



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Prove a caldo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in
miscela bifase

C. Randaccio



Report RdS/2012/021

PROVE A CALDO DI UNA SONDA CAPACITIVA PER LA MISURA DEL GRADO DI VUOTO IN MISCELA BIFASE

C. Randaccio (SIET)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

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

Responsabile del Progetto: Paride Meloni, ENEA

Titolo

Prove a caldo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in miscela bifase

Ente emittente SIET

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"
Argomenti trattati: Reattori e sistemi innovativi
 Sicurezza Nucleare

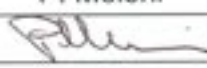
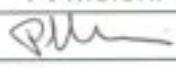
Sommario

Nell'ambito della Linea Progettuale 2 (LP2) degli ultimi due Piani Annuali di Realizzazione dell'Accordo di programma tra ENEA e MSE, la SIET S.p.A, ha svolto un'attività di sviluppo e caratterizzazione di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in deflussi bifase acqua-vapore. Il dispositivo, destinato all'applicazione sulle linee di rottura dell'impianto SPES-3, permetterà, unitamente ad altri strumenti, di misurare la portata bifase che transita nelle linee, durante i transitori incidentali.

La prima fase delle attività, eseguite in ambito PAR 2008-09 aveva portato allo sviluppo di un primo prototipo, adatto ad operare a bassa temperatura e pressione. La seconda fase delle attività, descritta nel presente rapporto e relativa al PAR 2011, ha portato allo sviluppo di un prototipo idoneo ad operare alle condizioni di esercizio delle linee di rottura dell'impianto SPES-3 (15 bar, 200°C).

Tale prototipo è stato collaudato con flussi acqua/vapore prototipici, utilizzando un impianto sperimentale di prova già esistente, realizzato per effettuare test su barre scaldanti per l'impianto SPES-3. L'impianto sperimentale, dotato di valvole rapide, ha consentito di eseguire misure di grado di vuoto volumetrico medio sui flussi bifase. Le misure di grado di vuoto sono state correlate ai segnali della sonda capacitiva in modo da ottenere un modello predittivo sperimentale, requisito necessario per l'impiego della sonda nelle linee di rottura dell'impianto SPES-3.

Note
Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	31/08/2012	NOME	P. Meloni		P. Meloni
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE

			EMITTENTE <i>issued by</i> Unità di Produzione <i>Production Unit</i> Laboratorio Prove Grandi Impianti		
CLIENTE: ENEA <i>client</i>		COMMESSA: 1PN00SSS10608 <i>Job</i>		DISCO: <i>disk</i>	PAGINA: 1 DI: 126 <i>page of</i>
IDENTIFICATIVO: 01 876 RP 12 <i>document</i>			Classe Ris.: <i>confidentiality</i>		Allegati: 2 <i>enclosures</i>
TITOLO: Prove a caldo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in miscela bifase <i>title</i>					
REDATTORI: C. Randaccio <i>prepared by</i>					
LISTA DI DISTRIBUZIONE <i>distribution list</i> ENEA Paride Meloni					
0	28/08/2012	ISSUE	 C. Randaccio	 A. Achilli	
REV. <i>rev.</i>	DATA <i>date</i>	DESCRIZIONE <i>description</i>	REDAZIONE <i>prepared by</i>	APPROVAZIONE <i>approved by</i>	
Informazioni strettamente riservate di proprietà SIET SpA - Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui sono state fornite. <i>Confidential information property of SIET SpA - Not to be used for any purpose other than those for which it is supplied.</i>					

SOMMARIO

SOMMARIO	2
LISTA DELLE TABELLE	3
LISTA DELLE FIGURE	4
LISTA DEGLI ALLEGATI	7
1. OBIETTIVO	8
2. INTRODUZIONE	9
3. SINTESI STUDI PRECEDENTI	10
4. SONDA CAPACITIVA OPERANTE A CALDO	11
4.1 Struttura prototipo a caldo	11
4.2 Elettronica e sistema acquisizione dati	15
4.3 Sezione orizzontale di prova	17
4.4 Preparazione della miscela bifase	19
4.5 Determinazione della portata e del titolo della miscela bifase all'ingresso della sezione di prova	20
4.6 Misura del grado di vuoto attraverso valvole rapide	21
5. PROVE SPERIMENTALI	24
5.1 Prove statiche di livello	24
5.2 Prove in deflusso bifase	36
5.2.1 Modalità di conduzione delle prove	36
5.2.2 Matrice sperimentale di prove	37
5.3 Risultati prove in deflusso bifase	38
Risultati prove gruppo 1	40
Risultati prove gruppo 2	50
Risultati prove gruppo 3	62
Risultati prove gruppo 4	69
Risultati prove gruppo 5	79
Risultati prove gruppo 6	90
Risultati prove gruppo 7	102
5.4 Caratterizzazione della sonda capacitiva	112
5.4.1 Modello matematico per l'analisi tomografica EIT	112
5.4.2 Correlazione sperimentale tra segnale degli elettrodi e grado di vuoto	115
6. CONCLUSIONI	124
7. BIBLIOGRAFIA	125

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1: Matrice sperimentale prove di livello.....	25
Tabella 2: Matrice sperimentale prove in deflusso bifase.....	37
Tabella 3: parametri elettrodi periferici.....	109
Tabella 4: errore percentuale nella stima del grado di vuoto.....	114
Tabella 5: segnali normalizzati.....	115
Tabella 6: errore percentuale nella stima del grado di vuoto.....	117

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1: Sonda capacitiva a caldo	11
Figura 2: Circuiti stampati	12
Figura 3 : Circuiti stampati con reed relè e cavi di connessione agli elettrodi.....	12
Figura 4: Contenitore in acciaio di sicurezza.....	13
Figura 5: Solenoidi in rame per il raffreddamento della zona contenete i circuiti stampati.....	14
Figura 6: Termocoppia sul fondello inferiore del contenitore di sicurezza della sonda.....	14
Figura 7: Schema elettrico sonda capacitiva a caldo	15
Figura 8: SAD strumentazione della sezione di prova	16
Figura 9: Sezione di prova orizzontale	17
Figura 10: Tratto a monte della sonda: valvola di sicurezza, manometro e presa per il drenaggio.....	18
Figura 11: Tratto a valle della sonda: drag disk, termocoppia, presa per l'aria compressa.....	18
Figura 12: Sezione per la preparazione della miscela bifase.....	19
Figura 13: Condensatore e bilancia da laboratorio	23
Figura 14: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 1.....	25
Figura 15: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 2.....	26
Figura 16: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 3.....	26
Figura 17: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 4.....	27
Figura 18: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 5.....	27
Figura 19: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 6.....	28
Figura 20: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 7.....	28
Figura 21: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 8.....	29
Figura 22: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 9.....	29
Figura 23: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 10.....	30
Figura 24: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 11.....	30
Figura 25: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 12.....	31
Figura 26: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 13.....	31
Figura 27: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 14.....	32
Figura 28: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 15.....	32
Figura 29: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 16.....	33
Figura 30: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo centrale.....	33
Figura 31: Dispersione segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 1	34
Figura 32: Dispersione segnale elettrodo centrale.....	35
Figura 33: disposizione degli elettrodi periferici	39
Figura 34: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	40
Figura 35: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	41
Figura 36: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura.....	41
Figura 37: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	42
Figura 38: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	43
Figura 39: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	43
Figura 40: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura.....	44
Figura 41: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	44
Figura 42: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	45
Figura 43: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	45
Figura 44: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura.....	46
Figura 45: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	46
Figura 46: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°.....	47
Figura 47: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°.....	47
Figura 48: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°.....	48
Figura 49: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato l'elettrodo centrale	48
Figura 50: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha	49
Figura 51: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	50
Figura 52: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	51
Figura 53: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura.....	51
Figura 54: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	52
Figura 55: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	53
Figura 56: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	53
Figura 57: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura.....	54

Figura 58: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	54
Figura 59: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	55
Figura 60: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	55
Figura 61: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	56
Figura 62: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	56
Figura 63: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	57
Figura 64: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	57
Figura 65: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	58
Figura 66: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	58
Figura 67: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°	59
Figura 68: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°	59
Figura 69: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°	60
Figura 70: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato l'elettrodo centrale	60
Figura 71: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha	61
Figura 72: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	62
Figura 73: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	63
Figura 74: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	63
Figura 75: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	64
Figura 76: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	65
Figura 77: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	65
Figura 78: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	66
Figura 79: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	66
Figura 80: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	67
Figura 81: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	67
Figura 82: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	68
Figura 83: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	68
Figura 84: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	69
Figura 85: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	70
Figura 86: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	70
Figura 87: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	71
Figura 88: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	72
Figura 89: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	72
Figura 90: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	73
Figura 91: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	73
Figura 92: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva.....	74
Figura 93: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	74
Figura 94: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	75
Figura 95: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	75
Figura 96: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°	76
Figura 97: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°	76
Figura 98: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°	77
Figura 99: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato l'elettrodo centrale	77
Figura 100: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha	78
Figura 101: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	79
Figura 102: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	80
Figura 103: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	80
Figura 104: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	81
Figura 105: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	81
Figura 106: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	82
Figura 107: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	82
Figura 108: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	83
Figura 109: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	83
Figura 110: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	84
Figura 111: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	84
Figura 112: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	85
Figura 113: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	85
Figura 114: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	86
Figura 115: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	86
Figura 116: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°	87

Figura 117: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°	87
Figura 118: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°	88
Figura 119: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato dall'elettrodo centrale	88
Figura 120: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha	89
Figura 121: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	90
Figura 122: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	91
Figura 123: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	91
Figura 124: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	92
Figura 125: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	93
Figura 126: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	93
Figura 127: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	94
Figura 128: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	94
Figura 129: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	95
Figura 130: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	95
Figura 131: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	96
Figura 132: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	96
Figura 133: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	97
Figura 134: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	97
Figura 135: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	98
Figura 136: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	98
Figura 137: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°	99
Figura 138: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°	99
Figura 139: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°	100
Figura 140: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato dall'elettrodo centrale	100
Figura 141: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha	101
Figura 142: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	102
Figura 143: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	103
Figura 144: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	103
Figura 145: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	104
Figura 146: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	105
Figura 147: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	105
Figura 148: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	106
Figura 149: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	106
Figura 150: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva	107
Figura 151: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva	107
Figura 152: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	108
Figura 153: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura	108
Figura 154: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°	109
Figura 155: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°	109
Figura 156: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°	110
Figura 157: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con l'elettrodo centrale	110
Figura 158: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha	111
Figura 159: area associata a ciascuna coppia di elettrodi	115
Figura 160: prove gruppo 1	116
Figura 161: prove gruppo 2	116
Figura 162: prove gruppi 3-4	117
Figura 163: prove gruppo 5	117
Figura 164: prove gruppo 6	118
Figura 165: prove gruppo 7	118
Figura 166: correlazione sperimentale tra grado di vuoto e segnali	119
Figura 167: sensibilità della sonda in funzione della coppia di elettrodi	121
Figura 168: grado di vuoto vs segnale normalizzato	122

LISTA DEGLI ALLEGATI

Allegato 1: Circuito sperimentale per prove a caldo sulla sonda capacitiva

Allegato 2: Schema di flusso impianto prova sonda capacitiva

1. OBIETTIVO

Questo documento riguarda la caratterizzazione di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto, realizzata per operare nelle reali condizioni di funzionamento delle linee di rottura¹ e dell'ADS dell'impianto sperimentale SPES3 (200°C e 15 bar).

