezza globale.

11.1 Vortex

Il vortex è l'unico strumento commerciale tra gli strumenti facenti parte dello spool piece.
L'errore massimo dello strumento dichiarato dal costruttore è pari a:

- 1% del valore istantaneo di velocità per velocità inferiori a 75 m/s
- 0.75 % del fondo scala del vortex per velocità comprese tra 75 e 120 m/s

Ipotizzando una distribuzione di probabilità di tipo rettangolare, l'incertezza estesa associata alla misura di velocità della fase vapore, con il vortex,è pari a:

$$u(V) = 2\sqrt{\left(\frac{E_{strum}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{E_{max}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

In cui il termine 2 rappresenta il fattore di copertura che corrisponde ad un intervallo di fiducia del 95%.
E_{strum} è pari all'1% del valore di velocità misurata oppure a 0.9 m/s a seconda che la velocità misurata sia rispettivamente minore o maggiore di 75 m/s.

E_{max} invece, rappresenta la deviazione massima tra la velocità misurata con il vortex e quella teorica (Figura 5) pari al 5% del valore misurato.

11.2 Sonda capacitiva

Come è stato messo in evidenza precedentemente, il contributo di errore che pesa maggiormente sul calcolo del grado di vuoto è legato alla deriva del segnale elettrico rispetto alle variazioni di temperatura.
Per stimare l'incertezza sulla misura di grado di vuoto effettuata con la sonda capacitiva è necessario calcolare l'effetto che la deriva del segnale elettrico registrato dagli elettrodi ha sul calcolo del grado di vuoto.

La deriva del segnale elettrico associata ad una variazione di circa 20°C della elettronica, genera variazioni di segnale elettrico dell'ordine di circa 0.01 V.
Ora, per calcolare l'effetto che tale deriva elettrica ha sul calcolo di grado di vuoto, applichiamo tale perturbazione ai segnali registrati dagli elettrodi durante una giornata di prova e, attraverso il modello interpretativo della sonda, calcoliamo i valori di grado di vuoto corrispondenti.
La Tabella 21 mostra l'effetto della temperatura sulla variazione del valore di grado di vuoto sui test del 3 luglio.

test	α	α teorico	α +Δα	Δα
47	1.032	0.980	0.877	0.155
48	1.000	0.983	0.829	0.172
49	0.993	0.978	0.821	0.172
50	1.005	0.987	0.834	0.171
51	1.011	0.991	0.840	0.171
52	1.001	0.984	0.829	0.171
53	0.999	0.990	0.827	0.171

test	α	α teorico	α +Δα	Δα
54	0.976	0.995	0.805	0.172
55	0.961	0.982	0.789	0.172
56	1.006	0.994	0.835	0.171
57	0.981	0.986	0.810	0.172
58	0.966	0.990	0.794	0.172
59	0.999	0.989	0.828	0.171
60	0.978	0.983	0.806	0.172
61	0.962	0.977	0.790	0.172
62	1.004	0.979	0.832	0.171
63	0.981	0.993	0.810	0.172
64	0.968	0.990	0.796	0.172
65	1.005	0.988	0.834	0.171
66	0.977	0.985	0.805	0.172
67	0.963	0.982	0.792	0.172
				0.172

Tabella 21: Effetto della temperatura sulla misura di grado di vuoto

L'errore massimo in termini di grado di vuoto è pari a 0.172.

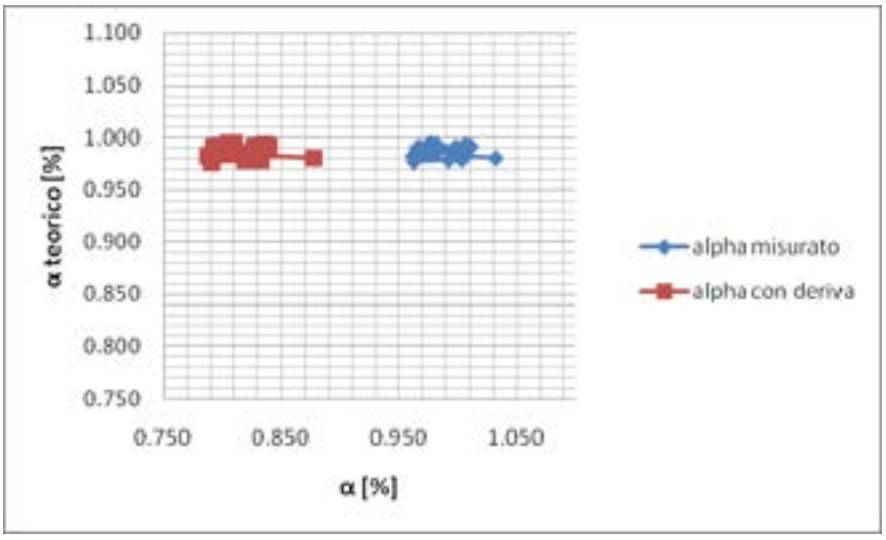


Figura 47: Effetto della temperatura sulla misura del grado di vuoto

L'incertezza estesa associata alla misura di grado di vuoto, considerando una distribuzione di probabilità di tipo rettangolare, è pari a:

$$u(\alpha) = 2\sqrt{\left(\frac{E_T}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{E_{max}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

In cui E_{max} rappresenta la deviazione massima tra il grado di vuoto misurato con la sonda capacitiva e quella teorica (Figura 3).

11.3 Misuratori di flusso di quantità di moto

Per la misura di flusso di quantità di moto sono stati utilizzati due sistemi distinti: un sistema tipo "drag disk" e un tubo di Pitot.

La misura effettuata con il drag disk è affetta da errore dovuto a:

1) Errore di misura della cella di carico.
   L'errore di misura della cella di carico può essere espresso come la somma di tre componenti, quantificate dal costruttore:
- Un errore di "non linearità" $F_{lin} = 0.02\% \cdot 20\ kg = 4 \cdot 10^{-3} kg$
- Un errore di "isteresi" $F_u = 0.015\% \cdot 20\ kg = 3 \cdot 10^{-3} kg$
- Un errore di "ripetibilità" $F_v = 0.01\% \cdot 20\ kg = 2 \cdot 10^{-3} kg$

2) Errore dovuto al carico apparente legato alla pressione statica.
   L'influenza della pressione statica sulla misura con il drag disk è stata quantificata durante le prove di caratterizzazione del dispositivo.
   La Figura 48 mostra l'andamento del carico apparente in funzione della pressione statica nel condotto.

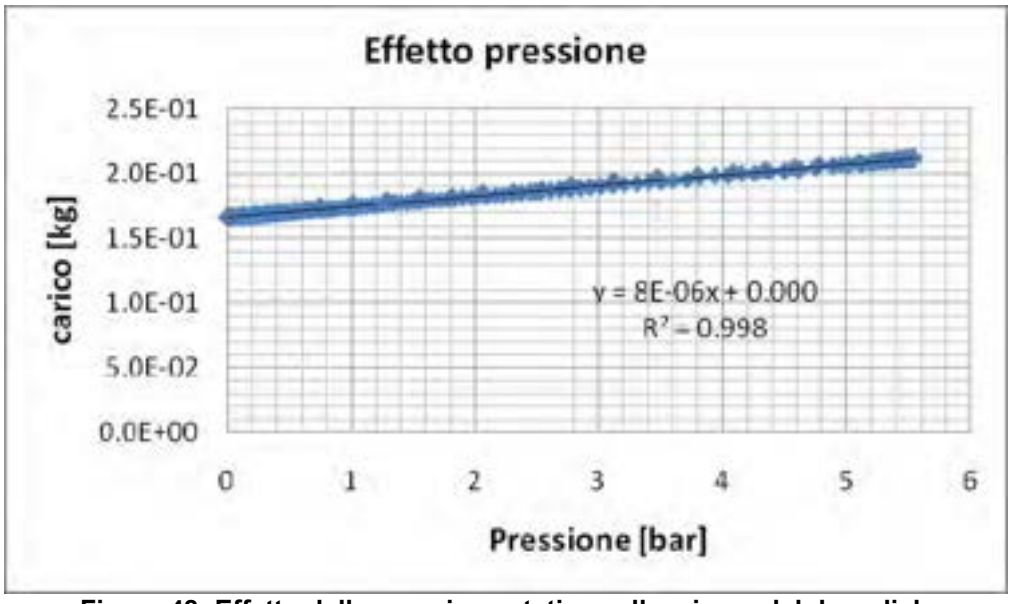


Figura 48: Effetto della pressione statica sulla misura del drag disk

3) Errore dovuto ad effetti di tipo geometrico.
   Sia per il drag disk che per il Pitot è senza dubbio il contributo che pesa maggiormente.
   Il Flusso di quantità di moto medio di sezione, considerando per semplicità una distribuzione di densità e di velocità bidimensionale all'interno del condotto, è matematicamente definito come:

$$\frac{1}{D}\int_0^D \rho(x)V^2(x)dx$$

   L'errore è dovuto al fatto che entrambi gli strumenti non occupano tutta l'area del condotto ma, nel caso del drag disk, una porzione di sezione circolare e, nel caso del tubo di Pitot, si approssima l'area del condotto con l'area di tre fori. Pertanto l'integrale non viene calcolato su tutta l'area del

condotto, di 80 mm di diametro ma, nel caso del drag disk in una area di 46 mm di diametro e, nel caso del tubo di Pitot su tre fori di 2.5 mm di diametro.

Per quantificare l'errore commesso dai nostri strumenti possiamo considerare diverse coppie di distribuzioni di densità-velocità caratterizzate dalla stessa densità-velocità media, per ciascuna di esse calcolarne il flusso di quantità di moto medio corrispondente e, dopo aver calcolato l'integrale del flusso della quantità di moto nelle aree di pertinenza dei due strumenti, calcolarne la deviazione rispetto al valore teorico.

Sono stati considerati 5 distribuzioni di velocità (rettangolare, triangolare, trapezoidale, parabolico e parabolico non nullo ai bordi) caratterizzate da velocità media di 30 m/s (Figura 49) e 5 distruzioni di densità caratterizzate da un valor medio di 9 kg/m^3 (Figura 50). Ogni coppia corrispondente di distribuzioni di velocità e densità è stata utilizzata per calcolare la distribuzione del flusso di quantità di moto.

Queste distribuzioni sono eccessivamente distorte per flussi che usualmente avvengono in tubi rettilinei lontano da fonti di perturbazione del moto, nel nostro caso sono invece abbastanza realistiche perché lo spool piece è collocato a valle dell'orifizio che espelle il fluido bifase ad alta velocità.

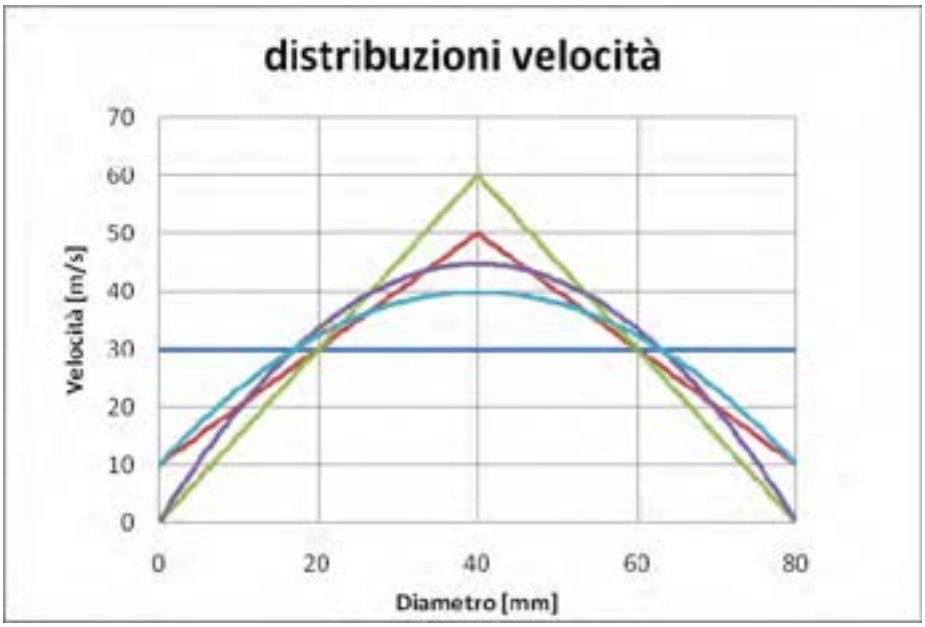


Figura 49: profili di velocità

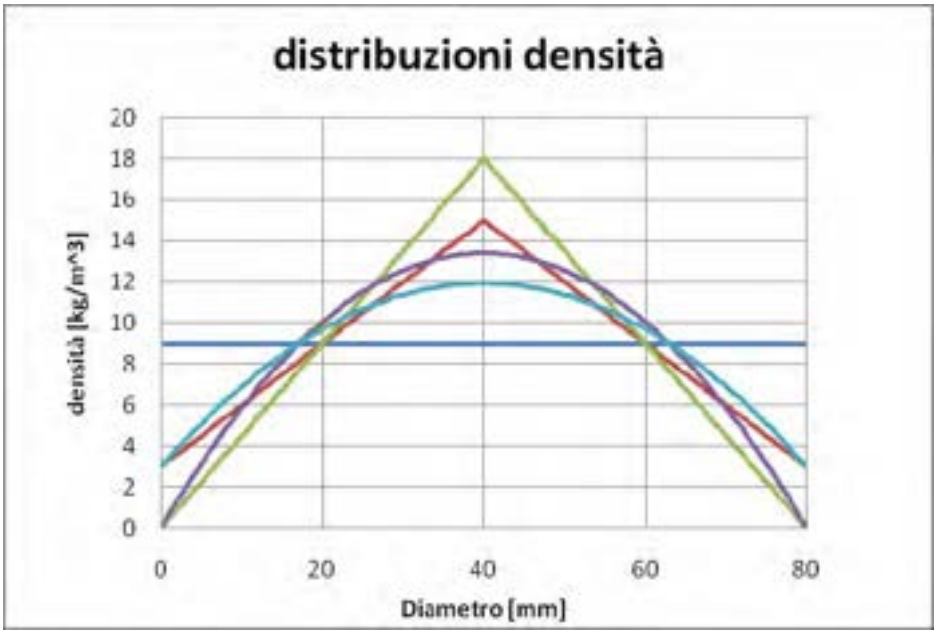


Figura 50: profili di densità

In Figura 51 sono mostrati i profili di flusso di quantità di moto risultanti.

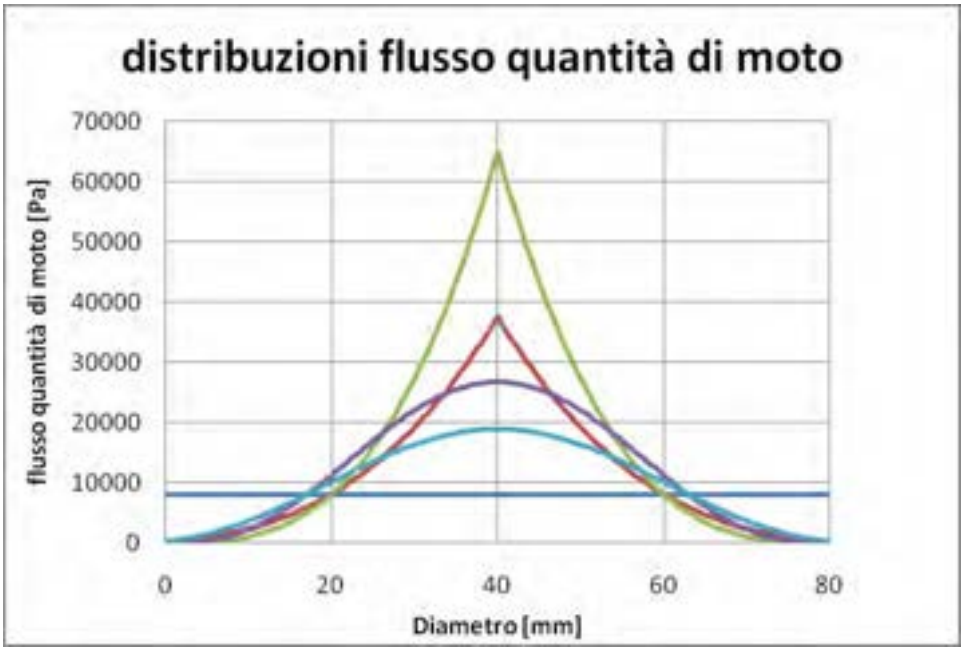


Figura 51: distribuzioni di flusso di quantità di moto

A seconda del profilo considerato l'errore commesso dal drag disk e dal Pitot varia sensibilmente (Tabella 22).

distribuzione	M teorico	drag disk con d=46	Pitot	errore drag disk	errore Pitot
M.U.	Pa	Pa	Pa	%	%
rettangolare	8100	8100	8100	0	0
trapezoidale	11630	18789	17290	62	49
triangolare	16102	27503	25692	71	60
parabolico	12137	19623	16409	62	35
parabolico non nullo ai bordi	9897	14925	13035	51	32

Tabella 22: errore di misura a seconda dei profili di flusso di quantità di moto

Il profilo più "realistico" è quello parabolico con valore non nullo ai bordi. Pertanto come errore dello strumento prenderemo il valore corrispondente a tale profilo.
L'incertezza associata alla misura effettuata con i due strumenti può tranquillamente essere calcolata considerando il solo contributo di errore dovuto alla geometria, trascurando gli altri due contributi essendo almeno di due ordini di grandezza inferiori.