Il dispositivo fa parte di un set di tre strumenti, denominato SPOOL PIECE, che ha l'obiettivo di misurare la portata massica bifase che transita nelle linee di rottura e dell'ADS di SPES3 durante i transitori incidentali.

Il documento è diviso in due parti:

- Nella prima parte, vengono descritte le caratteristiche del prototipo “a caldo”, i miglioramenti apportati rispetto al primo prototipo operante “a freddo”, il circuito sperimentale di prova e la modalità di esecuzione delle prove.
- Nella seconda parte, vengono analizzati i risultati delle prove di caratterizzazione svolte e, alla luce di tali risultati, viene proposta una correlazione sperimentale tra il grado di vuoto ed i segnali della sonda capacitiva.

¹ Tali linee permettono di simulare i transitori di perdita di refrigerante, conseguenti a rotture singole (split) o doppie (DEG: Double Ended Guillotine) dei componenti dell'impianto reale.

2. INTRODUZIONE

Nell'ambito della Linea Progettuale 2 (LP2) dei due piani triennali (2006-08 e 2009-11) dell'Accordo di programma tra ENEA e MSE, la SIET S.p.A. ha svolto un'attività di sviluppo e caratterizzazione di una sonda ad impedenza capacitiva per la misura del grado di vuoto in deflussi bifase acqua-vapore.

La sonda fa parte di un set di tre strumenti, denominati SPOOL PIECE, da installare nelle linee di rottura e dell'ADS dell'impianto SPES3 per la misura della portata massica bifase durante i transitori incidentali.

L'impianto SPES3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza) è un simulatore integrale di reattori ad acqua in pressione, modulari, di piccola e media taglia (SMR), capace di verificare la risposta termoidraulica del reattore a fronte di transitori incidentali e fornire dati sperimentali per la validazione di codici di calcolo per le analisi di sicurezza.

Una caratteristica dei reattori integrali è il coinvolgimento, durante i transitori incidentali, dei volumi facenti parte del contenimento che, in determinate fasi, determinano il rientro nel vessel della massa d'acqua precedentemente fuoriuscita dalla rottura.

A causa della notevole differenza di pressione tra i circuiti primario e secondario (rispettivamente 155 e 58 bar circa) rispetto al sistema di contenimento (a pressione atmosferica), in caso di rottura, si verifica la presenza di flusso bifase nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Pertanto, i punti di misura dei circuiti idraulici, a monte e a valle delle valvole di rottura, sono interessati dalla presenza di fluido bifase.

Le misure bifase sono necessarie per ricostruire la distribuzione di massa e di energia tra i diversi componenti. Pertanto, per ogni transitorio previsto dalla matrice di prova, è necessario effettuare la misura della portata massica uscente dalla rottura.

Una grandezza, la cui conoscenza è fondamentale per definire la portata massica bifase è il grado di vuoto volumetrico, ovvero la frazione occupata dalla fase vapore in un determinato volume di controllo in cui scorre una miscela bifase acqua-vapore.

Il dispositivo sviluppato dalla SIET è basato sulla rilevazione della variazione della costante dielettrica del fluido, che si verifica a seconda della presenza della fase liquida o vapore all'interno della sonda. La variazione della costante dielettrica è legata alla variazione delle proprietà chimico-fisico del flusso e, in ultima analisi, al grado di vuoto.

3. SINTESI DEGLI STUDI PRECEDENTI

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 media della miscela [2].

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 RELAP5 [1], [2], sono stati ricavati gli intervalli di misura delle grandezze d'interesse 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].

Per la misura del grado di vuoto si è deciso di intraprendere lo sviluppo di un dispositivo basato sulla misura della variazione della costante dielettrica del fluido in presenza di fase liquida o vapore.

Il documento [6] riporta il progetto del primo prototipo di sonda capacitiva operante a freddo. Tale prototipo è costituito da un tubo in plexiglass dotato di 9 elettrodi esterni, posti su metà circonferenza, e un elettrodo centrale ed è stato dimensionato per operare a pressione e temperatura ambiente su deflussi bifase aria-acqua.

Sul primo prototipo sono state condotte alcune prove sia statiche che in deflusso bifase con lo scopo di verificare la fattibilità dell'impiego di uno strumento di questo tipo per la determinazione del grado di vuoto medio volumetrico.

Presso i laboratori SIET sono state condotte prove statiche di livello con la sonda disposta orizzontalmente [7]. Successivamente la sonda è stata testata nel laboratorio di Ingegneria Energetica del Politecnico di Torino in cui sono state condotte sia prove statiche di livello che prove in deflusso bifase aria-acqua con la sonda disposta in posizione verticale [8],[9].

Le prove in condizioni statiche hanno consentito di evidenziare una buona sensibilità della sonda nel rilevare la presenza d'acqua.

Le prove condotte presso il Politecnico di Torino hanno confermato i risultati e hanno consentito una prima analisi dei dati finalizzata alla definizione della correlazione tra il segnale elettrico e il grado di vuoto misurato.

I test sul prototipo a freddo, anche se complessivamente soddisfacenti, hanno evidenziato alcuni problemi riguardanti il basso rapporto segnale/rumore degli elettrodi e alcune incertezze su fenomeni di deriva del segnale, legati all'influenza di parametri ambientali ed elettromagnetici.

Tali problematiche erano imputabili sia all'architettura software, che gestisce il segnale di input/output, che all'architettura hardware (problemi di cablaggio elettrico, saldature fredde, circuiti stampati artigianali).

Successivamente è stato progettato e realizzato un secondo prototipo di sonda capacitiva per operare in condizioni di elevata pressione e temperatura [7].

Le condizioni di esercizio del prototipo operante a caldo (200°C e 15 bar) sono dettate dai valori di progetto del contenimento dell'impianto SPES3. Per operare a tali condizioni è stata utilizzata una tubazione in pyrex che costituisce il tubo in materiale isolante esternamente al quale sono fissati gli elettrodi. Per motivi di sicurezza, tale tubo è inserito in una tubazione metallica con la possibilità di essere pressurizzato dall'esterno.

Il documento [7] riporta le prove di collaudo alle condizioni di progetto dal punto di vista meccanico e di resistenza alla pressione e alla temperatura di esercizio della tubazione in pyrex inserita nella camicia metallica.

4. SONDA CAPACITIVA OPERANTE A CALDO

4.1 Struttura del prototipo a caldo

Il prototipo operante a caldo, mostrato in Figura 1, è costituito da:

- un tubo principale in pyrex con diametro esterno di 90 mm, spessore 5 mm e lunghezza 600 mm con condizioni massime di esercizio pari a 200°C e 15 bar;
- 16 elettrodi metallici lunghi 45 cm, disposti sulla superficie esterna del tubo in pyrex e distanziati angolarmente di 22,5°. Tre anelli in teflon mantengono gli elettrodi in posizione;
- un elettrodo centrale posto internamente al tubo in pyrex e supportato da crociere d'estremità;
- un tubo ausiliario in pyrex, che consente l'isolamento del tratto centrale;
- 4 barre filettate che supportano i circuiti stampati;
- 2 circuiti stampati dual layer sui quali sono alloggiati due banchi di reed relè per il pilotaggio degli elettrodi. I circuiti stampati per il prototipo a caldo sono stati realizzati, su disegno SIET, dalla Ci Pi Board (Figura 2 e 3) ditta specializzata nel settore.



Figura 1: Sonda capacitiva a caldo

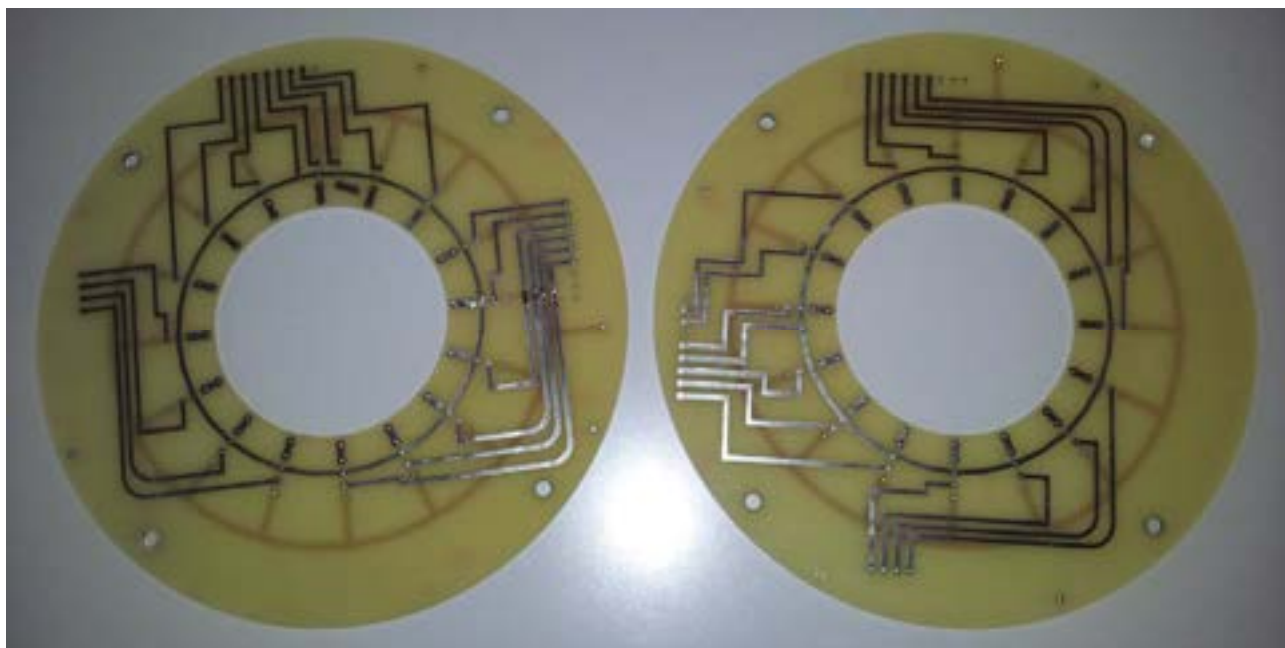


Figura 2: Circuiti stampati

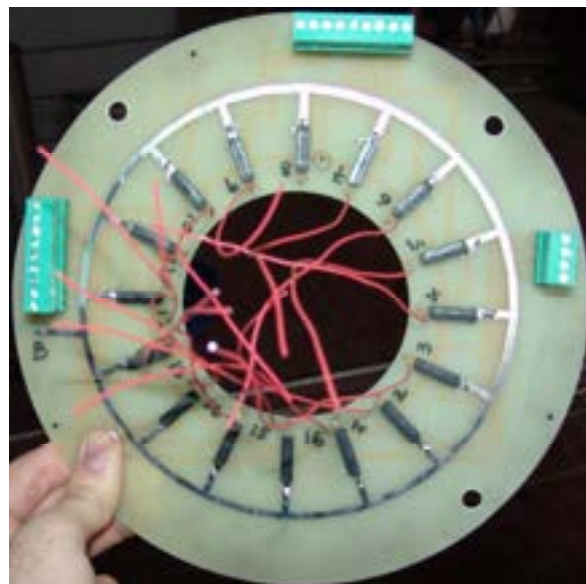
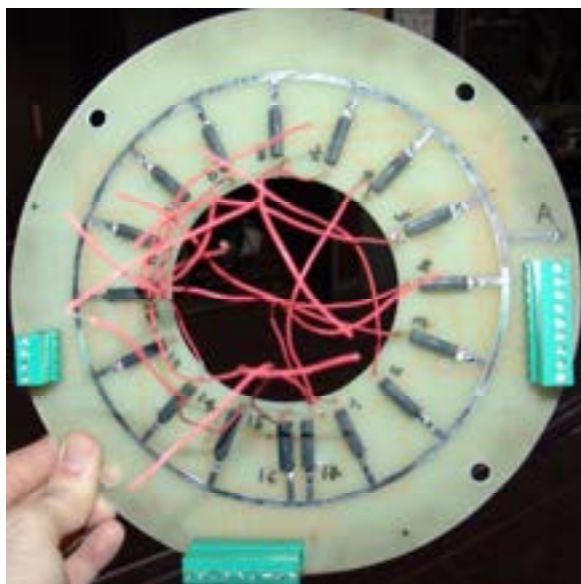


Figura 3 : Circuiti stampati con reed relè e cavi di connessione agli elettrodi

Il tubo in pyrex è alloggiato all'interno di un contenitore in acciaio di diametro interno di 267 e spessore 3,2 mm (Figura 4). La funzione del contenitore in acciaio è quella di preservare l'incolumità degli operatori nel caso in cui si verifichi una rottura del tubo in pyrex o una perdita di vapore significativa da una delle tenute tra pyrex e acciaio.

Il contenitore è progettato per le stesse condizioni di esercizio del tubo in pyrex (15 bar e 200°C) che si possono verificare al suo interno in caso di rottura del pyrex. Le prove di collaudo a pressione e temperatura sono riportate nel documento [7].

All'interno della intercapedine tra il tubo in pyrex e il contenitore in acciaio sono installati due solenoidi in tubo di rame (Figura 5) alimentati con acqua fredda che ricoprono completamente la superficie interna del contenitore in acciaio e che garantiscono il raffreddamento della zona che contiene i circuiti stampati.

Un aspetto critico per l'elettronica è rappresentato dalla temperatura che si realizza tra il tubo in pyrex e il contenimento esterno. La temperatura massima sopportabile dai reed relè, infatti, è di 70°C; pertanto è fondamentale che non venga superata.

Una termocoppia è stata posizionata in corrispondenza dei reed relè della basetta inferiore per monitorare in tempo reale la temperatura a cui è sottoposta l'elettronica (Figura 6).



Figura 4: Contenitore in acciaio di sicurezza

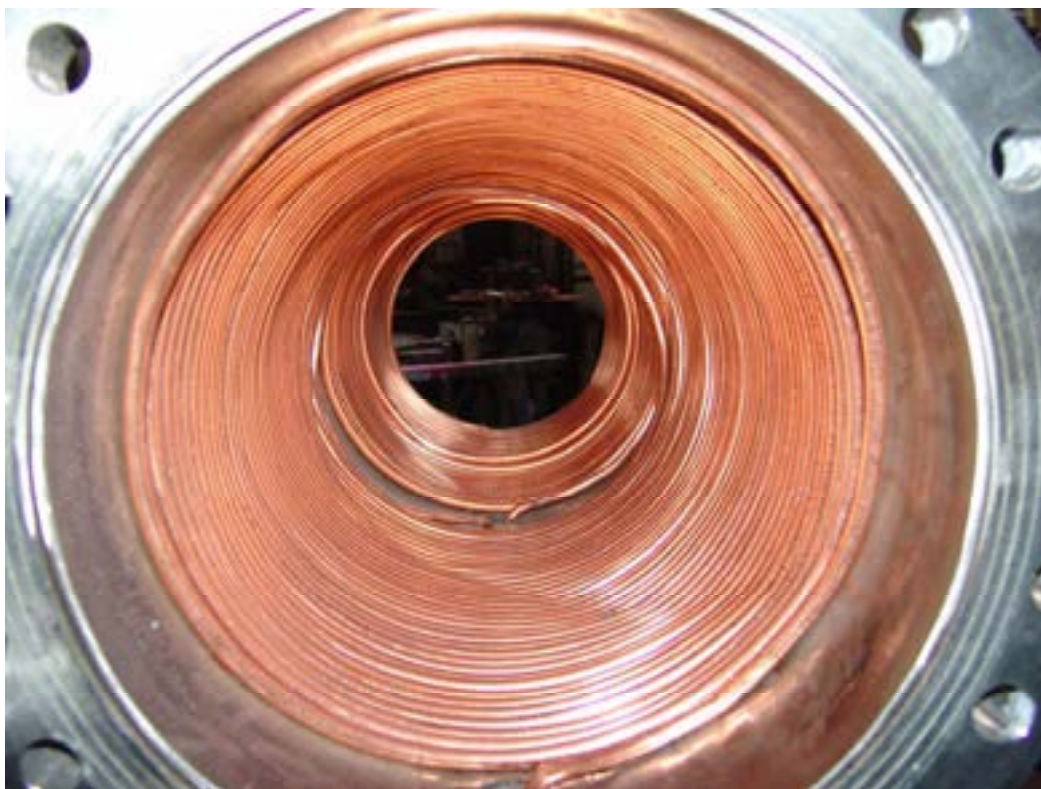


Figura 5: Solenoidi in rame per il raffreddamento della zona contenente i circuiti stampati



Figura 6: Termocoppia sul fondello inferiore del contenitore di sicurezza della sonda

4.2 Elettronica e sistema acquisizione dati

Il principio di funzionamento della sonda capacitiva, illustrato nel documento [7], si basa sulla misura dell'impedenza elettrica del volume di fluido compreso tra gli elettrodi da cui si possono ricavare informazioni sulle proprietà fisiche del fluido stesso.

Ad una variazione del grado di vuoto volumetrico medio, ovvero ad una variazione della distribuzione delle fasi liquido e vapore, corrisponde una diversa distribuzione della costante dielettrica del mezzo e di conseguenza una diversa differenza di potenziale misurata tra gli elettrodi.

Nel prototipo a caldo, i 17 elettrodi (16 periferici e 1 centrale) vengono attivati a coppie secondo tutte le combinazioni possibili. I segnali così ottenuti vengono correlati al grado di vuoto medio volumetrico.

Lo schema elettrico della sonda capacitiva a caldo è riportato in Figura 7.

La generazione del segnale di alimentazione degli elettrodi è affidata ad un calibratore FLUKE 5500 A.

Per tutte le prove il segnale di alimentazione è mantenuto ad un valore di tensione RMS di 5 V con una frequenza di 25 kHz.

Sia il comando degli elettrodi che la lettura del segnale di output sono gestiti da una scheda di acquisizione multifunzionale USB-6259 della National Instrument.

Tale dispositivo è pilotato da un software scritto appositamente per la sonda capacitiva dalla ditta WINTEK, società specializzata nel signal processing.

Le funzioni di misura del segnale ricevuto dai sensori sono state progettate ed implementate ad hoc per il caso in esame in modo da garantire il più alto rapporto possibile segnale/rumore, aspetto critico della tecnologia utilizzata nelle prove del prototipo a freddo, e la minore incertezza di misura.

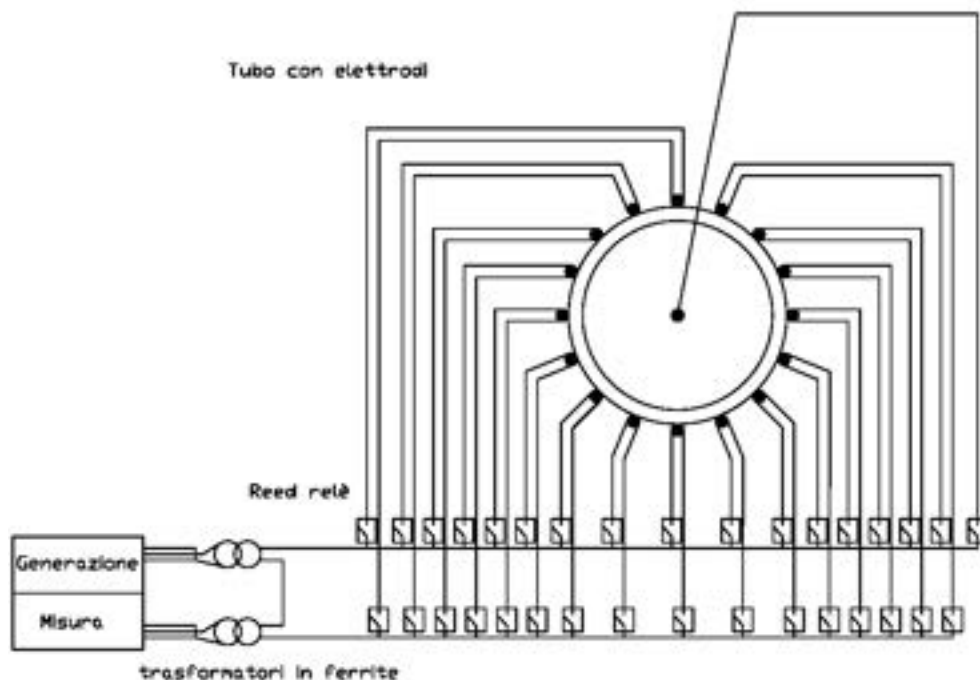


Figura 7: Schema elettrico sonda capacitiva a caldo

Il software definisce la sequenza di attivazione delle coppie di elettrodi, secondo tutte le combinazioni possibili (256).