L'incertezza tipo associata alla misura di flusso di quantità di moto è pari a:

$$u(M) = 2\sqrt{\left(\frac{E_{geom} \cdot M}{\sqrt{3} \cdot 100}\right)^2 + \left(\frac{E_{max}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

In cui:

E_{max} : rappresenta la deviazione massima tra il flusso di quantità di moto misurato con il Pitot (drag disk) e quella teorico (Figura 4).

E_{geom} : rappresenta l'errore dovuto alla geometria del sensore

11.4 Venturi

La portata misurata dal venturimetro è pari a:

$$F = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2\rho\Delta p}$$

In cui:

α : coefficiente di efflusso

ε : coefficiente di comprimibilità (uguale a 1 per il liquido)

ρ :densità

d : diametro della gola

Δp : differenza di pressione tra monte e valle della gola

L'incertezza estesa sulla misura di portata è data dalla relazione:

$$U(F) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial d}\right)^2 u^2(d) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta p}\right)^2 u^2(\Delta p) + \left(\frac{\partial F}{\partial \rho}\right)^2 u^2(\rho)}$$

In cui:

$u(d) = 0.03\ mm$, l'incertezza tipo associata alla misurazione di lunghezza longitudinale di un orifizio di diametro dell'ordine di 10-20 mm

$u(\Delta p) = 0.35$ kPa, l'incertezza tipo di un trasmettitore differenziale di pressione con fondo scala 100-200 kPa

$$u(\rho) = \sqrt{[\rho(T + u(T), p) - \rho(T - u(T), p)]^2 + [\rho(T, p + u(p)) - \rho(t, p - u(p))]^2 + \left[\frac{E(sub) \cdot \rho}{\sqrt{3}}\right]^2}$$

In cui:

l'incertezza sulla misura di pressione relativa, $u(p) = 1\%\ fondo\ scala \cong 1.5\ bar$.

l'incertezza sulla misura di temperatura tramite termocoppia tipo k, $u(T) = \frac{1.5°C}{\sqrt{3}} \cong 0.87°C$,

l'errore E(sub) commesso dalla subroutine per il calcolo della densità è pari a:

0.19 % per la subroutine vsrx(t,p) per il calcolo della densità del liquido

0.07% per la subroutine vgsx(t,p) per il calcolo della densità del vapore

La variazione di coefficiente di efflusso e di comprimibilità possono essere considerati trascurabili rispetto agli altri termini di incertezza.

L'incertezza estesa associata al venturi, con le ipotesi sopra esposte, risulta pari a $\pm 0.02\ kg/s$ corrispondente a circa lo 0.5 – 1 % del fondo scala.

12. Calcolo dell'incertezza sulla misura di portata con lo spool piece

La portata massica bifase viene calcolata a partire dalle misure di grado di vuoto, flusso di quantità moto, velocità della fase vapore, temperatura e pressione della miscela, nella sezione di prova, attraverso il modello matematico descritto nel Capitolo 5.

$$\dot{m} = f(\alpha, M, V_V, T, p)$$

Pertanto l'incertezza estesa sulla misura di porta massica bifase sarà data dall'equazione:

$$U(\dot{m}) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \alpha}\right)^2 u^2(\alpha) + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial M}\right)^2 u^2(M) + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial V_V}\right)^2 u^2(V_V) + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial T}\right)^2 u^2(T) + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial p}\right)^2 u^2(p)}$$

Le incertezze relative alle misure di temperatura e pressione nella sezione di prova sono sicuramente molto inferiori a quelle relative alle altre misure dello spool piece pertanto i termini $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial T}\right)^2 u^2(T)$ e $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial p}\right)^2 u^2(p)$ possono essere trascurati.

I termini di incertezza legati alla misura di grado di vuoto, velocità della fase vapore e flusso di quantità di moto sono stati calcolati nel capitolo precedente.

Il calcolo dell'incertezza sulla portata teoricamente richiederebbe il calcolo analitico delle derivate parziali della portata massica rispetto al grado di vuoto, al flusso di quantità di moto e alla velocità della fase vapore e potrebbe essere ricavata solo per i valori portata dei test condotti nel corso delle prove del PAR2012 dei quali conosciamo i valori di tutte le grandezze termoidrauliche.

Per ottenere i valore di incertezza in tutti i punti della matrice sperimentale di SPES-3 (Tabella 12: Massimi e Minimi valori delle grandezze termoidrauliche) si può procedere seguendo un approccio differente di tipo numerico:

1) Si definisce un punto entro la matrice tridimensionale (portata-pressione-titolo) di SPES-3.

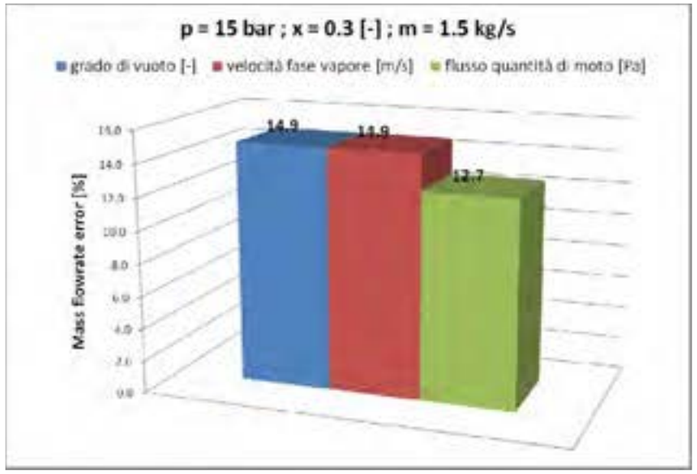
2) Si calcola, attraverso il modello teorico, i valori di grado di vuoto, flusso di quantità di moto e velocità della fase vapore corrispondenti ai tre valori di portata, titolo e pressione considerati.

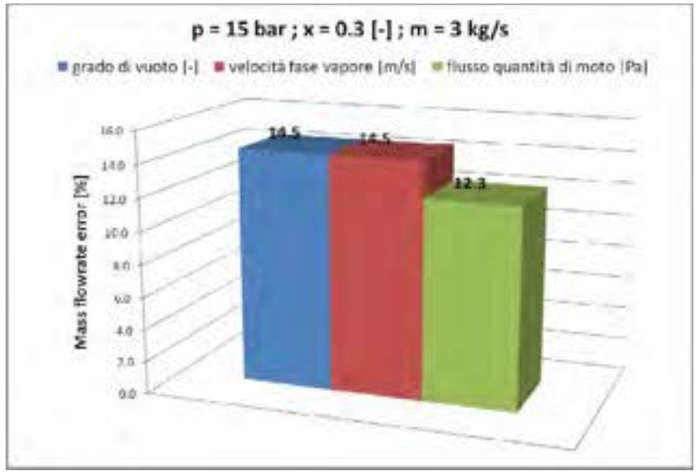
3) Si perturba ciascun parametro di un errore percentuale sulla base della deviazione del valore misurato dagli strumenti dello spool piece registrato rispetto al valore teorico.

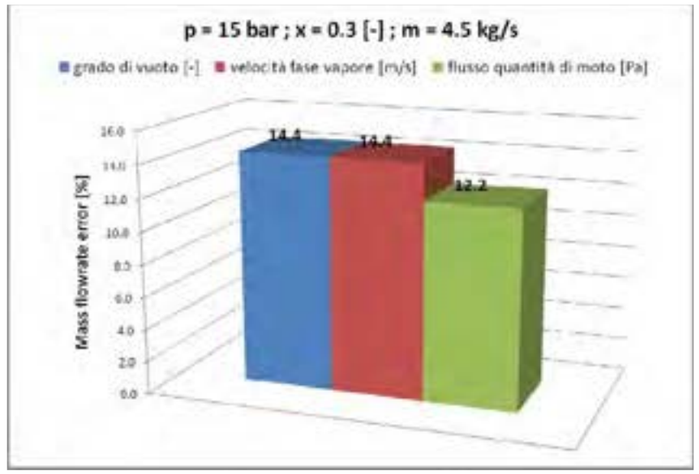
4) Si calcola l'effetto dell'introduzione dell'errore su ciascun parametro sulla portata massica utilizzando il modello matematico utilizzato durante la campagna per calcolare la portata a partire dalle misure degli strumenti dello spool piece.

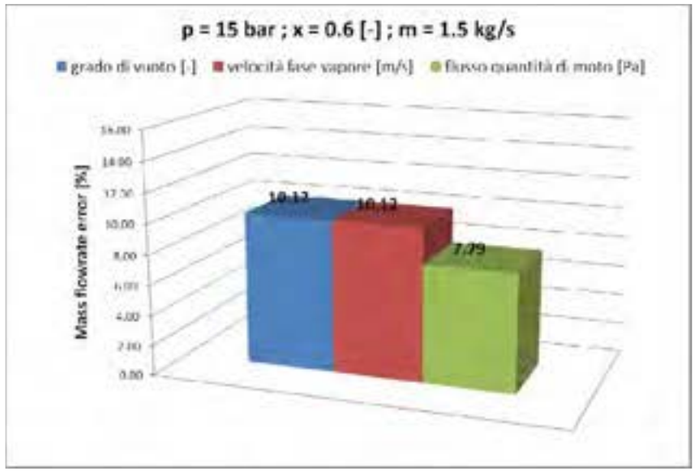
Ciascuno dei grafici seguenti riporta, per una terna di valori pressione-titolo-portata appartenente alla matrice sperimentale di prove di SPES-3, l'errore percentuale commesso sul calcolo della portata massica, ipotizzando di applicare un errore del 5% sulle misure di grado di vuoto, flusso di quantità di moto e velocità.

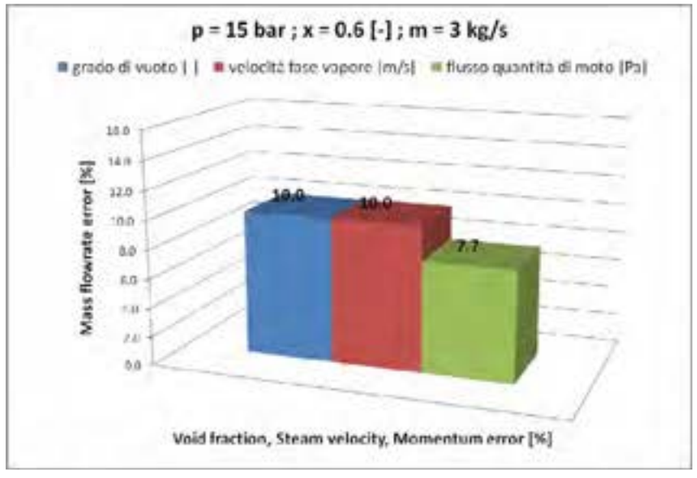
L'errore del 5% rappresenta la deviazione media tra le misure effettuate con gli strumenti dello spool piece ed i loro valori teorici.

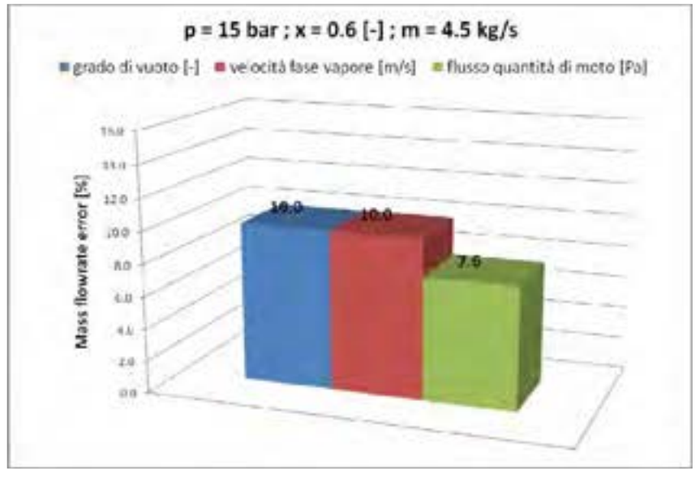

p = 15 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
14.9
14.9
12.7

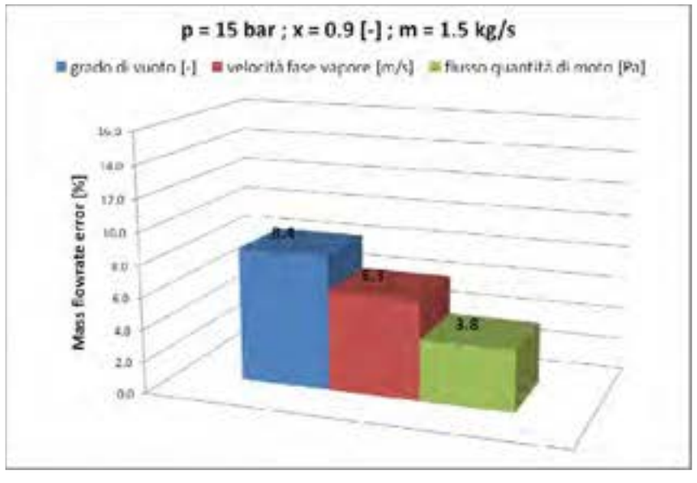

p = 15 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
14.5
14.5
12.3

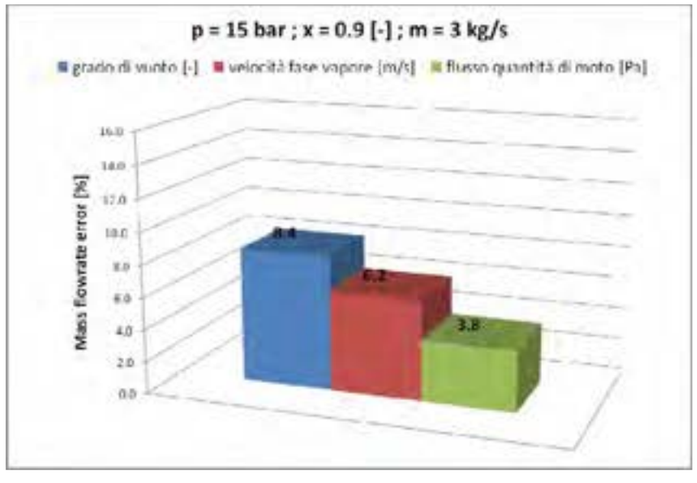

p = 15 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
14.4
14.4
12.2

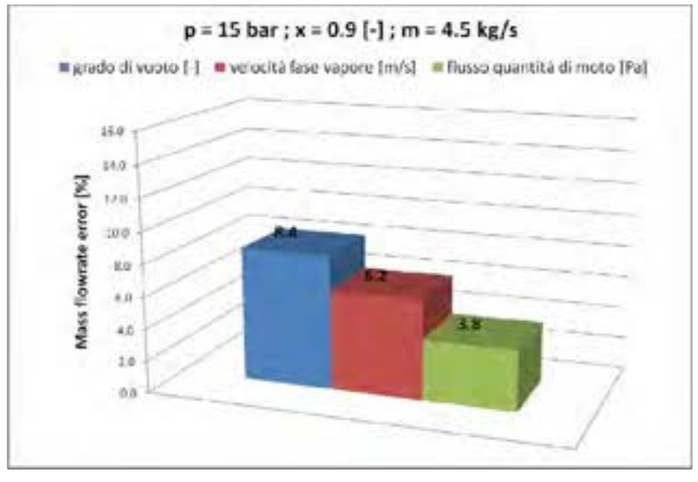

p = 15 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
10.13
10.13
7.79

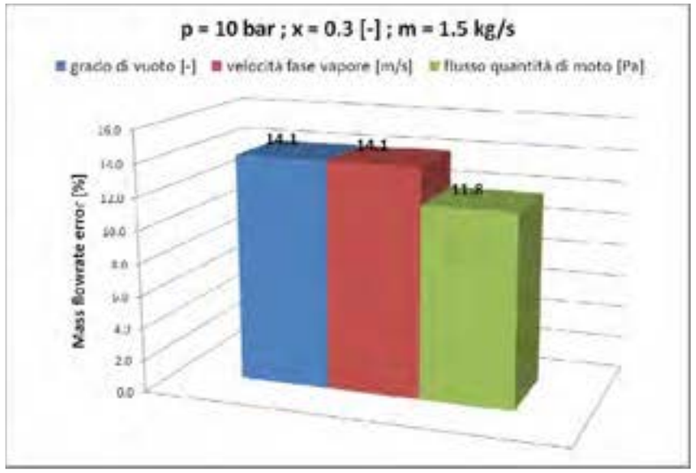

p = 15 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
10.0
10.0
7.7
Void fraction, Steam velocity, Momentum error [%]