A seconda della sequenza di prove implementate, la scheda di acquisizione multifunzionale genera in uscita tensioni continue di 5 V che consentono di comandare la chiusura dei reed relè miniaturizzati che attivano le coppie di elettrodi corrispondenti.

L'unità d'acquisizione legge il segnale misurato dalle coppie di elettrodi ad alta frequenza (250 kHz) con una frequenza di campionamento "sampling rate" di 500000 Segnali/s e ne calcola il valore RMS. Il programma permette di visualizzare in tempo reale il valore RMS e lo spettro del segnale campionato.

I segnali di output degli altri strumenti di misura presenti nella sezione di prova, ovvero le termocoppie, il misuratore di pressione, la cella di carico e il flussometro ad accelerazione di Coriolis sono gestiti da un sistema acquisizione dati AGILENT 34970 (Figura 8). I segnali analogici degli strumenti sono acquisiti contemporaneamente e alla frequenza di una acquisizione al secondo.



Figura 8: SAD strumentazione della sezione di prova

4.3 Sezione orizzontale di prova

La sezione orizzontale di prova, mostrata nel disegno 077.01.02 (Allegato 1) e in Figura 9, ha lunghezza totale di circa 4650 mm.

E' compresa tra due elettrovalvole a sfera a chiusura rapida che vengono utilizzate per intercettare un volume di controllo. Su tale volume viene effettuata, per pesatura, la misura del grado di vuoto volumetrico medio di sezione, della miscela bifase.

La sonda capacitiva si trova al centro della sezione orizzontale, all'interno del contenitore in acciaio di 1240 mm di lunghezza.

A monte della sonda capacitiva, un tratto lungo 630 mm e con diametro interno di 76,2 mm, consente la preparazione della miscela bifase acqua-vapore (Figura 10). Il tratto è compreso tra la flangia dell'elettrovalvola, a monte della sonda, e la flangia del contenitore in acciaio in cui è alloggiata la sonda.

In tale tratto, è presente un manometro per la misura della pressione interna alla sezione di prova e una linea per il drenaggio del fluido, che si distacca dalla generatrice inferiore ed è provvista di una valvola manuale.

Inoltre, sulla sommità, è posta una valvola di sicurezza a scarico convogliato con pressione di scatto di 10 bar.

A valle della sonda è inserito un tratto a T di lunghezza 280 mm, che costituisce la sezione di prova del misuratore di flusso di quantità di moto (Figura 11), le cui prove di collaudo si sono state eseguite contestualmente a quelle della sonda capacitiva [10].

Un ultimo tratto di circa 350 mm collega la sezione di prova del misuratore di flusso della quantità di moto alla elettrovalvola di uscita del circuito sperimentale. Su tale tratto è installata una termocoppia per la misura della temperatura del fluido bifase, una valvola di sfiato, collocata sulla parte superiore del tubo ed utilizza per avere una indicazione visiva sulla secchezza del vapore, e una presa d'aria compressa per facilitare la rimozione del fluido intercettato dalle valvole rapide in sede di misura (Figura 11).

La sezione di prova poggia su un bancale alto 700 mm, leggermente inclinato sia per favorire la formazione di un film liquido sulla superficie inferiore della sonda al fine di simulare un moto stratificato tipico dei transitori incidentali in SPES3 sia per facilitare il drenaggio di fluido bifase dopo la chiusura delle valvole rapide.



Figura 9: Sezione di prova orizzontale

L'uscita dalla sezione di prova è connessa ad una tubazione di scarico tramite un flessibile in gomma, resistente ad alte temperature e pressioni, e può essere intercettata con una valvola manuale a saracinesca, posta a valle della valvola rapida d'uscita.

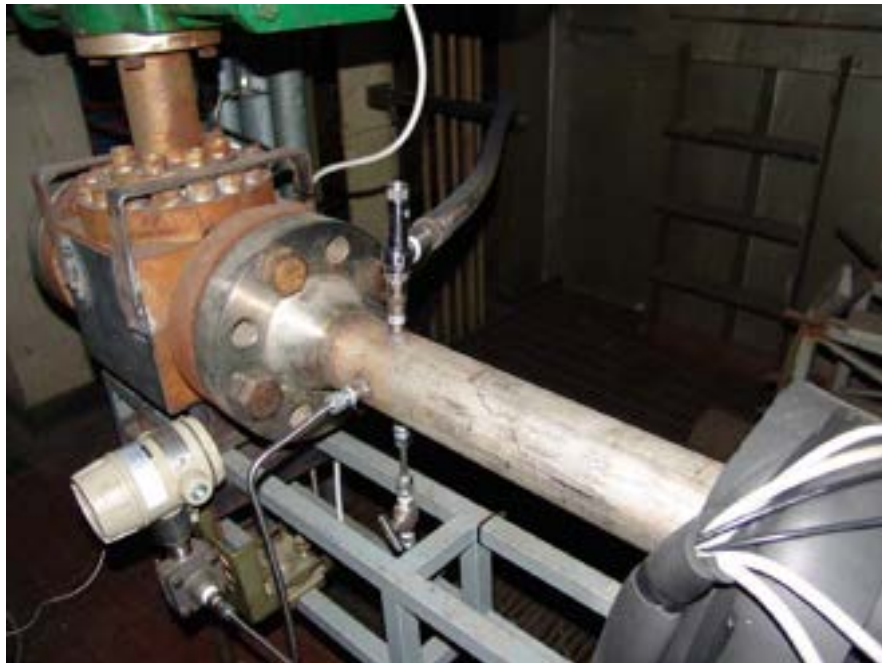


Figura 10: Tratto a monte della sonda: valvola di sicurezza, manometro e presa per il drenaggio



Figura 11: Tratto a valle della sonda: drag disk, termocoppia, presa per l'aria compressa

L'acqua di alimentazione dei solenoidi in rame e della serpentina interna al condensatore proviene dal serbatoio a gravità, che alimenta tutto l'impianto.

Il fluido di raffreddamento è convogliato, tramite un tubo flessibile, all'ingresso del condensatore dove incontra, in controcorrente, il vapore drenato dalla sezione di prova. Successivamente si dirama nelle due linee di adduzione, che garantiscono il raffreddamento dell'elettronica della sonda (Allegato 2).

4.4 Preparazione della miscela bifase

Il vapore utilizzato nella sezione di prova della sonda capacitiva è prodotto nell'impianto denominato "circuito prova barre". Lo schema di flusso è riportato nell'Allegato 2. Tale impianto, realizzato per verificare il corretto funzionamento delle barre scaldanti da utilizzare nell'impianto SPES3, è costituito da un circuito principale che ospita le barre scaldanti, un pressurizzatore, uno scambiatore e un circuito di simulazione dell'Emergency Boration Tank di reattori nucleari tipo SMR [11].

Per la nostra applicazione è stato utilizzato il circuito principale e il pressurizzatore cilindrico posto sulla sommità del circuito principale, al fine di produrre vapore saturo da utilizzare nella sezione di prova della sonda capacitiva.

Il circuito è alimentato da una pompa a pistoncini a portata variabile (detta pompa IMAMI) e la portata in ingresso è misurata attraverso un flussometro ad accelerazione di Coriolis. La produzione di vapore avviene grazie alle barre scaldanti, alimentate con energia elettrica, che possono conferire al fluido una potenza massima di 120 kW.

Dal circuito prova barre vengono spillati acqua e vapore: il vapore dalla sommità del pressurizzatore, mentre il liquido dal fondo del circuito. La portata bifase è ottenuta miscelando, attraverso valvole a spillo manuali, le portate delle fasi liquido e vapore provenienti dall'impianto prova barre (Figura 12).

La portata e il titolo di vapore prodotto possono essere dedotti dal bilancio di massa e di energia del sistema.



Figura 12: Sezione per la preparazione della miscela bifase

4.5 Determinazione della portata e del titolo della miscela bifase all'ingresso della sezione di prova

La portata bifase all'ingresso della sezione di prova è ottenuta miscelando acqua e vapore spillati dal circuito dell'impianto prova barre.

La portata massica bifase $\dot{m}_{TP}$ all'ingresso della sezione di prova della sonda capacitiva è pari a:

$$\dot{m}_{TP} = \dot{m}_L - \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

In cui $\dot{m}_L$ rappresenta la portata di liquido in ingresso nel circuito prova barre fornita dalla pompa a pistoncini e misurata attraverso il flussometro ad accelerazione di Coriolis posto sulla linea di alimentazione del circuito.

Il termine $\frac{dm}{dt}$ rappresenta la variazione di massa all'interno del circuito prova barre ed è pari a:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dl \cdot A \cdot (\rho_L - \rho_V)}{dt} \quad (2)$$

dove:

- A : sezione media della zona verticale di circuito dell'impianto prova barre.
- dl : variazione del livello di liquido all'interno del serbatoio, registrato tramite un misuratore di livello.
- ρ_L, ρ_V : densità delle due fasi alle condizioni di temperatura e pressione del fluido all'interno dell'impianto prova barre.

Per la determinazione del titolo della miscela basta combinare l'equazione (1) con l'equazione di conservazione dell'energia del sistema:

$$\dot{m}_{TP} h_{TP} = \dot{m}_L h_L - \frac{d}{dt} (m_S \cdot c_{PS} \cdot t_S + m_{LS} h_{LS} + m_{VS} h_{VS}) \quad (3)$$

dove:

- $\dot{m}$: portata massica,
- h : entalpia
- c_p : calore specifico

ed il significato dei pedici è il seguente:

- TP two Phase
- LS liquido saturo
- VS vapor saturo.

Sotto l'ipotesi di sistema adiabatico, il termine $\frac{d}{dt} (m_S \cdot c_{PS} \cdot t_S)$, dovuto all'accumulo di potenza termica della struttura dell'impianto, può essere considerato trascurabile per cui:

$$\dot{m}_{TP} h_{TP} = \dot{m}_L h_L - \frac{dm_{LS}}{dt} h_{LS} - \frac{dm_{VS}}{dt} h_{VS} \quad (4)$$

I termini $\frac{dm_{LS}}{dt}$ e $\frac{dm_{VS}}{dt}$ si ottengono dalle seguenti equazioni:

$$\frac{dm_{LS}}{dt} = A \cdot \frac{dl}{dt} \cdot \rho_{LS} \quad (5)$$

$$\frac{dm_{VS}}{dt} = A \cdot \frac{dl}{dt} \cdot \rho_{VS} \quad (6)$$

Combinando le equazioni precedenti si ottiene una equazione che permette di calcolare l'unica incognita rimasta, rappresentata dall'entalpia h_{TP} della miscela bifase.

Nota l'entalpia della miscela bifase si ricava il titolo termodinamico x :

$$x = \frac{h_{TP} - h_{LS}}{h_{VS} - h_{LS}}$$

4.6 Misura del grado di vuoto attraverso valvole rapide

La misurazione del grado di vuoto medio di sezione, fondamentale per la caratterizzazione della sonda capacitiva, avviene, come già detto, con l'ausilio di valvole rapide.