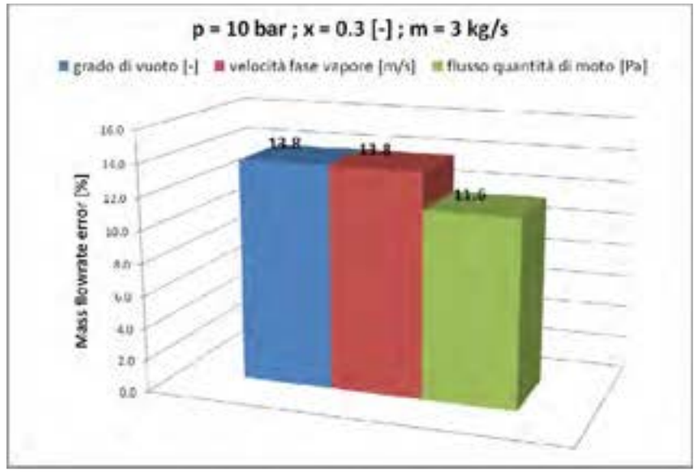

p = 15 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
10.0
10.0
7.6

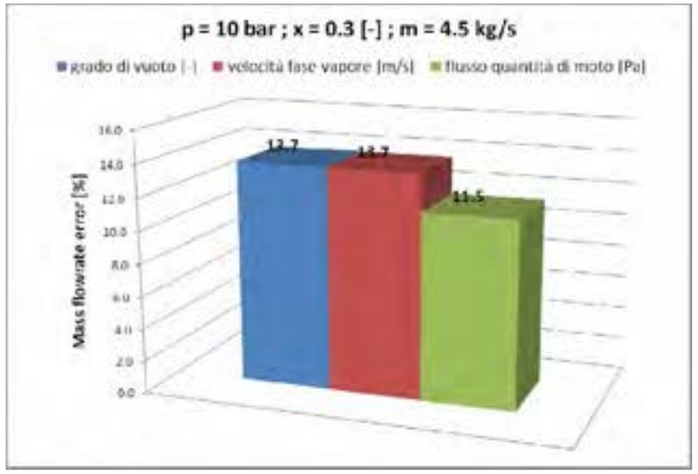

p = 15 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.4
6.2
3.8

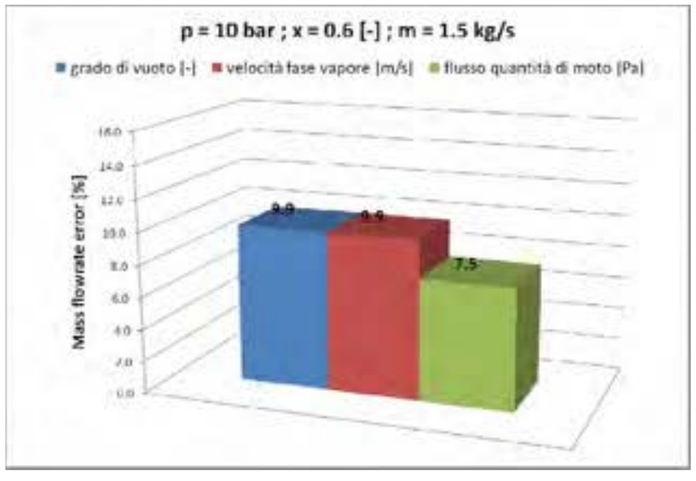

p = 15 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.4
6.2
3.8

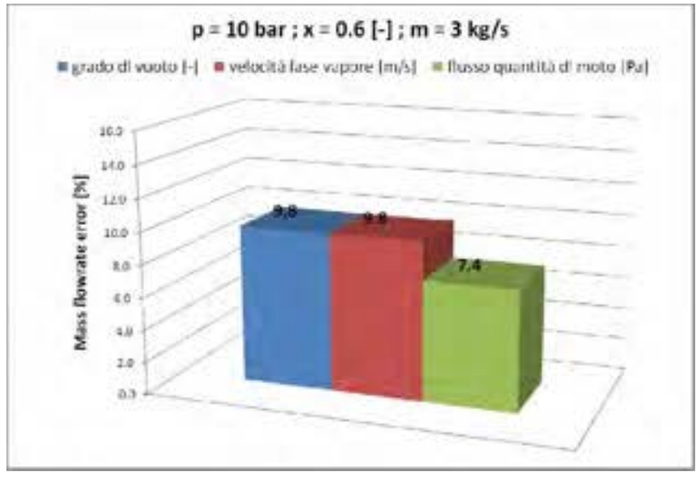

p = 15 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.4
6.2
3.8

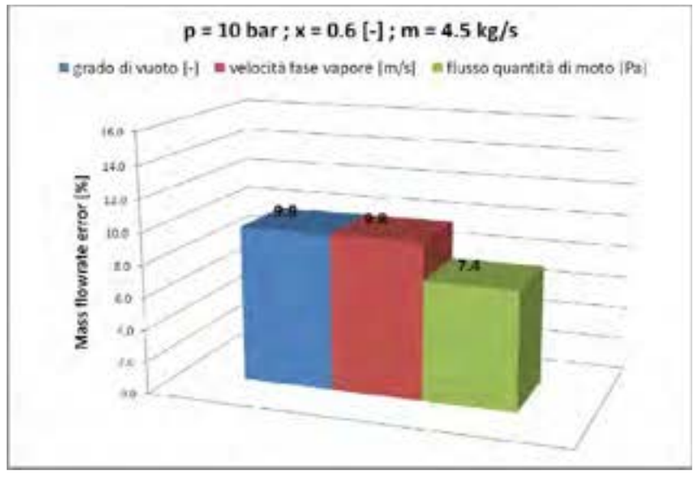

p = 10 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
14.1
14.1
11.8

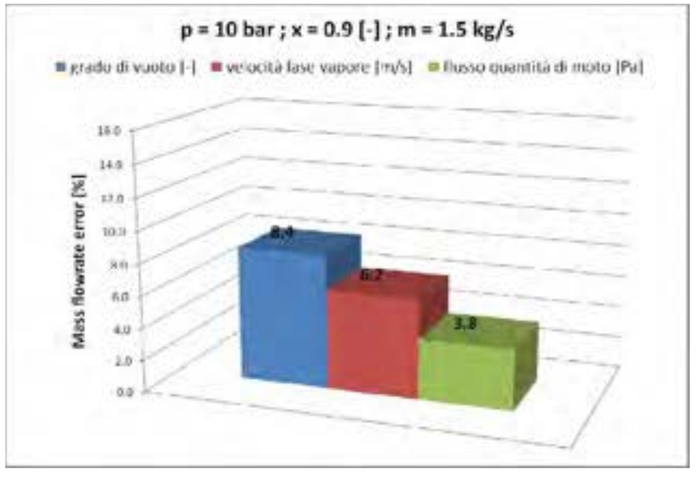

p = 10 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
13.8
13.8
11.6

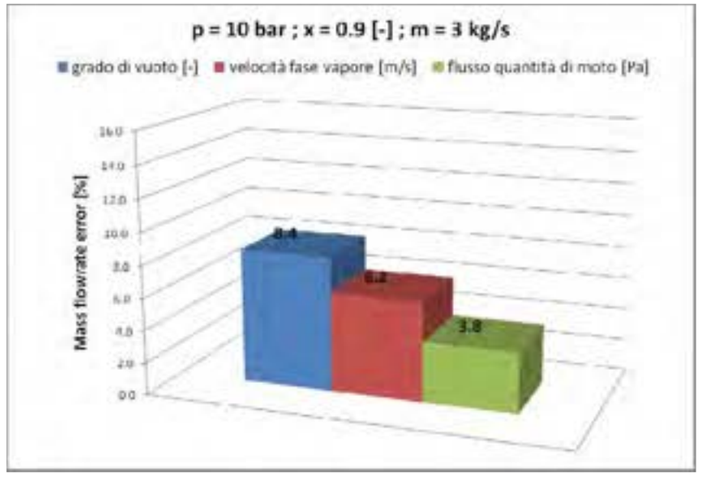

p = 10 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
12.7
12.7
11.5

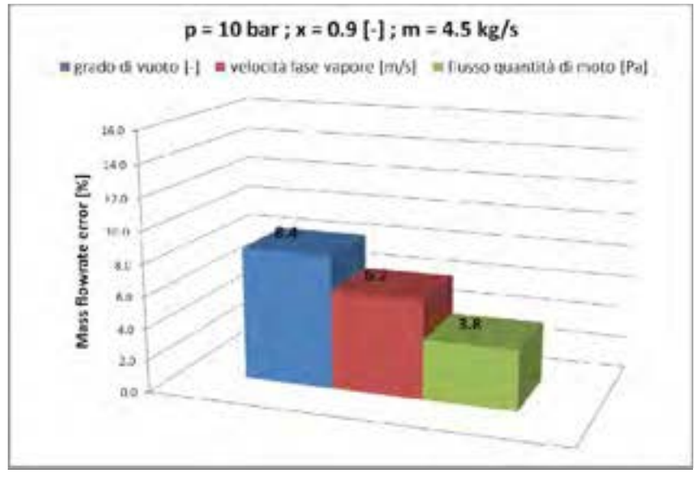

p = 10 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
9.0
8.9
7.5

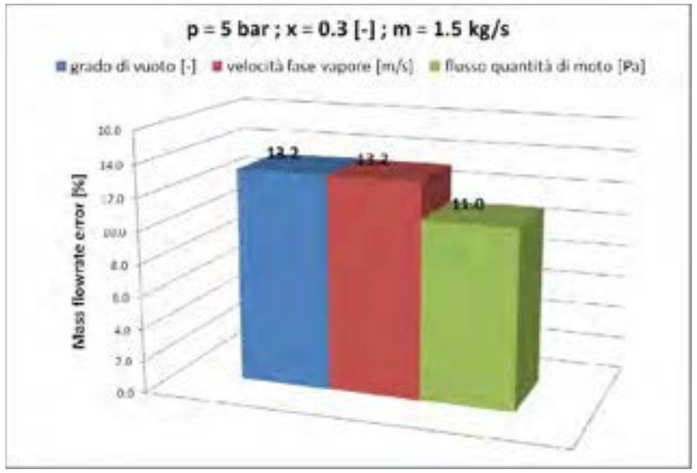

p = 10 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
9.0
8.9
7.4

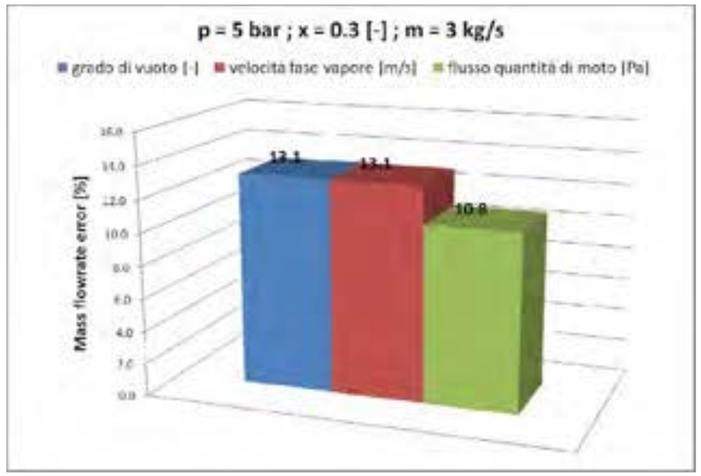

p = 10 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
9.0
8.9
7.4

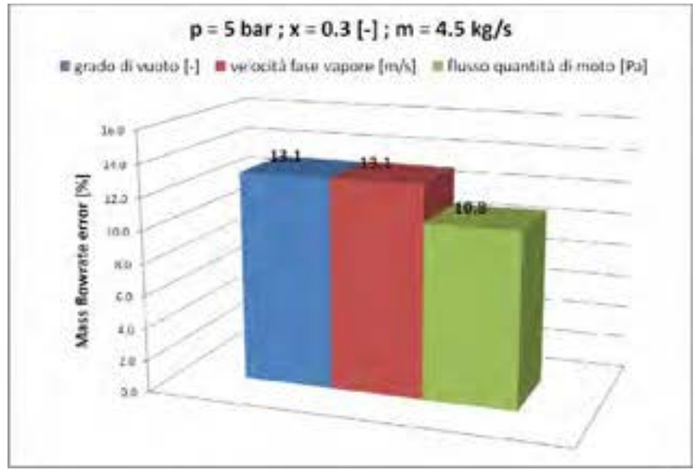

p = 10 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.4
6.2
3.8

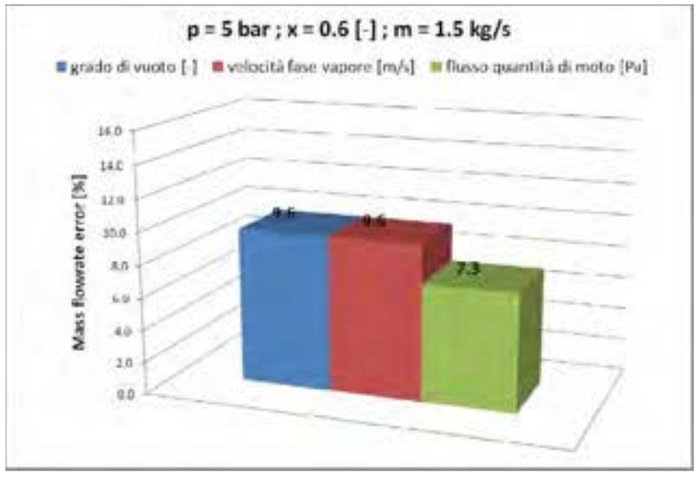

p = 10 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.4
6.2
3.8

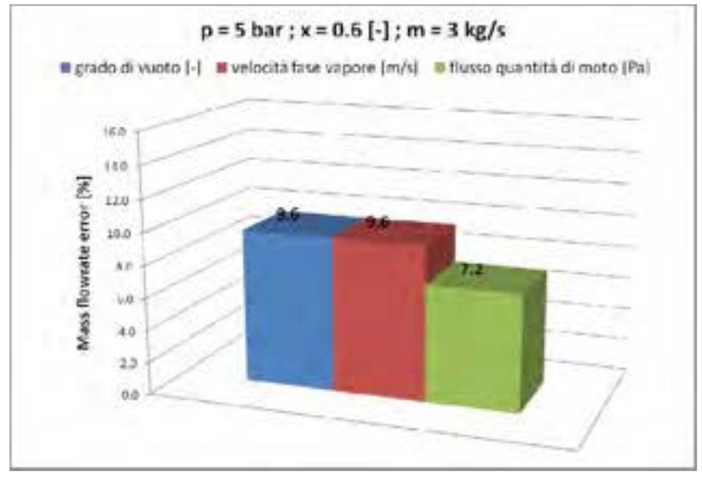

p = 10 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.4
6.2
3.8

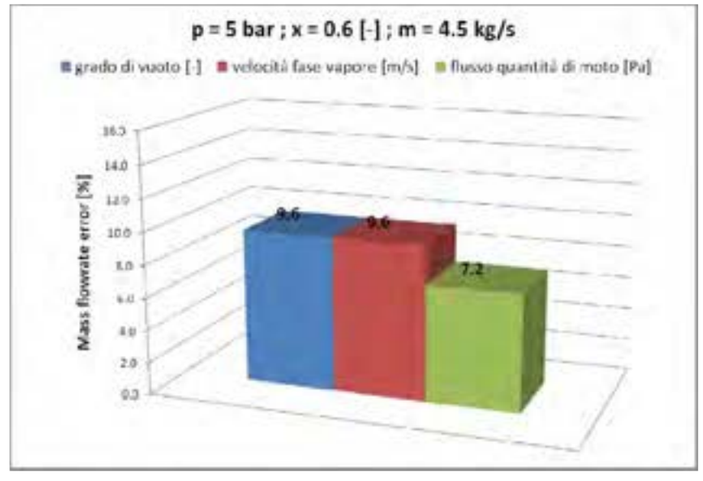

p = 5 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
12.2
12.2
11.0

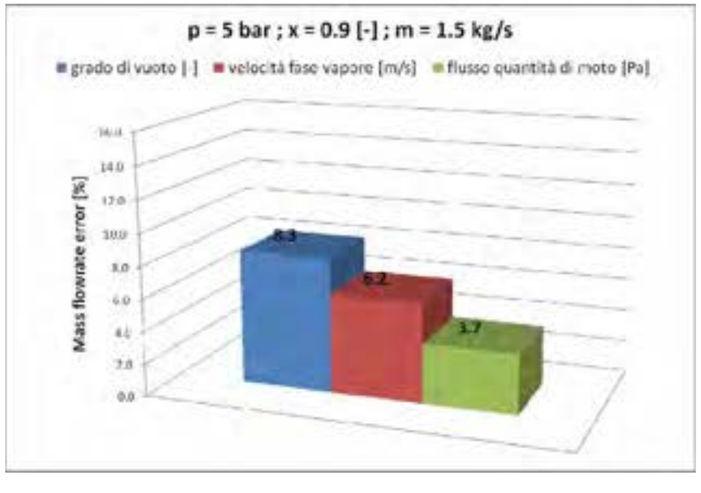

p = 5 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
12.1