Si tratta di valvole a sfera ad attuazione pneumatica, dotate di serbatoi d'accumulo dell'aria compressa e di valvole per lo scarico rapido dell'aria compressa. Il tempo di manovra di tali valvole è inferiore al secondo. Per garantire la sincronizzazione del movimento, le due valvole sono accoppiate da un cinematismo che impone la simultaneità del movimento.

La tecnica si basa sulla pesatura della massa di fluido condensata intercettata all'interno della sezione di prova dalla chiusura simultanea delle valvole rapide.

Il grado di vuoto medio lungo una tubazione è definito come il rapporto tra il volume occupato dal vapore ed il volume totale del tratto considerato:

$$\alpha = \frac{V_v}{V_v + V_L} = \frac{V_v}{V_T}$$

La procedura sperimentale per la determinazione del grado di vuoto volumetrico medio è così articolata:

1. si raggiungono le condizioni termoidrauliche desiderate (portata, temperatura, pressione);
2. si registrano i segnali della sonda capacitiva;
3. si chiudono le valvole rapide;
4. si apre il drenaggio e la massa di vapore viene fatta completamente condensare mentre l'eventuale frazione liquida viene raffreddata;
5. si inietta aria compressa all'interno della sezione di prova per svuotarla completamente del fluido intercettato;
6. si pesa il liquido proveniente dalla condensazione e dal raffreddamento con una bilancia da laboratorio (Figura 13).

La massa totale di liquido condensato è pari alla somma della massa della fase liquida e della fase vapore:

$$M_T = m_L + m_V$$

Il volume di controllo intercettato dalle valvole rapide è noto ed è pari a V_T . E' possibile scrivere l'equazione:

$$V_T = v_L m_L + v_V m_V$$

In cui v_L e v_V rappresentano rispettivamente il volume specifico della fase liquida e della fase vapore ricavabili dalla conoscenza della temperatura e pressione del fluido bifase.

Combinando le due equazioni si ottengono le masse delle due fasi. Note le masse si ricava il grado di vuoto medio volumetrico α della relazione:

$$\alpha = \frac{v_V m_V}{v_V m_V + v_L m_L}$$

La precisione del metodo di misura è strettamente legato a due requisiti fondamentali:

- la massa di fluido bifase non deve cambiare durante il transitorio di chiusura delle valvole.
- il drenaggio del fluido dalla sezione di prova deve essere il più accurato possibile.

Riguardo al primo requisito, un punto critico potrebbe essere rappresentato dalla chiusura asincrona delle valvole. Il ritardo nella chiusura di una delle due valvole infatti può determinare, infatti, una sovrastima o una sottostima (a seconda della valvola) della massa di fluido totale intercettata.

Per ovviare a questo problema è stato realizzato un cinematismo che permette di sincronizzare l'apertura e la chiusura delle valvole.

Il cinematismo, basato su un sistema biella-manovella, è costituito da due lamiere a C imbullonate ai perni delle valvole e orientate a 45° rispetto all'asse della valvola, alle cui estremità sono connesse due aste, che collegano direttamente le valvole costringendole a ruotare simultaneamente.

Per ottimizzare il drenaggio del fluido, la sezione di prova è leggermente inclinata e la presa per il drenaggio è posta nel punto più basso della tubazione. Inoltre, in prossimità della valvola d'uscita, è posta una presa per l'aria compressa da utilizzare per convogliare forzatamente il fluido all'interno del condensatore.

Complessivamente, sebbene il tempo di misura sia piuttosto lungo e le equazioni valgano teoricamente per una condizione di canale adiabatico, tale metodo permette di avere un valore accurato di grado di vuoto.



Figura 13: Condensatore e bilancia da laboratorio

5. PROVE SPERIMENTALI

Il prototipo a caldo è stato testato presso i laboratori SIET, sia in condizioni statiche che in condizioni di deflusso bifase acqua-vapore.

Le prove statiche sono servite per la messa a punto dell'elettronica e del sistema di acquisizione dati.

Inoltre, hanno consentito di valutare la sensibilità della sonda alle variazioni di livello del liquido all'interno del volume di controllo e la ripetibilità dei segnali elettrici.

Le prove dinamiche hanno permesso di caratterizzare la sonda nelle reali condizioni di esercizio di temperatura e pressione.

5.1 Prove statiche di livello

Per effettuare le prove statiche la sonda è stata disposta verticalmente dopo avere chiuso con una flangia cieca l'estremità inferiore, ed è stata riempita progressivamente con acqua fino a coprire completamente la zona caratterizzata dalla presenza degli elettrodi.

Le prove sono state effettuate con acqua demineralizzata e il livello di liquido è stato misurato a partire dall'altezza degli elettrodi.

La Tabella 1 mostra la matrice sperimentale delle prove, caratterizzata da un ciclo di riempimento seguito da uno di svuotamento per valutare la ripetibilità del segnale.

Prova	Livello [cm]	
1	-5	aria
2	0	aria
3	5	salita
4	10	salita
5	15	salita
6	20	salita
7	25	salita
8	30	salita
9	35	salita
10	40	salita
11	45	salita
12	50	salita
13	45	discesa
14	40	discesa
15	35	discesa
16	30	discesa
17	25	discesa
18	20	discesa
19	15	discesa
20	10	discesa
21	5	discesa
22	0	aria
23	-5	aria

Tabella 1: Matrice sperimentale prove di livello

I grafici seguenti (da Figura 14 a Figura 30) mostrano l'andamento del segnale in funzione del livello di liquido presente all'interno del volume di controllo per alcune coppie di elettrodi orientate rispettivamente a 22,5°, 45°, 90° e 180°.

I segnali riportati nei grafici sono la media dei segnali ottenuti nei 5 cicli di misura effettuati. In legenda, per ogni serie, sono riportati l'angolo tra gli elettrodi e la coppia di elettrodi attivi.

Il livello è misurato a partire dall'altezza degli elettrodi, per cui il livello zero identifica il punto di inizio inferiore degli elettrodi e il livello quarantacinque il punto di fine.

Un livello inferiore a zero centimetri significa assenza di liquido, mentre per livelli superiori a quarantacinque centimetri il volume di controllo è interessato dalla presenza di sola acqua.