12.1
10.8

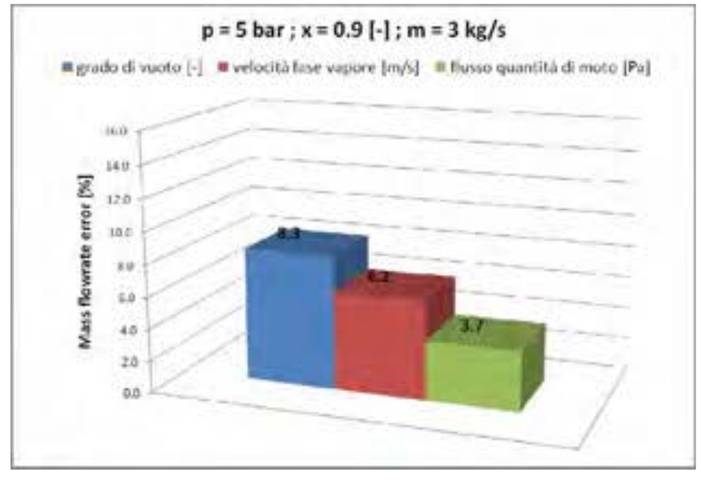

p = 5 bar ; x = 0.3 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
12.1
12.1
10.8

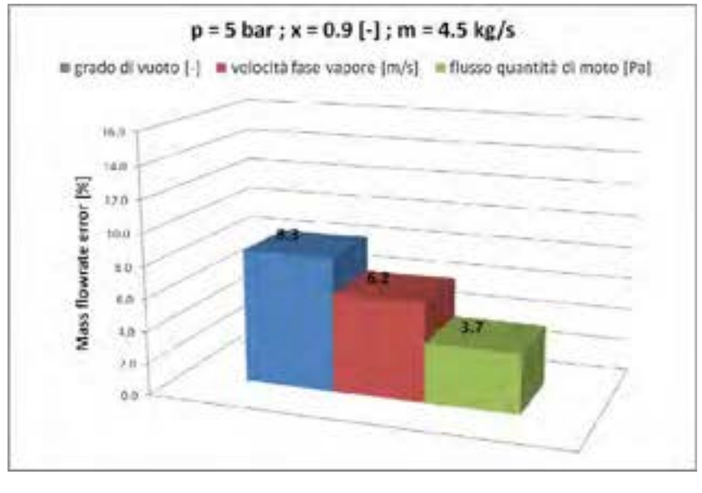

p = 5 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [ ]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
9.6
9.6
7.3

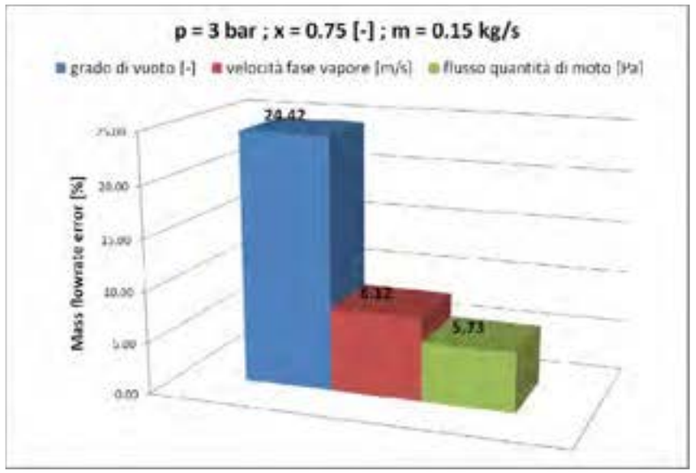

p = 5 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
9.6
9.6
7.2

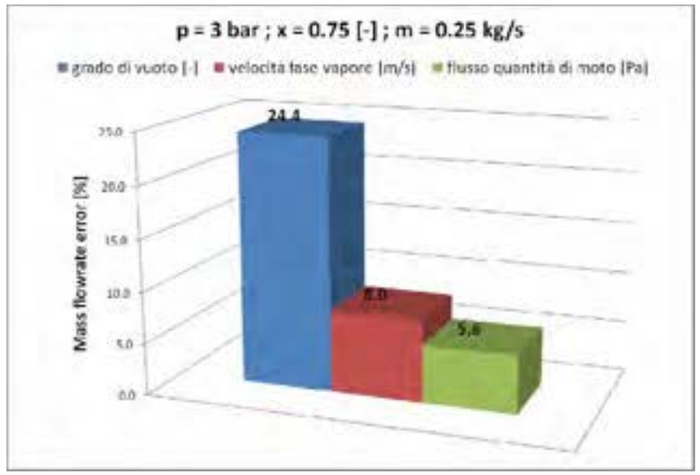

p = 5 bar ; x = 0.6 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
9.6
9.6
7.2

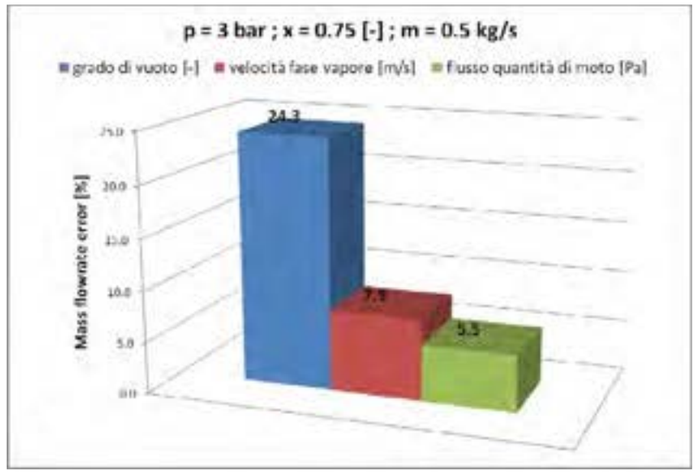

p = 5 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [ ]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.3
6.2
3.7

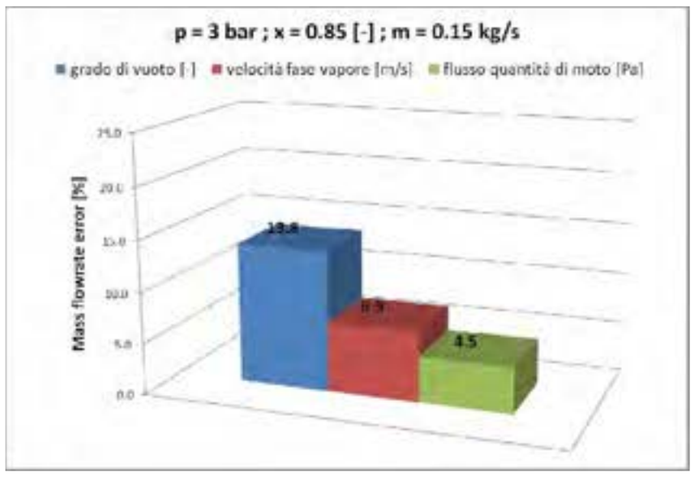

p = 5 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 3 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.3
6.2
3.7

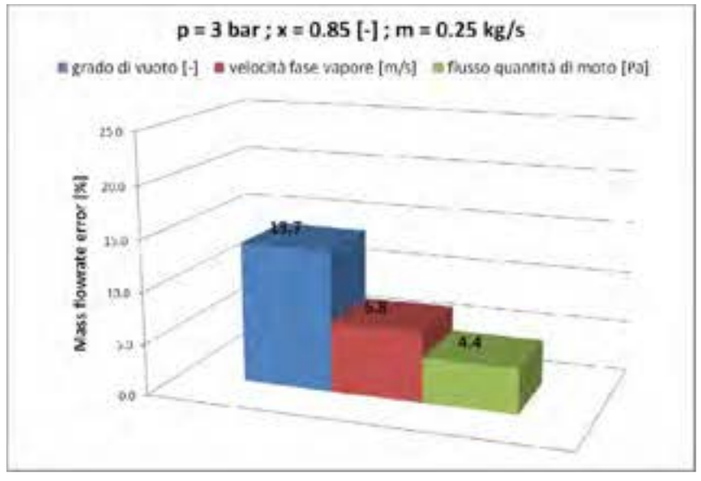

p = 5 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 4.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.3
6.2
3.7

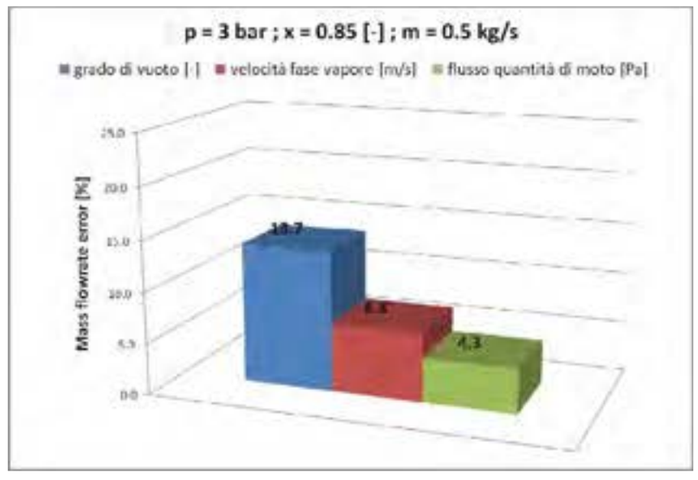

p = 3 bar ; x = 0.75 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
24.42
6.12
5.73

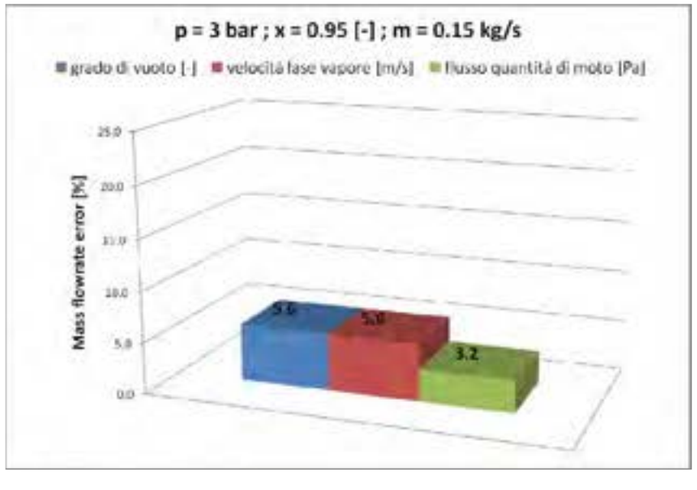

p = 3 bar ; x = 0.75 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
24.4
6.0
5.6

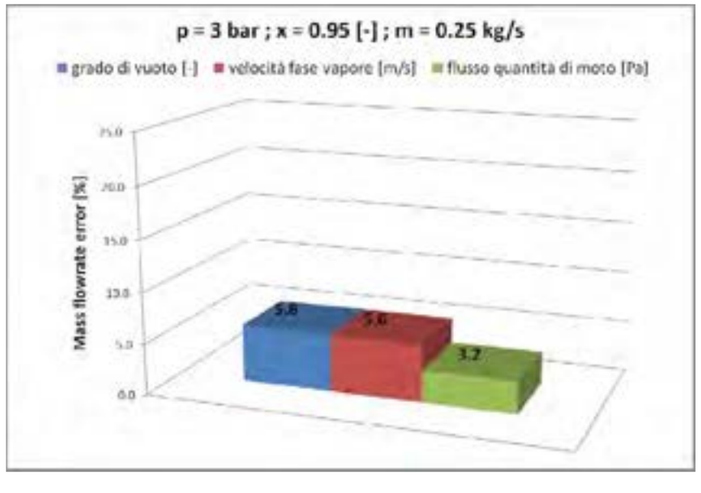

p = 3 bar ; x = 0.75 [-] ; m = 0.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
24.3
7.9
5.5

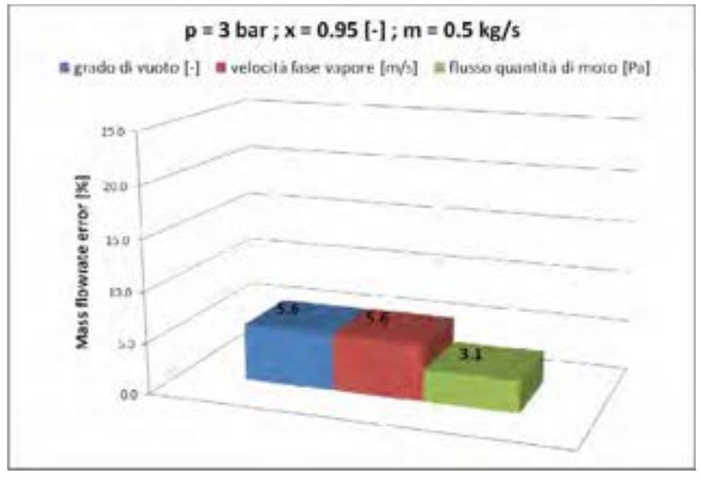

p = 3 bar ; x = 0.85 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
19.8
6.9
4.5

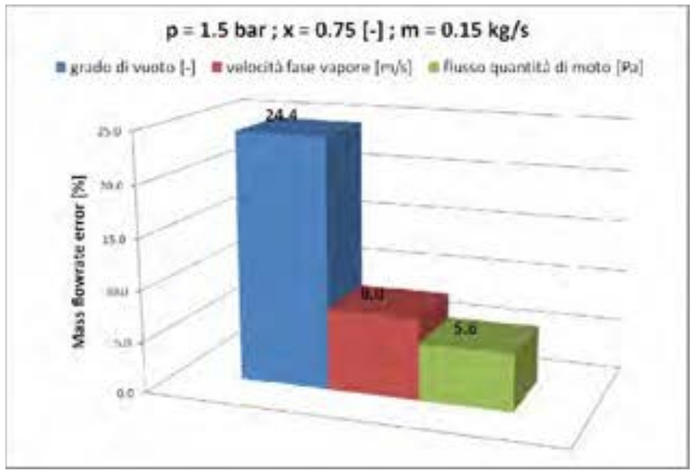

p = 3 bar ; x = 0.85 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
19.7
5.8
4.4

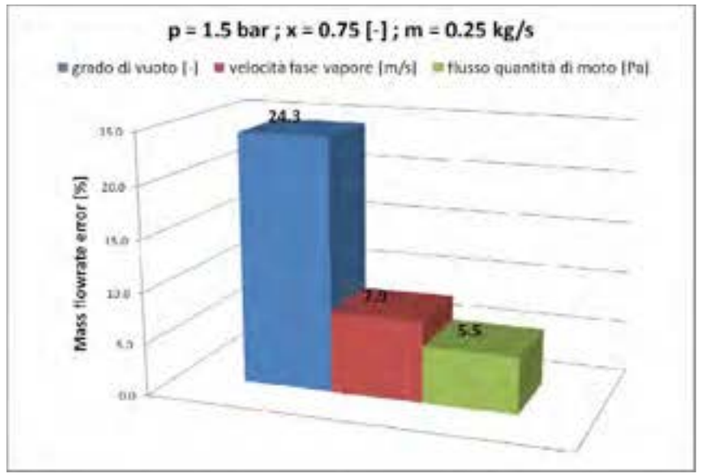

p = 3 bar ; x = 0.85 [-] ; m = 0.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
19.7
6.8
4.3

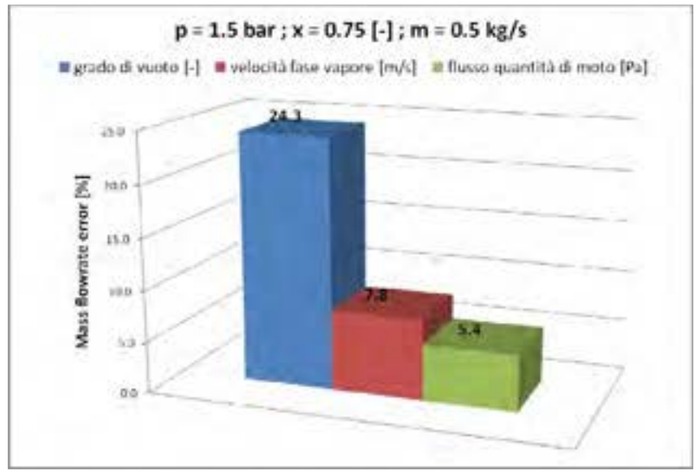

p = 3 bar ; x = 0.95 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
5.6
5.6
3.2

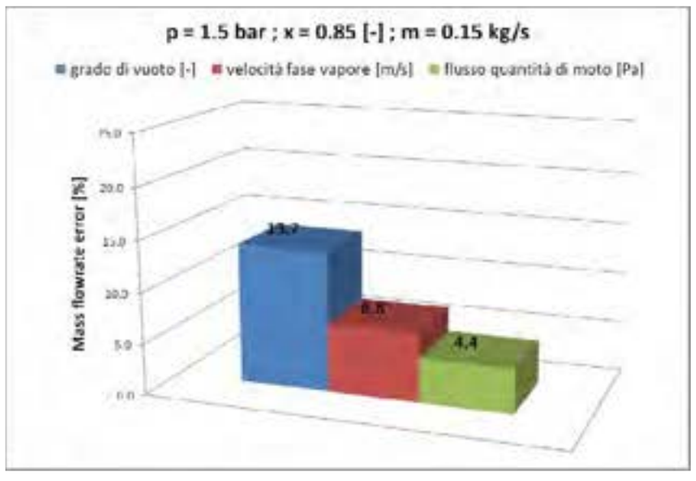

p = 3 bar ; x = 0.95 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
5.6
5.6
3.2

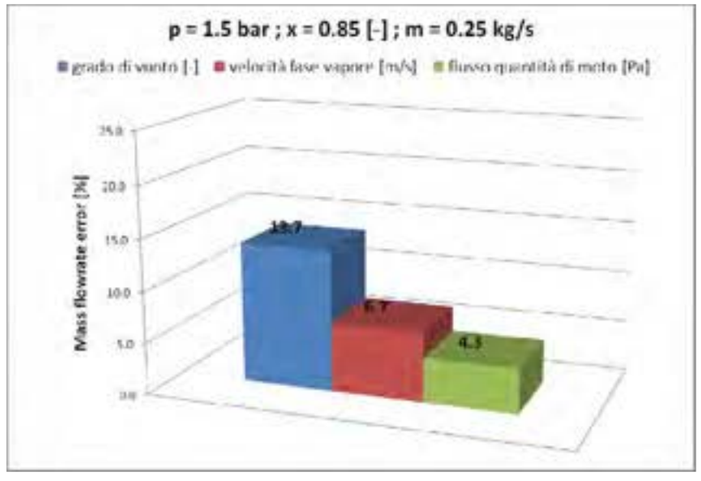

p = 3 bar ; x = 0.95 [-] ; m = 0.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
5.6
5.6
3.1

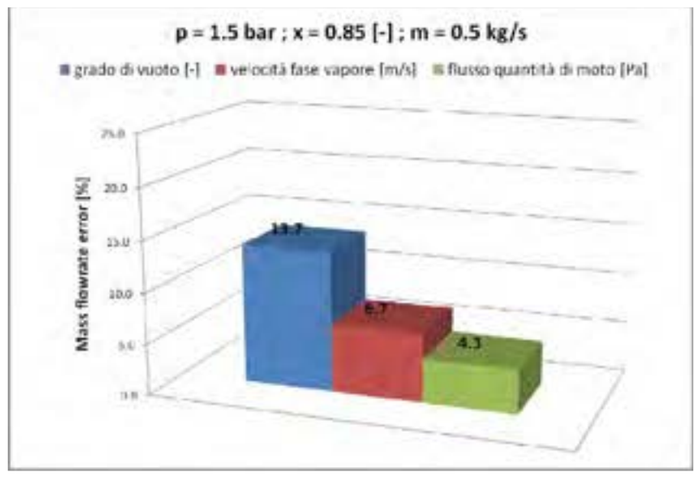

p = 1.5 bar ; x = 0.75 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
24.4
8.0
5.0

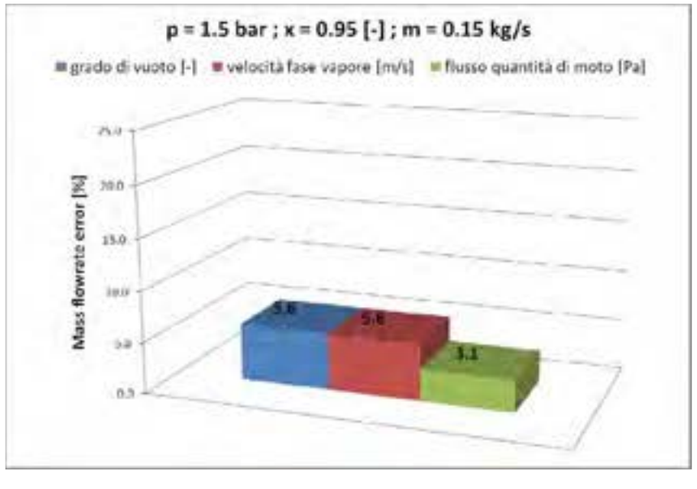

p = 1.5 bar ; x = 0.75 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
24.3
7.9
5.5

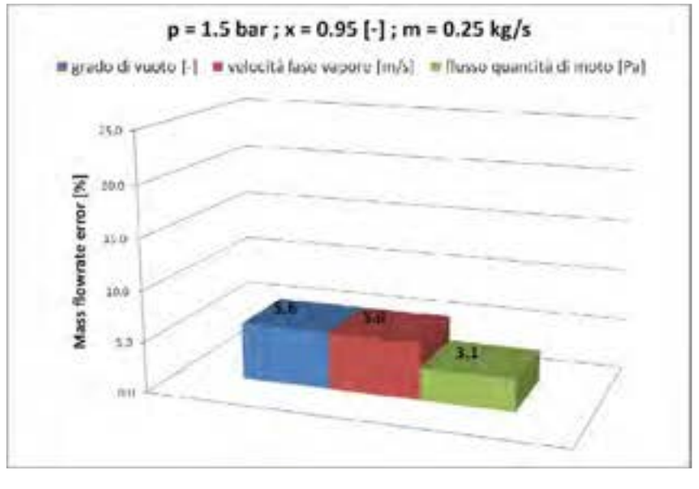

p = 1.5 bar ; x = 0.75 [-] ; m = 0.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
24.3
7.8
5.4

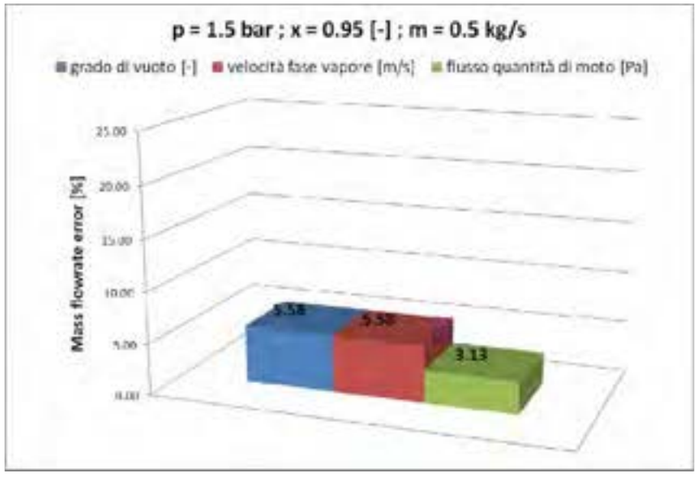

p = 1.5 bar ; x = 0.85 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
13.7
6.8
4.4

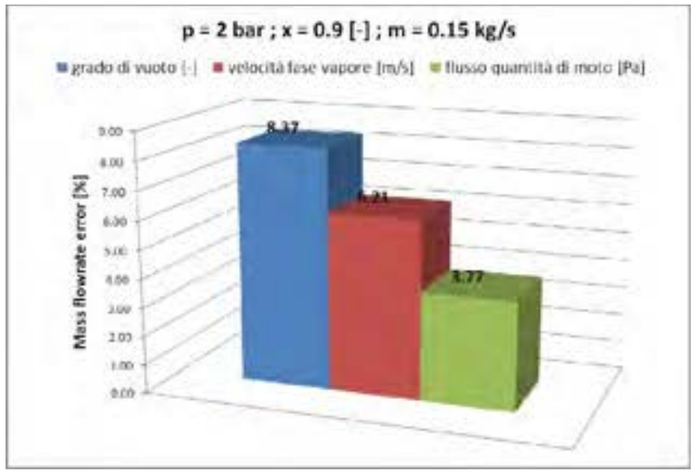

p = 1.5 bar ; x = 0.85 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
13.7
6.7
4.3

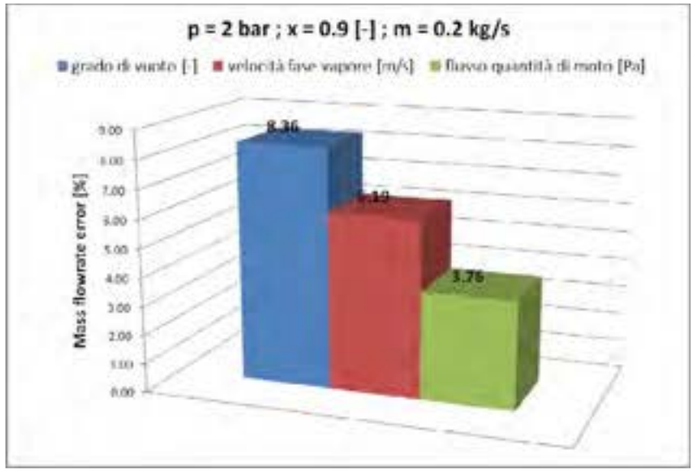

p = 1.5 bar ; x = 0.85 [-] ; m = 0.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
13.7
6.7
4.3

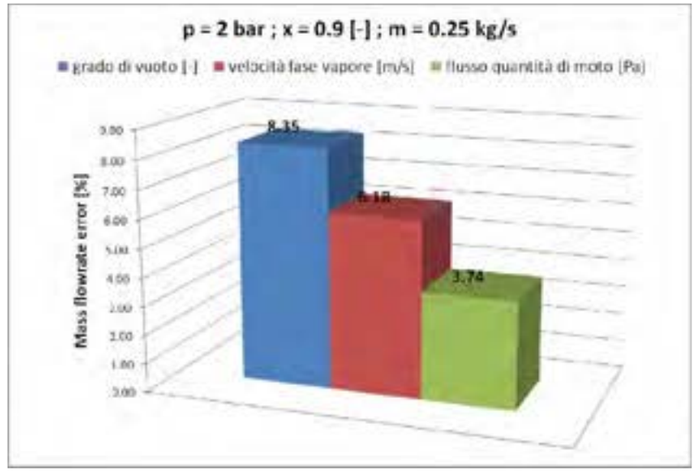

p = 1.5 bar ; x = 0.95 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
5.6
5.6
3.1

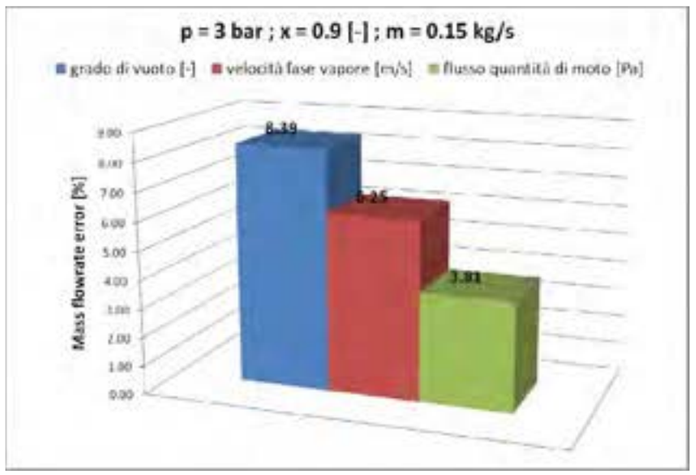

p = 1.5 bar ; x = 0.95 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
5.6
5.6
3.1

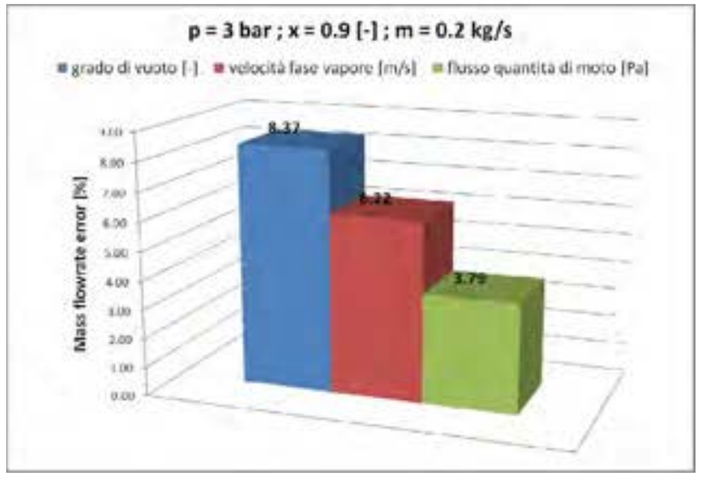

p = 1.5 bar ; x = 0.95 [-] ; m = 0.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
5.58
5.58
3.13