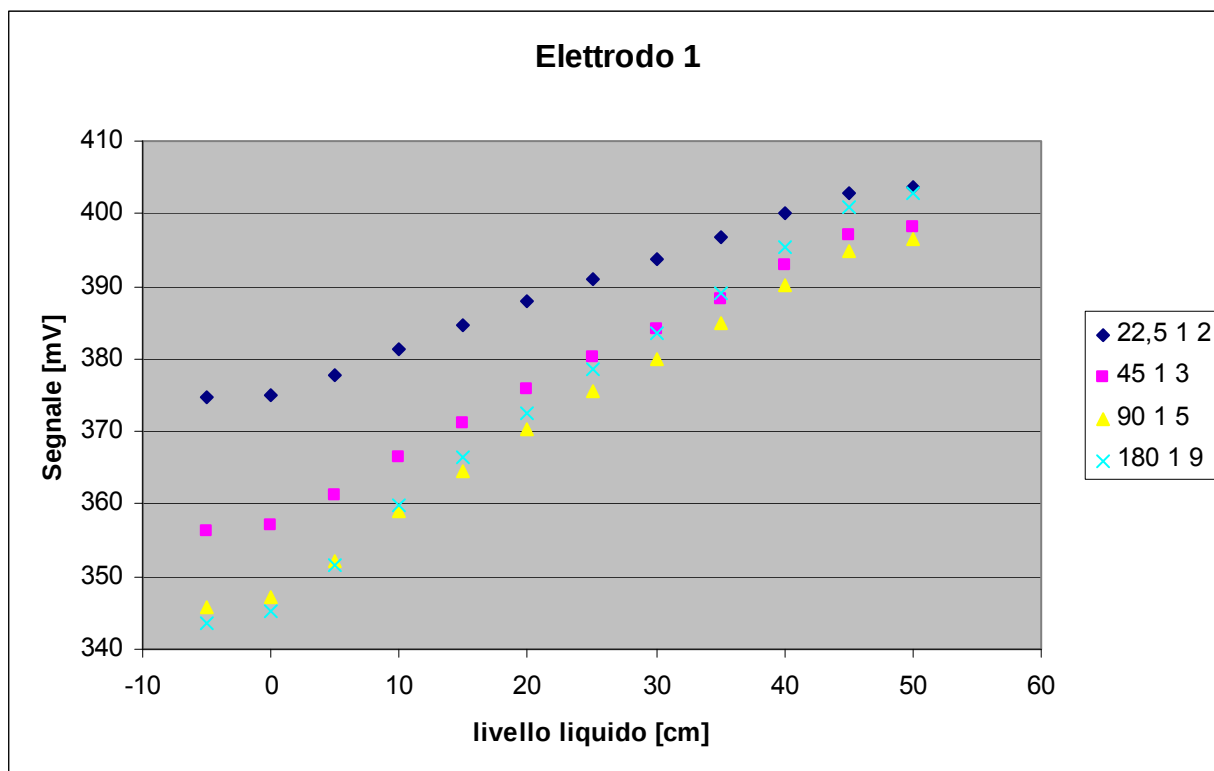


Figura 14: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 1

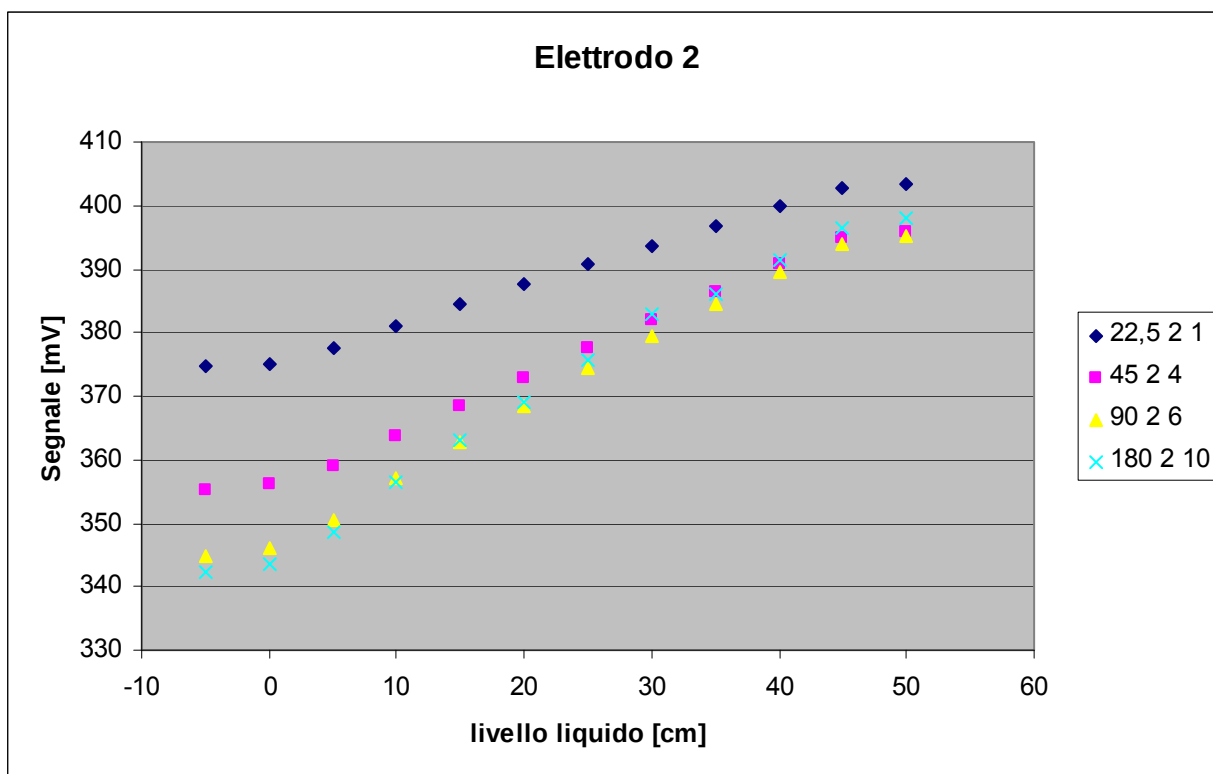


Figura 15: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 2

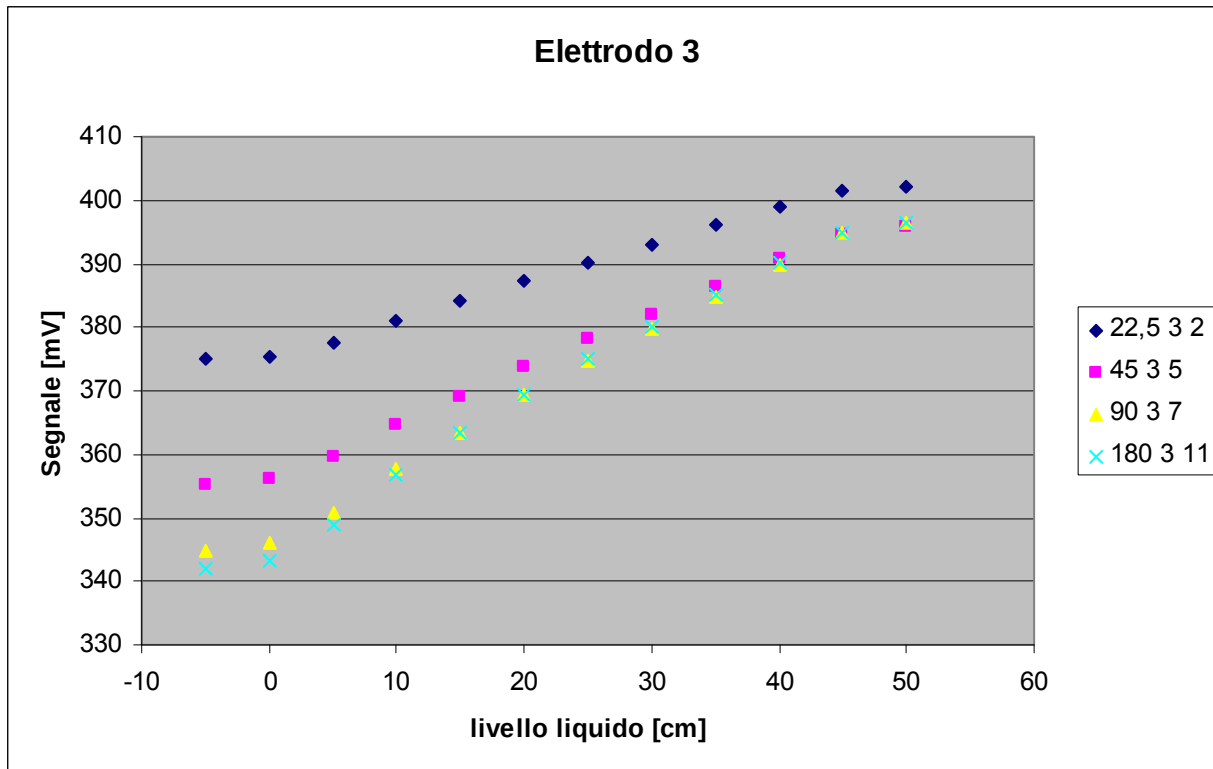


Figura 16: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 3

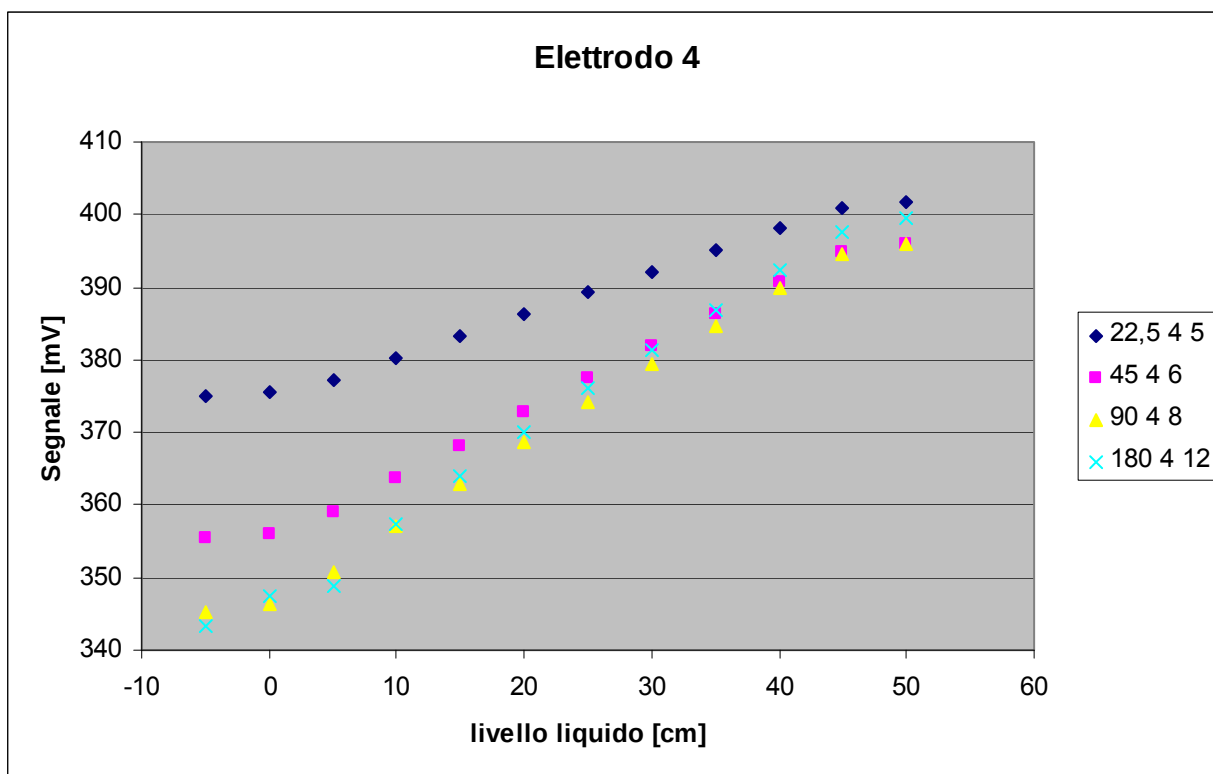


Figura 17: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 4