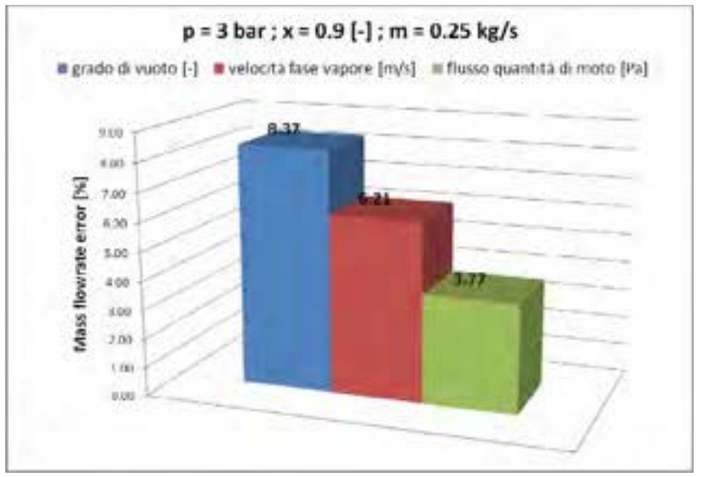

p = 2 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.37
6.21
3.77

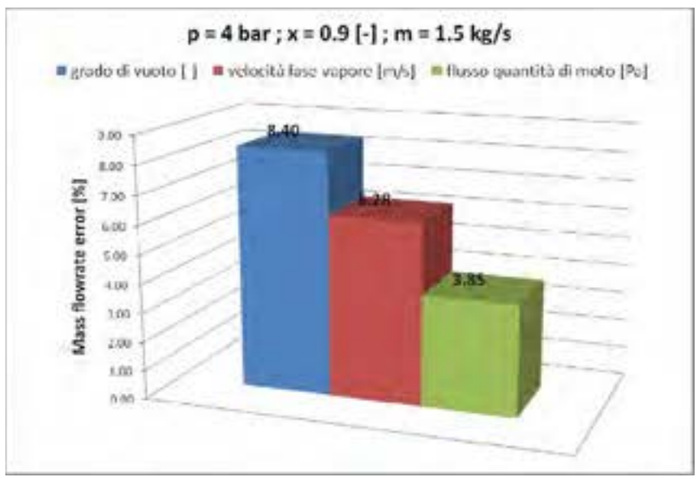

p = 2 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.2 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.36
6.19
3.76

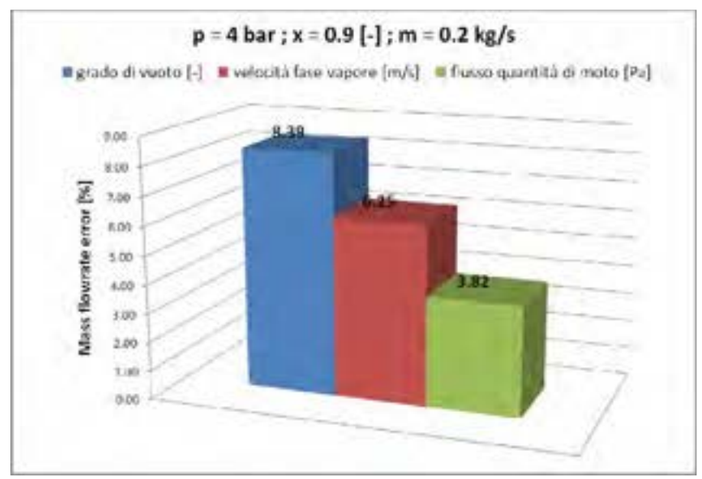

p = 2 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.35
6.18
3.74

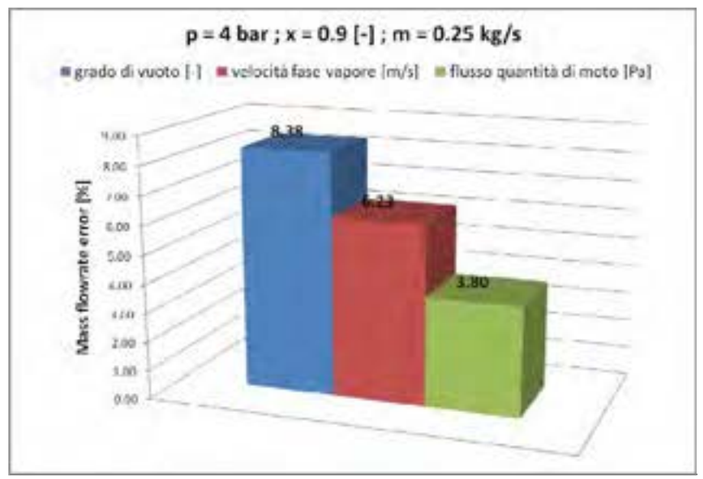

p = 3 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.15 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.39
6.25
3.81


p = 3 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.2 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.37
6.22
3.79


p = 3 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.37
6.21
3.77


p = 4 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 1.5 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.40
6.28
3.85


p = 4 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.2 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.39
6.25
3.82


p = 4 bar ; x = 0.9 [-] ; m = 0.25 kg/s
grado di vuoto [-]
velocità fase vapore [m/s]
flusso quantità di moto [Pa]
Mass flowrate error [%]
8.38
6.23
3.80

Le prime tre serie di grafici riportano l'errore percentuale sul calcolo della portata bifase a tre diversi valori di pressione (5, 10 e 15 bar) in funzione del titolo, crescente dall'alto verso il basso (30, 60 e 90%) e della portata, crescente da sinistra verso destra (1.5 , 3, 4.5 kg/s).

Si può osservare che:

- L'errore sulla portata cresce al crescere della pressione.
- L'errore cresce al diminuire della portata e del titolo
- Mediamente l'errore sul flusso della quantità di moto pesa meno dei contributi dati dall'errore sul grado di vuoto e sulla velocità della fase vapore.
- Agli alti titoli ed alle alte portate il contributo all'errore che pesa di più è quello dato dal grado di vuoto mentre, ai bassi titoli e alle basse portate, i contributi all'errore dati dal grado di vuoto e dalla velocità della fase vapore sono equivalenti.

La quarta e la quinta serie di grafici riporta l'errore percentuale sul calcolo della portata a due diversi valori di pressione (1.5 e 3 bar), ad alti titoli di vapore (0.75, 0.85 e 0.95) e basse portate (0.15, 0.2 e 0.25 kg/s), valori molto simili a quelli testati durante la campagna sperimentale del PAR2012.

Anche per questa zona della matrice di prove SPES-3 si possono ripetere considerazione analoghe.
L'unica differenza sostanziale è la forte influenza del grado di vuoto sull'errore della portata bifase. Specialmente alle basse portate (0.15 kg/s) determina un errore sulla portata triplo rispetto a quello causato dall'errore sulla velocità e quintuplo rispetto a quello causato dal flusso della quantità di moto.
Anche in valore assoluto, in questa zona della matrice, un errore sul grado di vuoto è molto penalizzante sul calcolo della portata, determinando, un errore sul calcolo della portata dell'ordine del 24%.
Questo fatto era stato peraltro già evidenziato nel corso della campagna sperimentale del PAR2012.

In Figura 52, 53, 54, 55 e 56 sono riportati i valori di incertezza estesa della portata massica bifase, in funzione della zona della matrice pressione-titolo-portata in cui viene calcolata, espressa in kg/s e in termini di variazione percentuale rispetto al valore teorico.

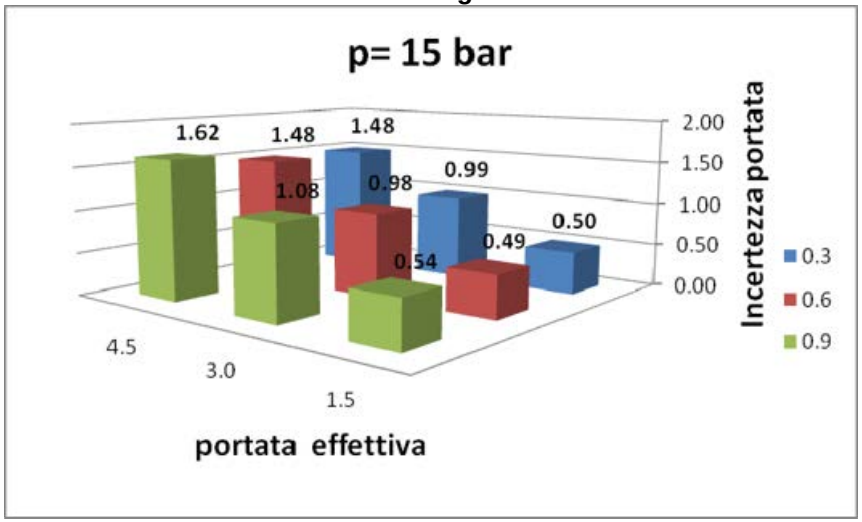
L'incertezza estesa varia tra il 33 e 36 % per i punti sperimentali con pressioni comprese tra 5 e 15 bar e titoli e portate variabili entro tutto il range di variazione.

Per basse pressioni (3, 1.5 bar) il valore di incertezza cala drasticamente e si attesta su valori dell'ordine del 3 - 7.5 %.

Nei punti della matrice in cui la velocità della fase vapore si trova al di fuori del range di velocità misurabili dal vortex e, contemporaneamente il flusso a monte della valvola di rottura è monofase, per la misura della portata si utilizza il venturi e pertanto, l'incertezza di misura associata alla portata massica è quella relativa al venturi. Incertezza che risulta, ovviamente, sensibilmente inferiore a quella dello spool piece.

Infine, per i punti sperimentali della campagna di prova del PAR 2012, caratterizzati da alti titoli di vapore , basse portate (da 0.15 a 0.25 kg/s) e basse pressioni (da 2 a 4 bar), l'incertezza estesa sulla misura di portata bifase è di circa il 36 % (Figura 57).

Figura 52: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 15 bar



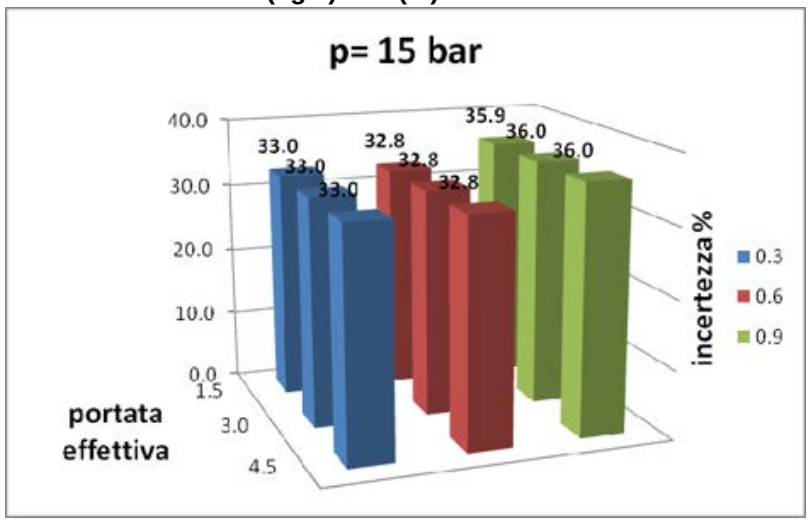
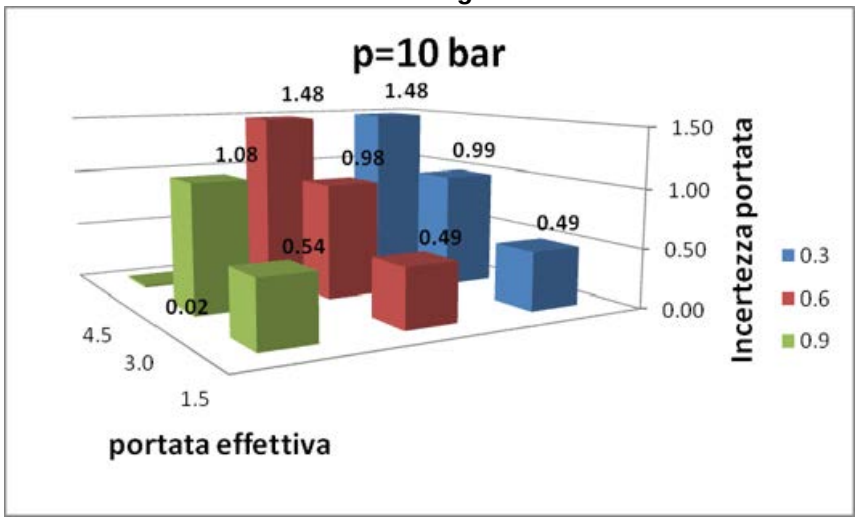


Figura 53: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 10 bar



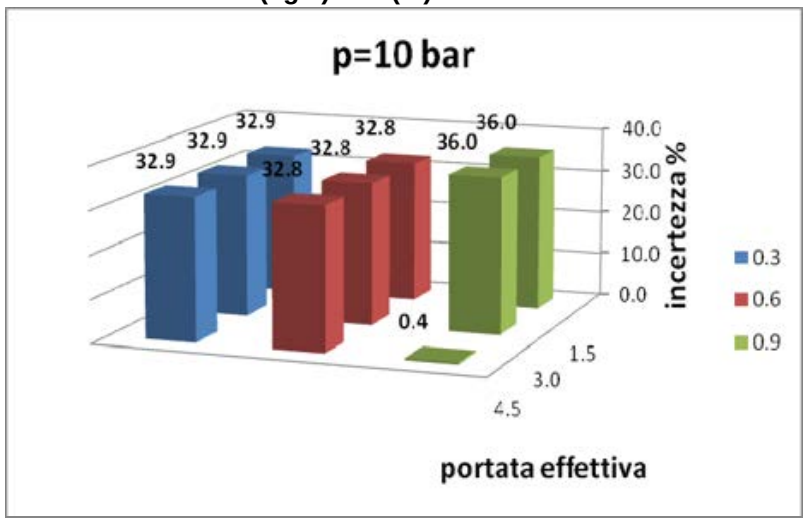
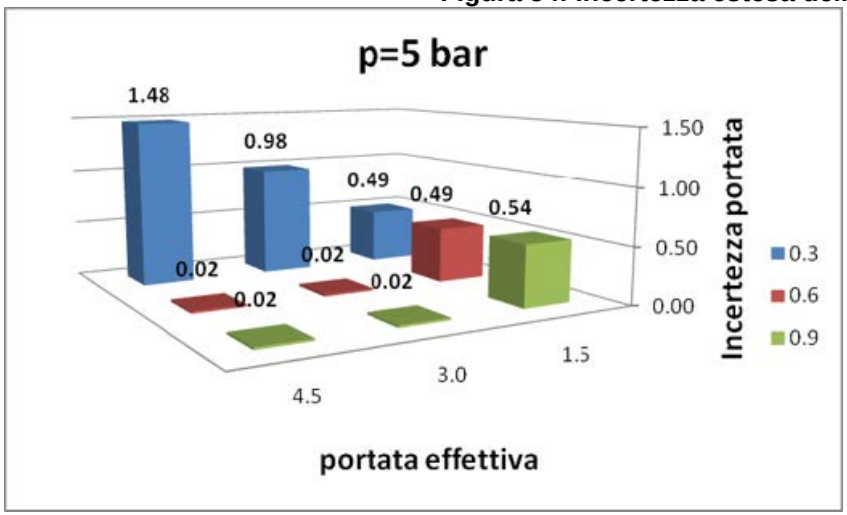


Figura 54: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 5 bar



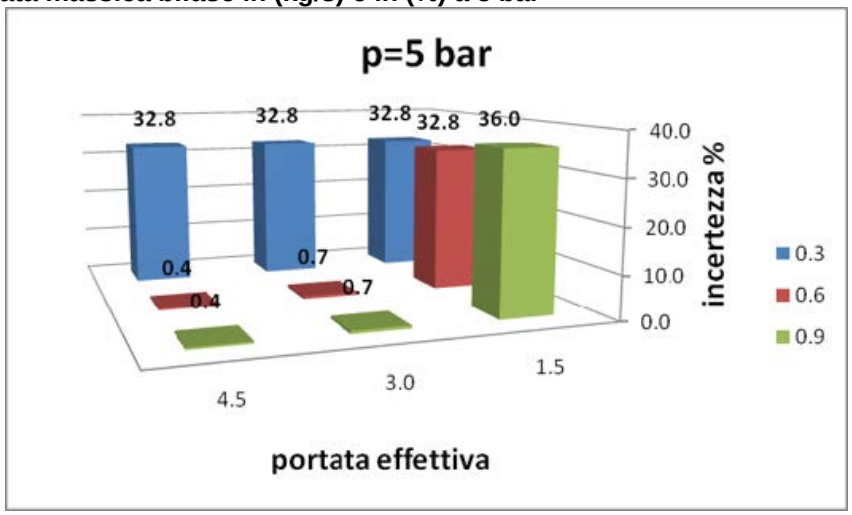
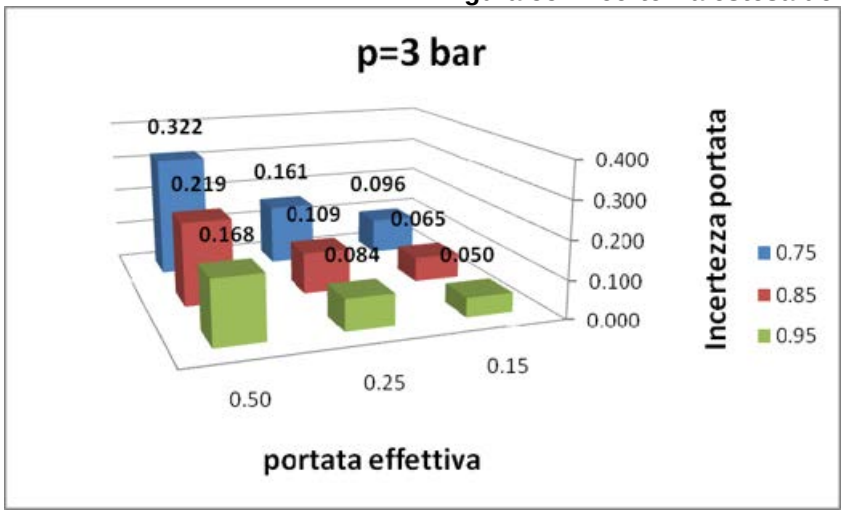


Figura 55: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 3 bar



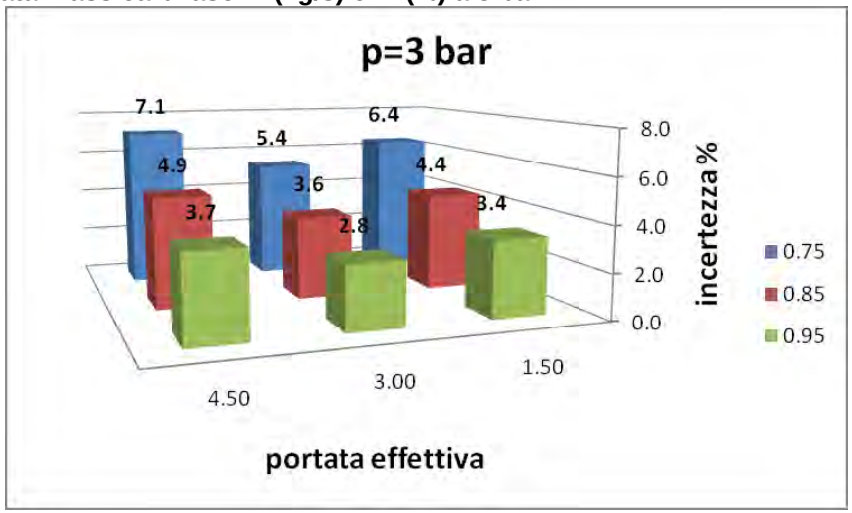
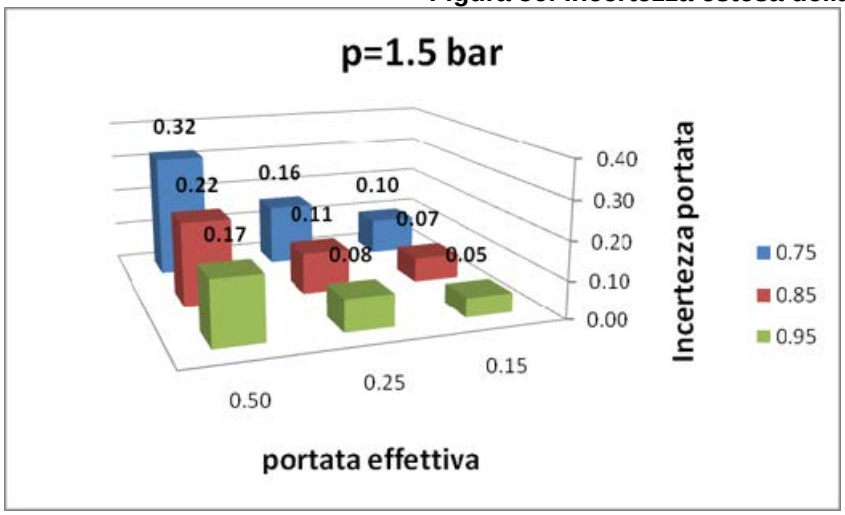


Figura 56: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 1.5 bar



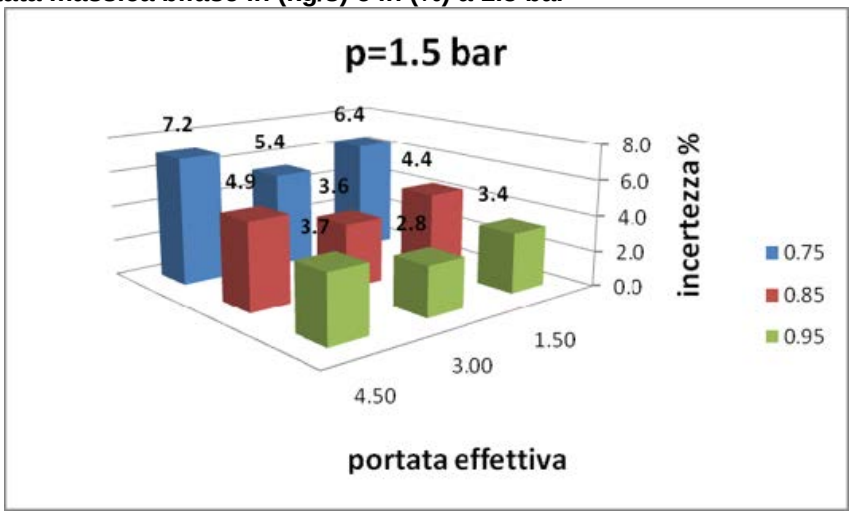
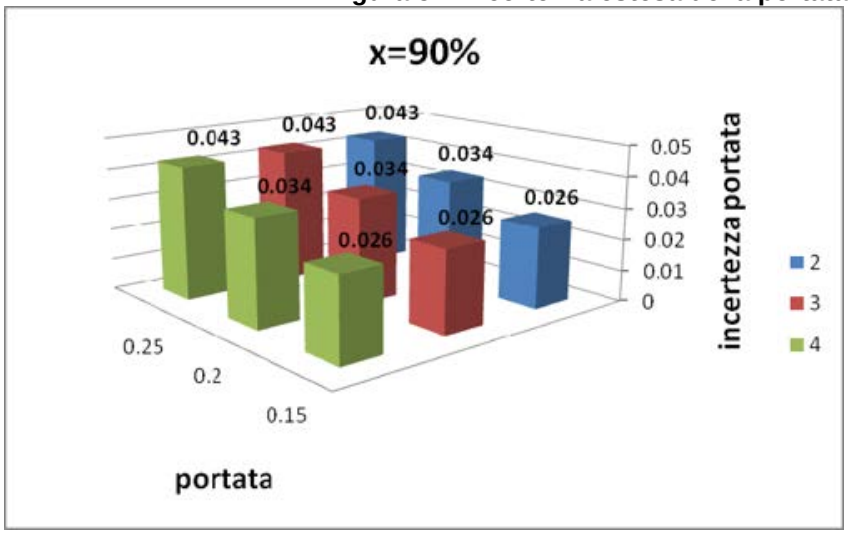
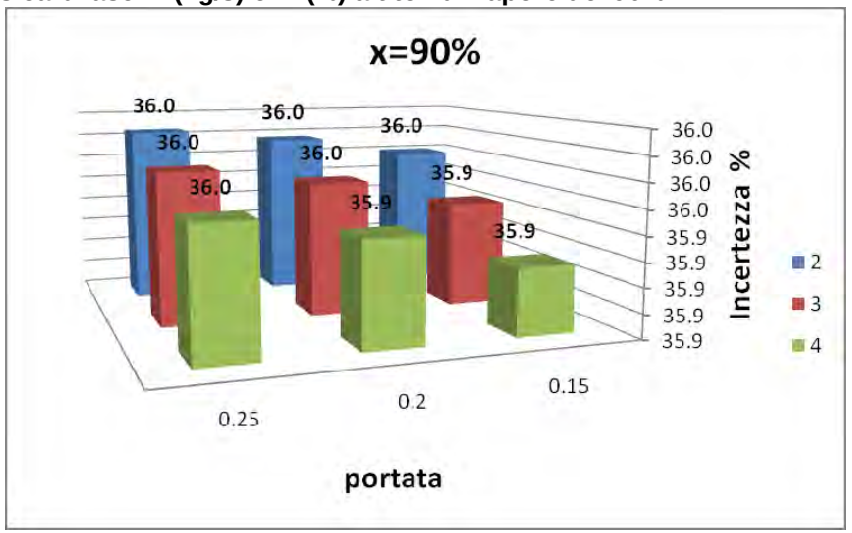


Figura 57: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a titoli di vapore del 90%





Nel calcolo dell'incertezza estesa sulla misura di portata massica bifase con lo spool piece pesano i contributi di incertezza associati ai singoli strumenti (Tabella 23):

Strumento	Misura	Incertezza strumento	Deviazione
sonda capacitiva	α [%]	10% v.m.	5% v.m.
vortex	V [m/s]	1% v.m.	5% v.m.
Pitot / drag disk	M [Pa]	32 % v.m	7% v.m.

Tabella 23: Componenti di incertezza degli strumenti dello spool piece

Nel calcolo dell'incertezza sul grado di vuoto, si è tenuto conto della deriva del segnale degli elettrodi della sonda capacitiva, quantificabile in un 10% per variazioni di temperatura dell'ordine di 20°C.

Per quanto riguarda il vortex si è considerato l'errore massimo dello strumento dato dal costruttore pari all'1% del valore di velocità misurata oppure a 0.9 m/s a seconda che la velocità misurata sia rispettivamente minore o maggiore di 75 m/s.

Mentre per il Pitot (drag disk) si è considerato un errore legato alla geometria dello strumento e all'effetto dovuto alla misura in presenza di profili di velocità-densità del fluido non uniformi pari al 32% del valore misurato.

Inoltre, per tutti gli strumenti, si è tenuto conto della deviazione delle misure effettuate rispetto ai valori teorici delle grandezze misurate.

I singoli strumenti sono migliorabili:

- L'effetto della temperatura sulla deriva dei segnali elettrici della sonda capacitiva può essere eliminato con le modifiche descritte nel Capitolo 8.

- L'errore dovuto alla geometria del misuratore di flusso di quantità di moto può essere ridotto, per esempio, utilizzando un drag disk con un'area efficace più grande o un tubo di Pitot con più fori distribuiti lungo il diametro del condotto da 3''.

Considerando una versione migliorata dello spool piece (Tabella 24) con, per esempio, una sonda capacitiva in cui l'effetto di temperatura è stato ridotto di un fattore 5 e, un drag disk in cui l'effetto geometrico è stato ridotto di un fattore 3, otteniamo i valori di incertezza estesa sulla misura della porta mostrati in Figura 58, 59, 60 e 61.

Strumento	Misura	Incertezza strumento	Deviazione
sonda capacitiva	α [%]	2% v.m.	5% v.m.
vortex	V [m/s]	1% v.m.	5% v.m.
Pitot / drag disk	M [Pa]	10 % v.m	7% v.m.

Tabella 24: Componenti di incertezza degli strumenti dello spool piece "migliorato"

I miglioramenti sugli strumenti dello spool piece si traducono in un abbassamento dell'incertezza sulla misura della portata massica, su tutta il campo tridimensionale di misura di un fattore 2.

L'incertezza estesa ad alte pressioni passa da un valore di circa 35% ad un valore che si aggira intorno al 15%. Alle basse pressioni si passa dal 7% al 2.5-3%.

I miglioramenti ai singoli strumenti sono peraltro facilmente realizzabili e potranno essere implementati in una versione futura di spool piece.

In passato in SIET, nel corso della campagna sperimentale Westinghouse, furono studiati degli spool piece costituiti da un gammadensitometro per la misura di grado di vuoto, un drag disk per la misura di flusso di quantità di moto e una turbina per la misura di velocità della miscela.

I segnali dei tre strumenti furono acquisiti ma non furono elaborati in quanto la portata bifase fu ricostruita sulla base della quantità di liquido raccolta da una catch tank in un certo intervallo di tempo note pressione e temperatura. Pur non possedendo informazioni relative all'incertezza sulla misura di portata bifase, possiamo fare alcune considerazioni di carattere qualitativo sulla strumentazione utilizzata.

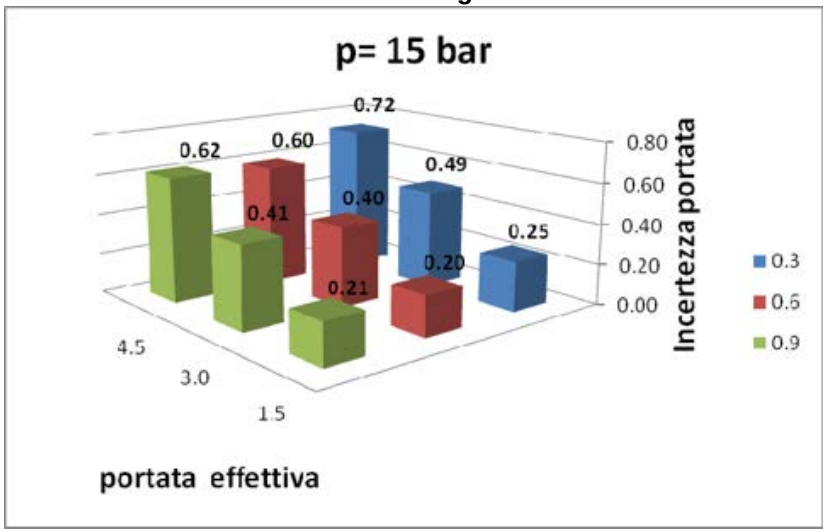
Con riferimento alle condizioni di esercizio dell'impianto SPES-3, tali strumenti presentano alcune problematiche legate sia alla gestione sia al loro utilizzo.

Il gammadensitometro presenta problematiche legate ai costi di gestione e di approvvigionamento oltre a quelle legate alla radioprotezione. Tale sistema inoltre, agli alti valori di grado di vuoto, caratteristici dei flussi previsti nelle linee di rottura dell'impianto SPES-3, diversamente dal misuratore di tipo elettrico, risulta non idoneo alla misura di grado di vuoto essendo scarsamente sensibile alla presenza di piccole quantità di liquido.

Le turbine per la misura di velocità non sono utilizzabili nella campagne di prova di SPES-3 a causa dell'alta velocità della miscela bifase prevista che comprometterebbe l'integrità della girante. Inoltre, il segnale in uscita dallo strumento è di difficile interpretazione a causa della sua dipendenza non solo dalla velocità delle singole fasi (liquido e vapore) ma anche da altre grandezze termoidrauliche, nonché dal regime di moto.

Alla luce delle problematiche esposte, si presume che l'incertezza sulla misura di portata bifase introdotta dallo spool piece costituito da gamamdensitomentro, drag disk e turbina sia maggiore di quella introdotta dallo spool piece, nella versione migliorata, descritto nel presente documento.