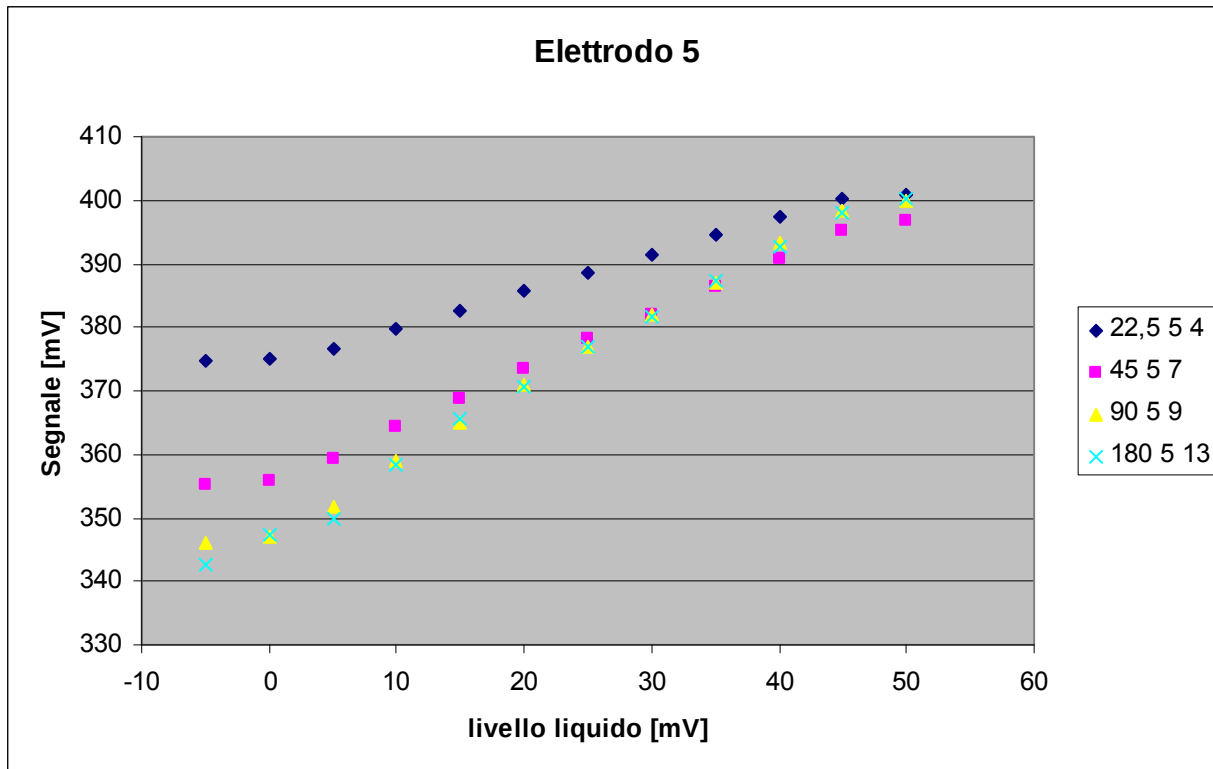


Figura 18: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 5

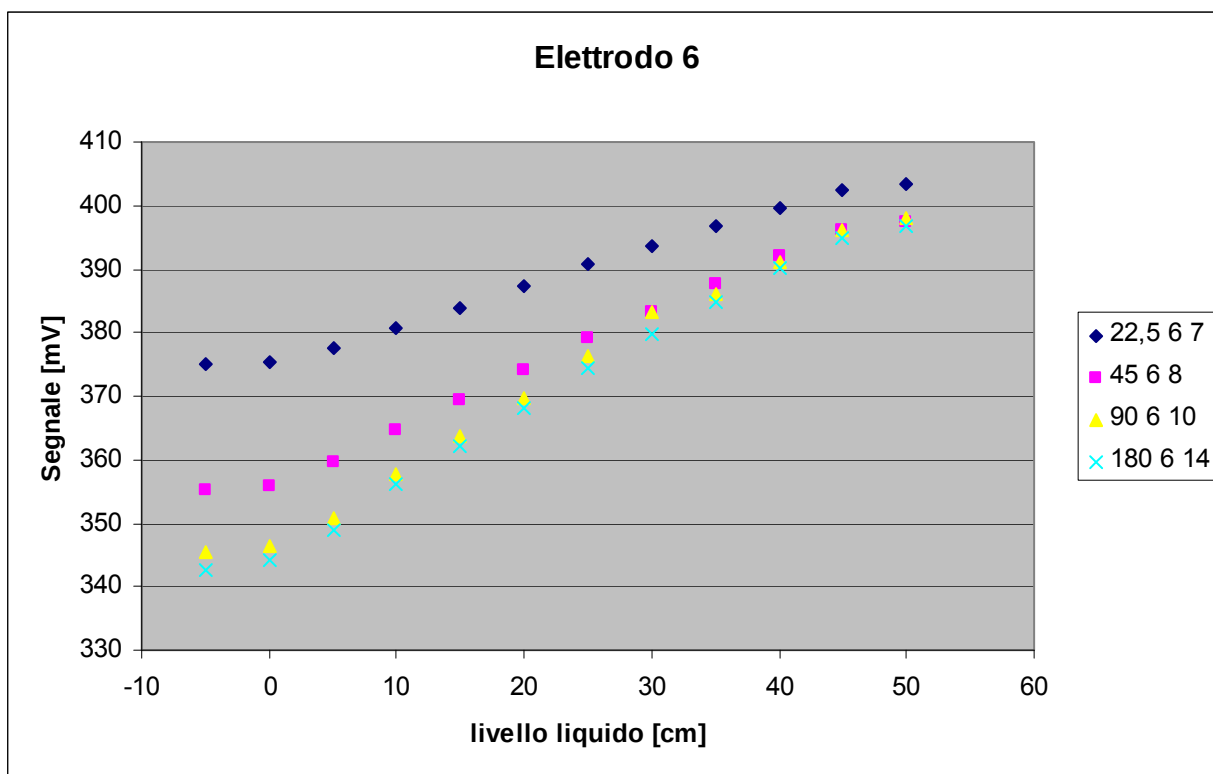


Figura 19: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 6

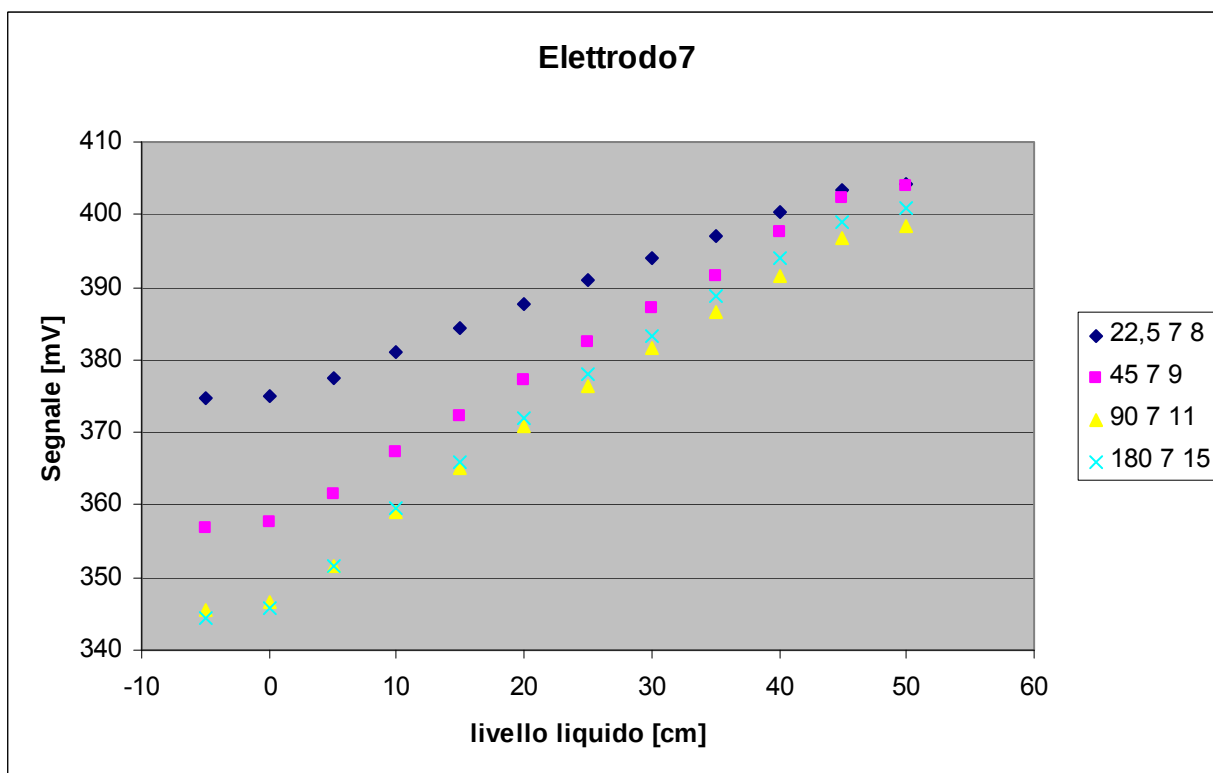


Figura 20: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 7

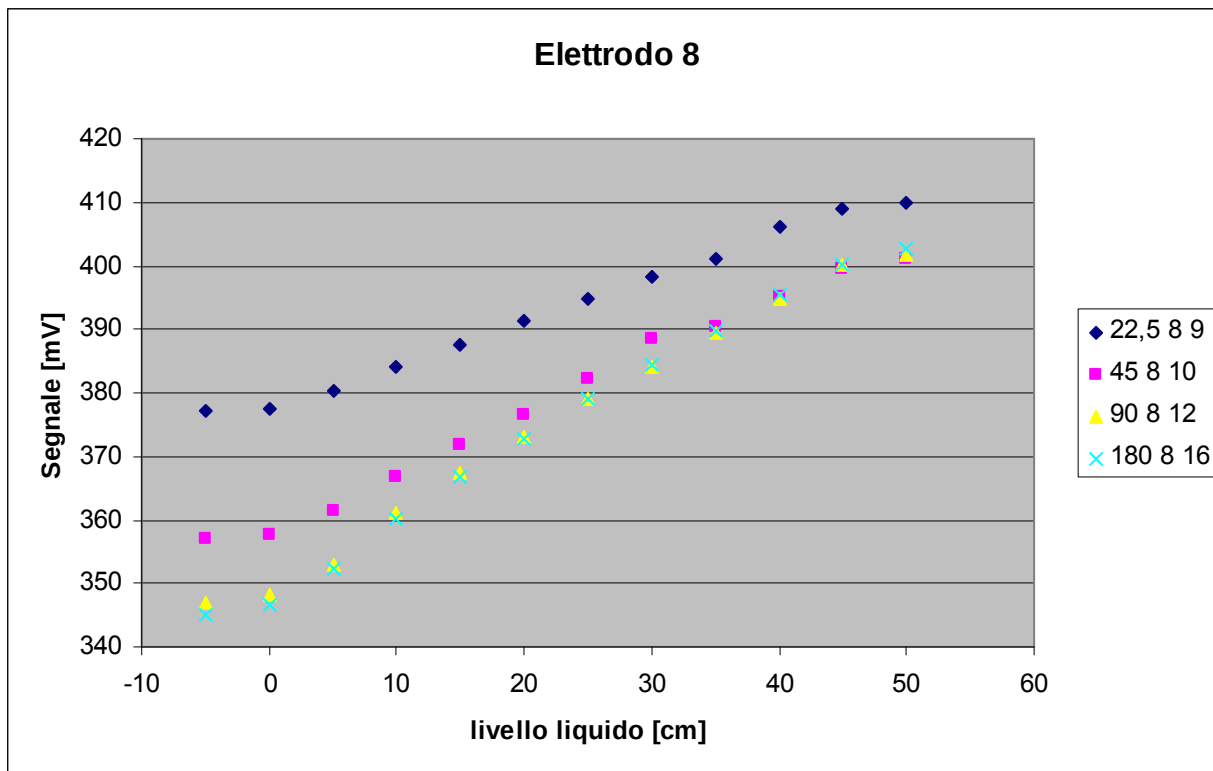


Figura 21: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 8