Figura 58: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 15 bar



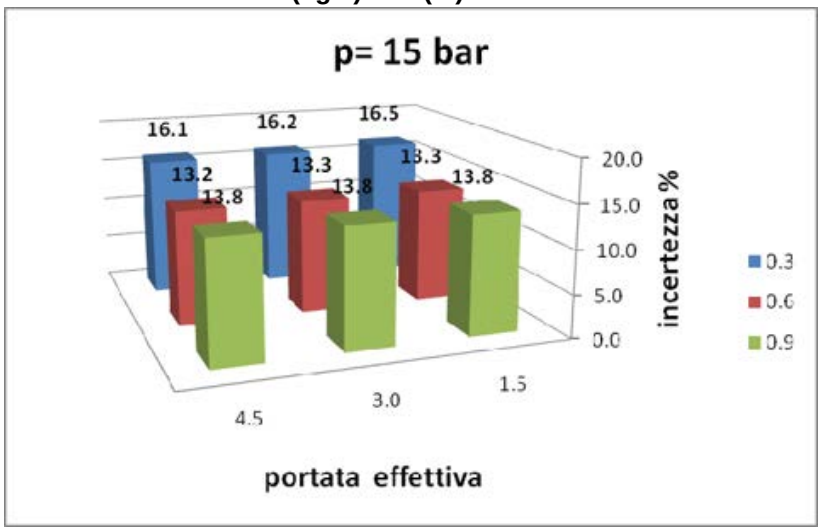
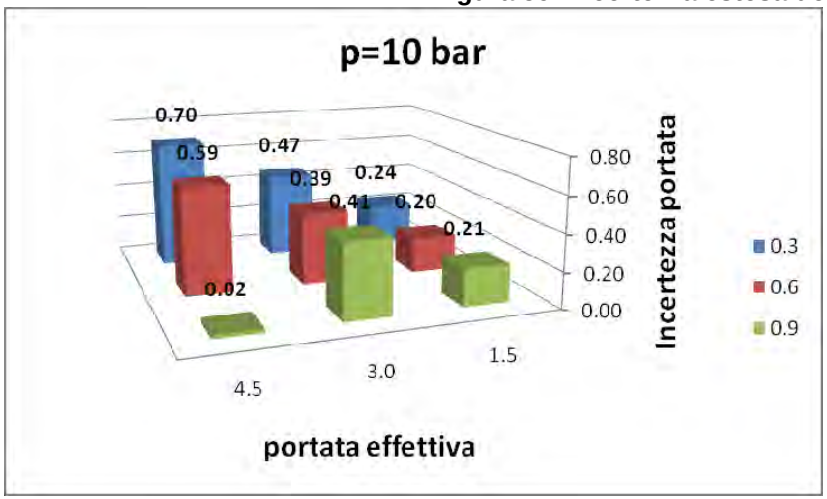


Figura 59: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 10 bar



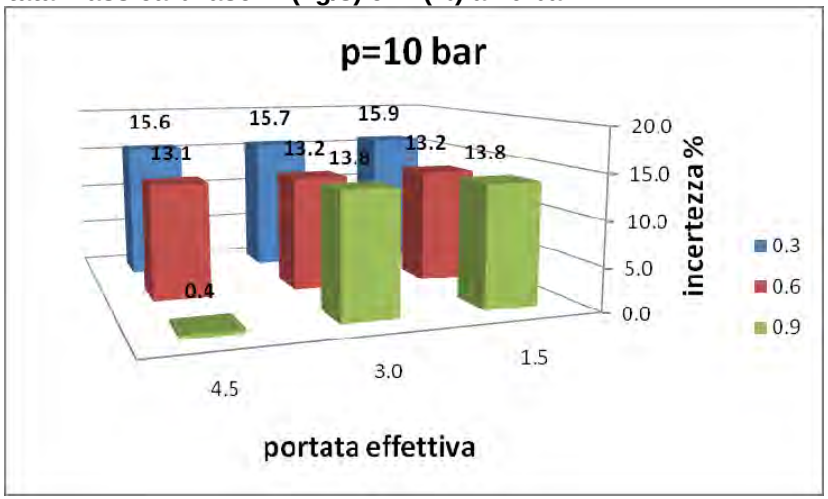


Figura 60: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 5 bar

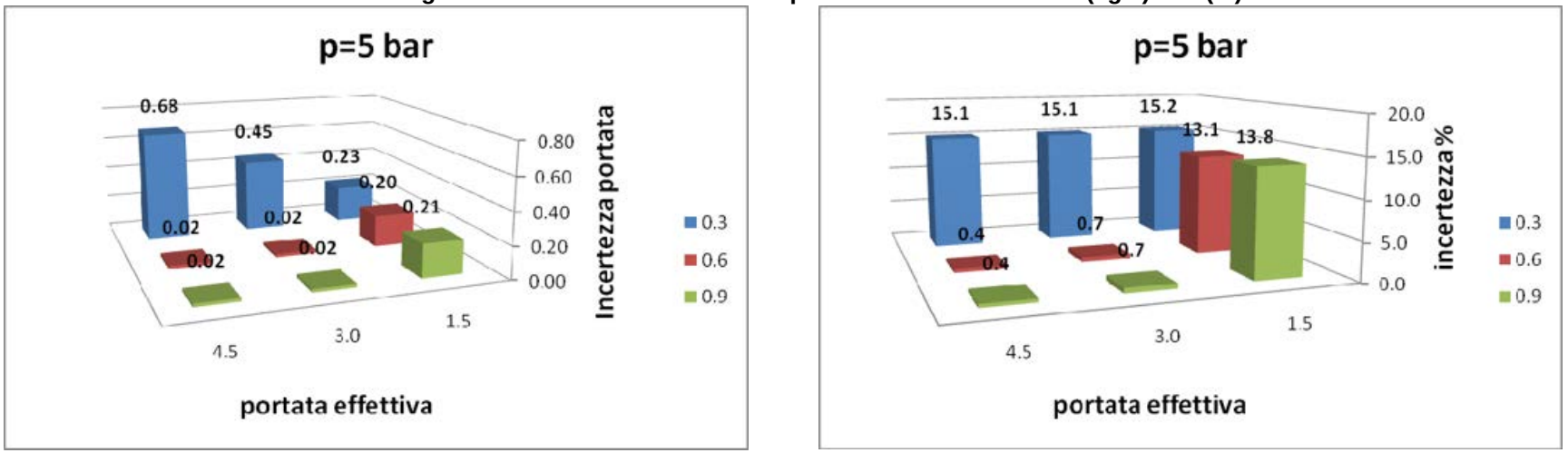
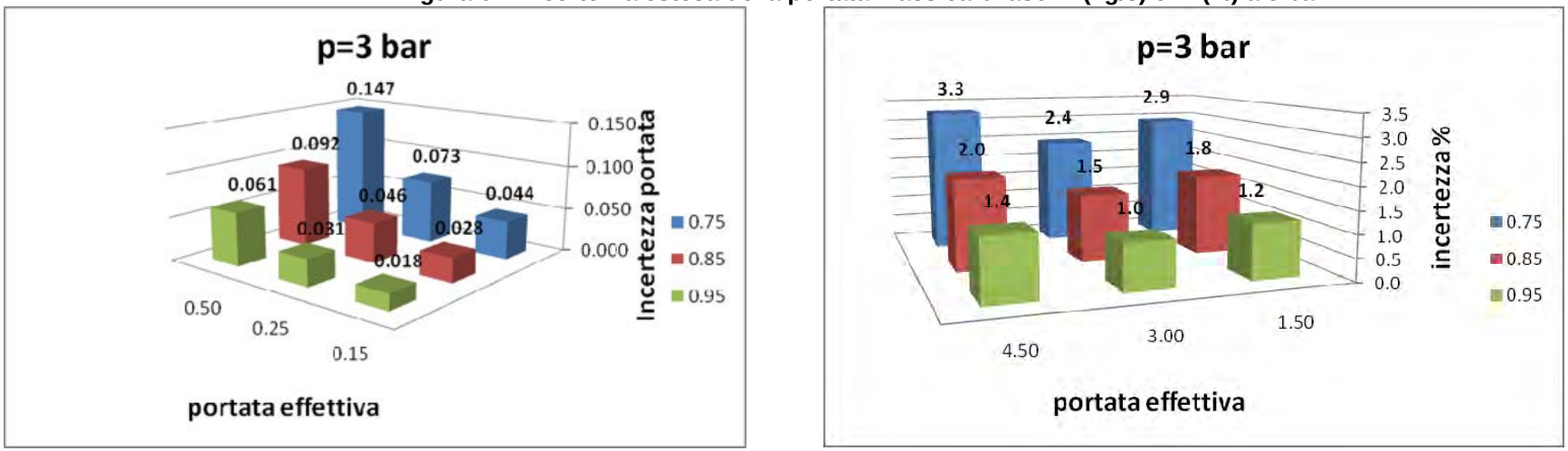


Figura 61: Incertezza estesa della portata massica bifase in (kg/s) e in (%) a 3 bar



13. Conclusioni

La misura di portata massica bifase nelle linee di rottura e nelle linee di scarico dell'ADS di SPES-3 sarà effettuata con l'ausilio di un set eterogeneo di strumenti chiamato Spool Piece. Le misure necessarie per stimare la portata massica bifase sono tre: la misura di grado di vuoto, la misura di velocità della fase vapore e la misura di flusso di quantità di moto.

Lo Spool Piece realizzato presso i laboratori SIET è composto da una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto medio, un flussimetro a generazione di vortici per la misura della velocità della fase vapore e da un drag disk (o un tubo di Pitot) per la misura di flusso di quantità di moto.

La sperimentazione sullo Spool Piece condotta nell'ambito del PAR2012 ha messo in evidenza alcune criticità legate sia all'elettronica sia al modello matematico per il calcolo della portata bifase.

L'obiettivo dell'attività previsto nel PAR2013 consisteva nella analisi approfondita di tutti i dati sperimentali ricavati dalle varie campagne di prova per stimare l'incertezza di misura della portata massica ed, eventualmente ridurla, attraverso miglioramenti da apportare allo Spool Piece.

Sulla base dell'analisi di dati precedentemente acquisiti e di nuovi test di stabilità, è stata valutata in modo accurato l'incertezza introdotta dai diversi strumenti dello spool piece nella misura di portata.

Il valore dell'incertezza complessiva dello spool piece attuale è risultato particolarmente elevato.

Le cause principali sono dovute all'incertezza associata alla misura del grado di vuoto, penalizzata da derive di origine termica dell'elettronica della sonda capacitiva e all'incertezza della misura del momento di quantità di moto dovuta ad alcuni limiti intrinseci nel drag disk e nel tubo di Pitot disponibili.

Per queste specifiche cause d'incertezza sono state individuate migliorie fattibili.

L'errore dovuto alla geometria del misuratore di flusso di quantità di moto può essere ridotto, per esempio, utilizzando un drag disk con un'area efficace più grande o un tubo di Pitot con più fori distribuiti lungo il diametro del condotto da 3''.

Per poter annullare o limitare l'effetto della temperatura sulla misura degli elettrodi si potrà realizzare un modello alternativo di sonda con un sistema di termostatazione delle schede in modo da mantenerle a temperatura costante eliminando l'effetto della temperatura sulla misura con gli elettrodi.

Tali migliorie, potranno essere realizzate su nuovi strumenti e saranno in grado di ridurre il valore dell'incertezza media sulla portata massica bifase al disotto del 15%.

14. Bibliografia

[1] SIET document 01 489 RT 09 Rev.0: SPES3-IRIS facility RELAP5 base case transient analyses for design support, April 2009.

[2] SIET document 01 423 RT 08 Rev.0: SPES3-IRIS facility nodalization for RELAP5 Mod.3.3 code and steady state qualification, January 2009.

[3] SIET document 01 525 ST 09 Rev.0: SPES3 - Two-phase Mass Flow Measurements: Technical Specifications, July 2010.

[4] SIET document 01 605 ST 10 Rev.0: Strumentazione speciale per l'impianto sperimentale SPES3, July 2010.

[5] SIET document 01 572 ST 09 Rev.0: SPES3 - Two-phase Mass Flow Measurements for SPES3 facility: Spool piece mathematical correlations, July 2010.

[6] SIET document 01 651 ST 10 Rev.0: Progettazione di una sonda capacitiva per la misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase aria-acqua, 24/09/2010.

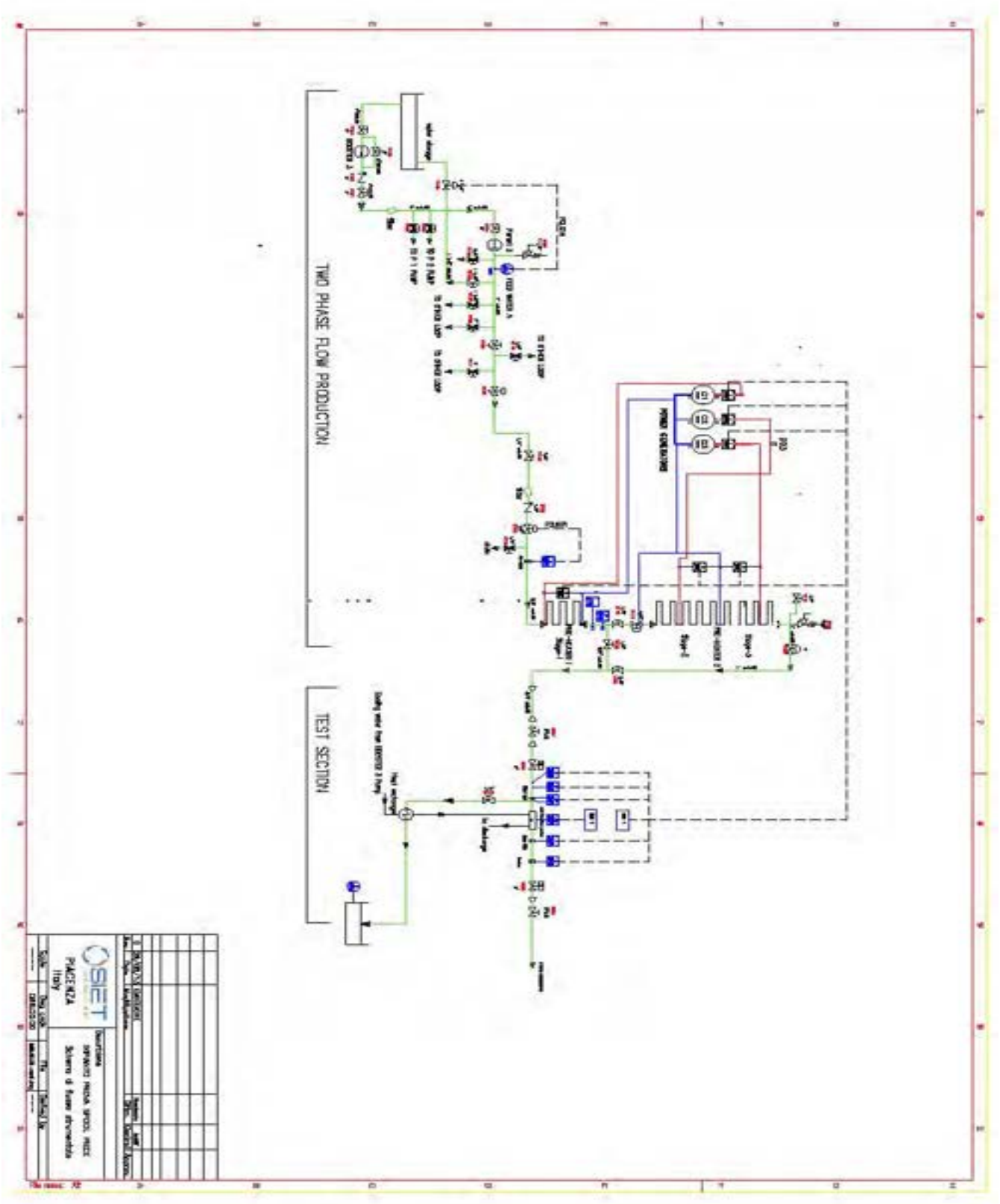
[7] SIET document 01 768 ST 11 Rev.0: Progettazione, sviluppo e prove di sonde capacitive per la misurazione del grado di vuoto 12/09/2011.

[8] SIET document 01 877 RT 12 Rev.0: Spool piece per la misura di portata di fluido bifase: misura di quantità di moto e di velocità, 31 luglio 2012.

[9] SIET document 01 876 RP 12 Rev.0: Prove a caldo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in miscela bifase, Agosto 2012.

[10] SIET document 02 116 RT 13 Rev.0: Relazione tecnica sulla messa a punto della strumentazione per la misura della portata bifase nella facility SPES-3, Agosto 2013.

[11] N.Zuber, J. Findlay – Average volumetric concentration in two –phase flow system – Journal Heat Transfert, Trans. ASME C, Vol. 87, 1965.

[12] Carlo Lombardi - Impianti Nucleari, Cusl, aprile 2004.

Allegato 1: Schema di flusso strumentato dell'impianto di prova SPOOL PIECE