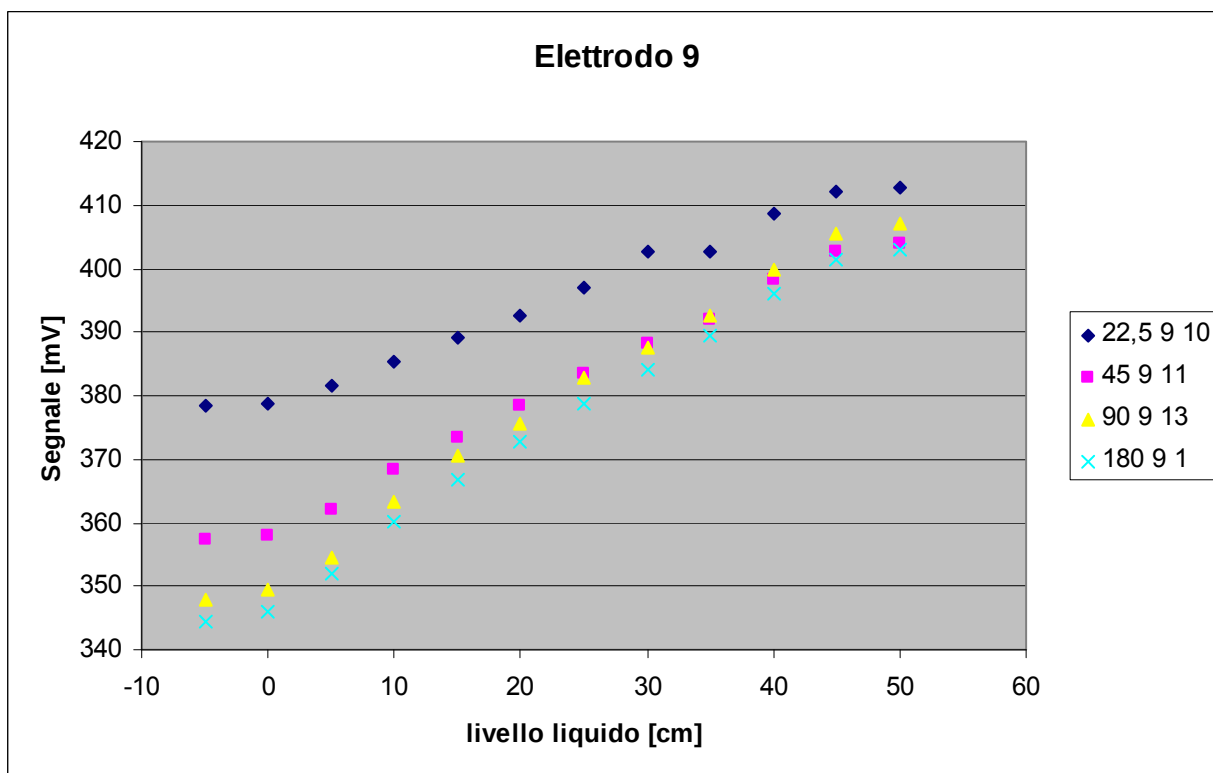


Figura 22: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 9

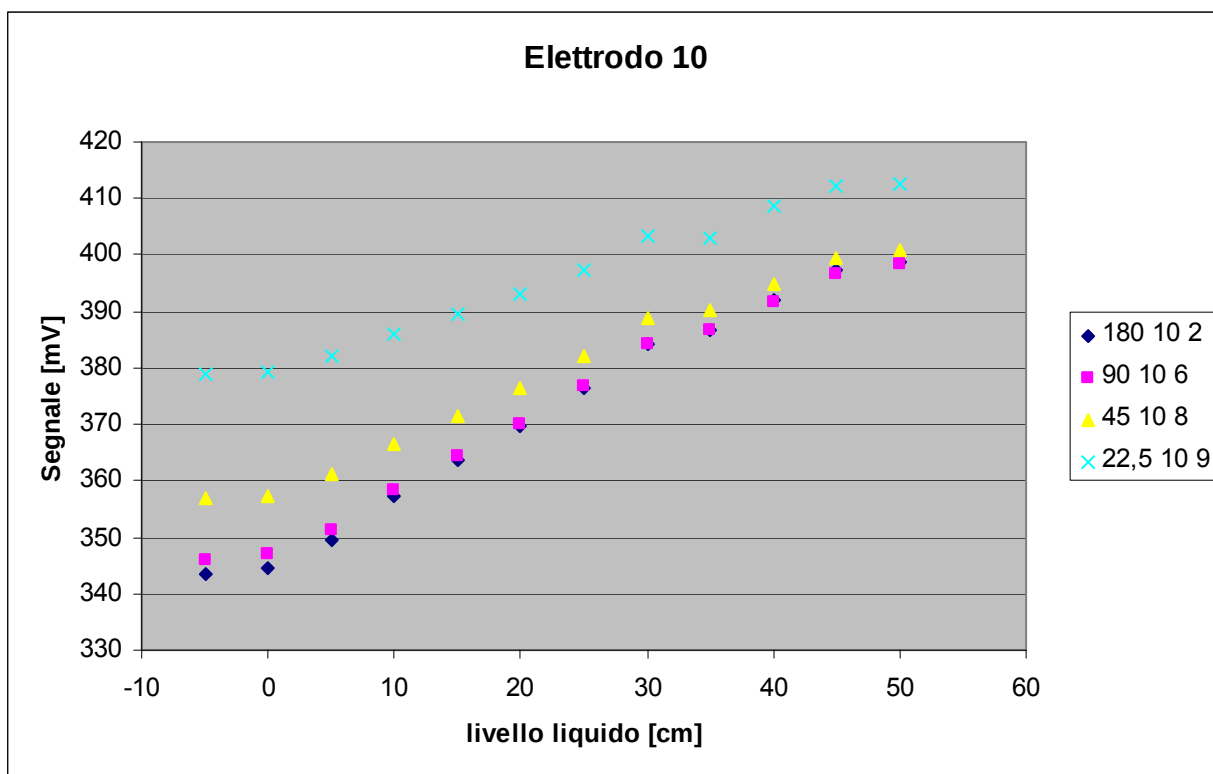


Figura 23: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 10

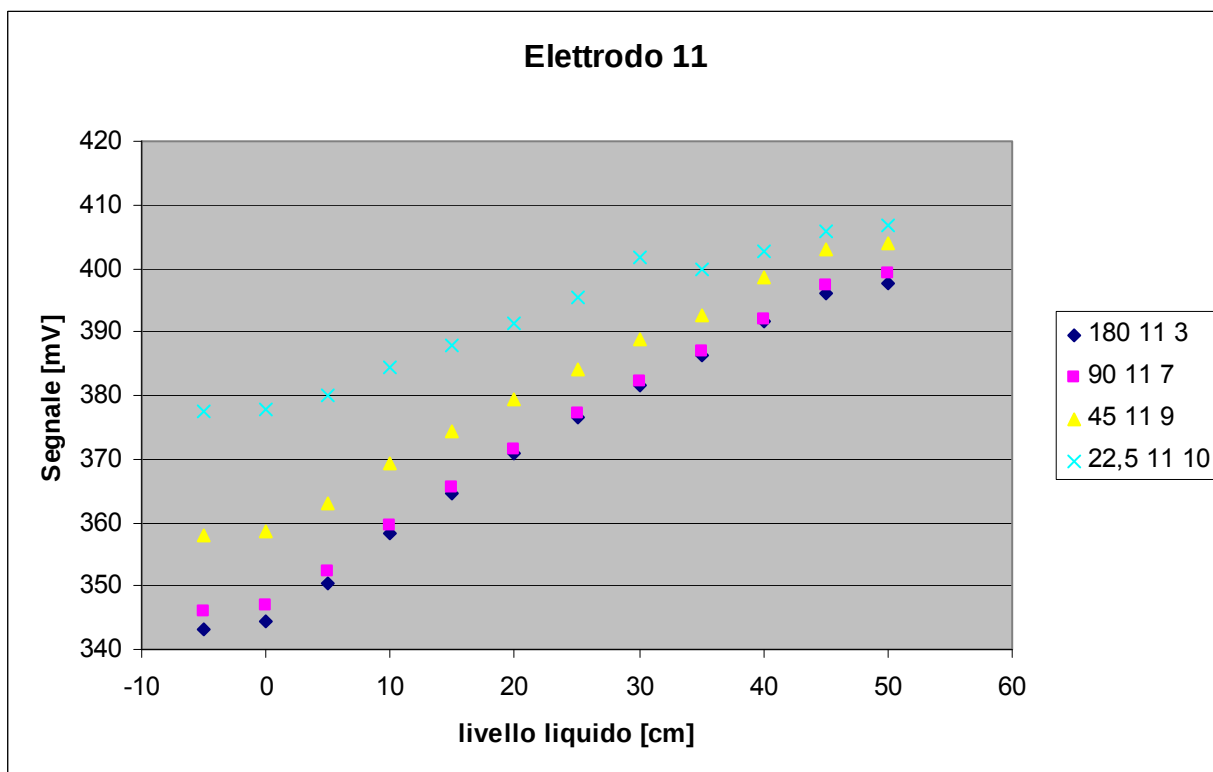


Figura 24: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 11

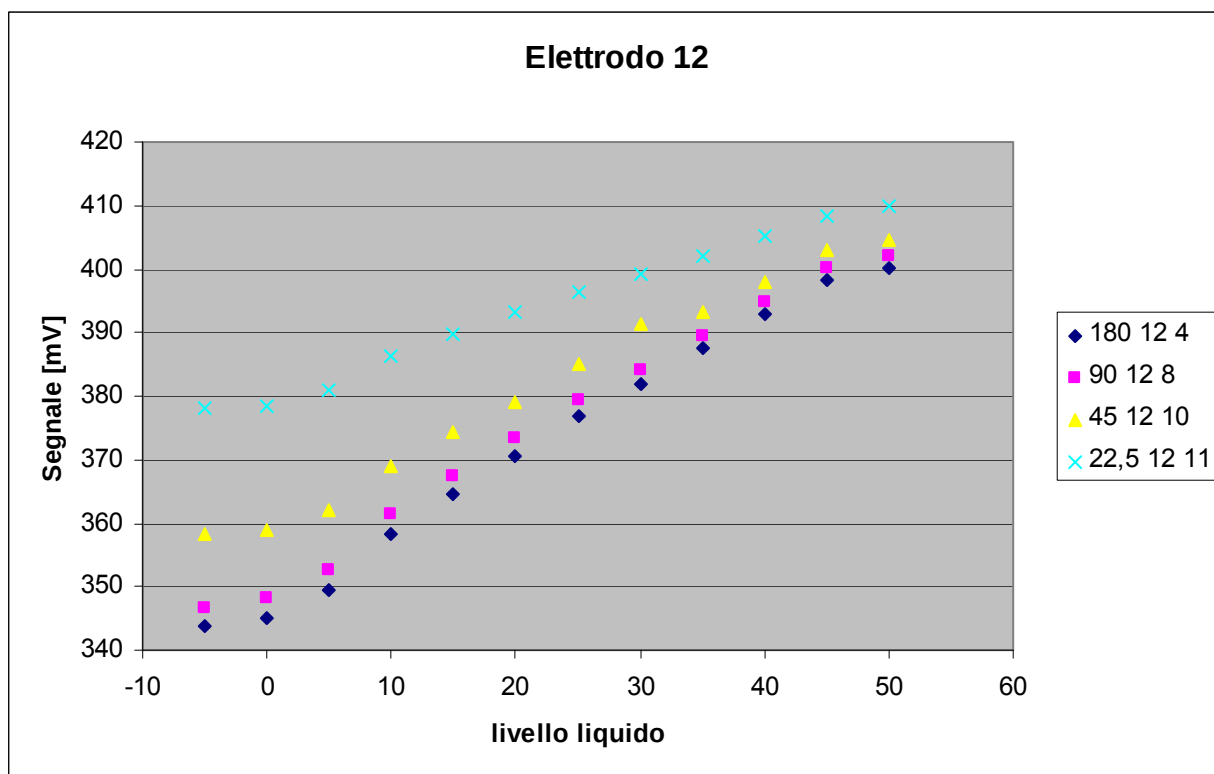


Figura 25: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 12

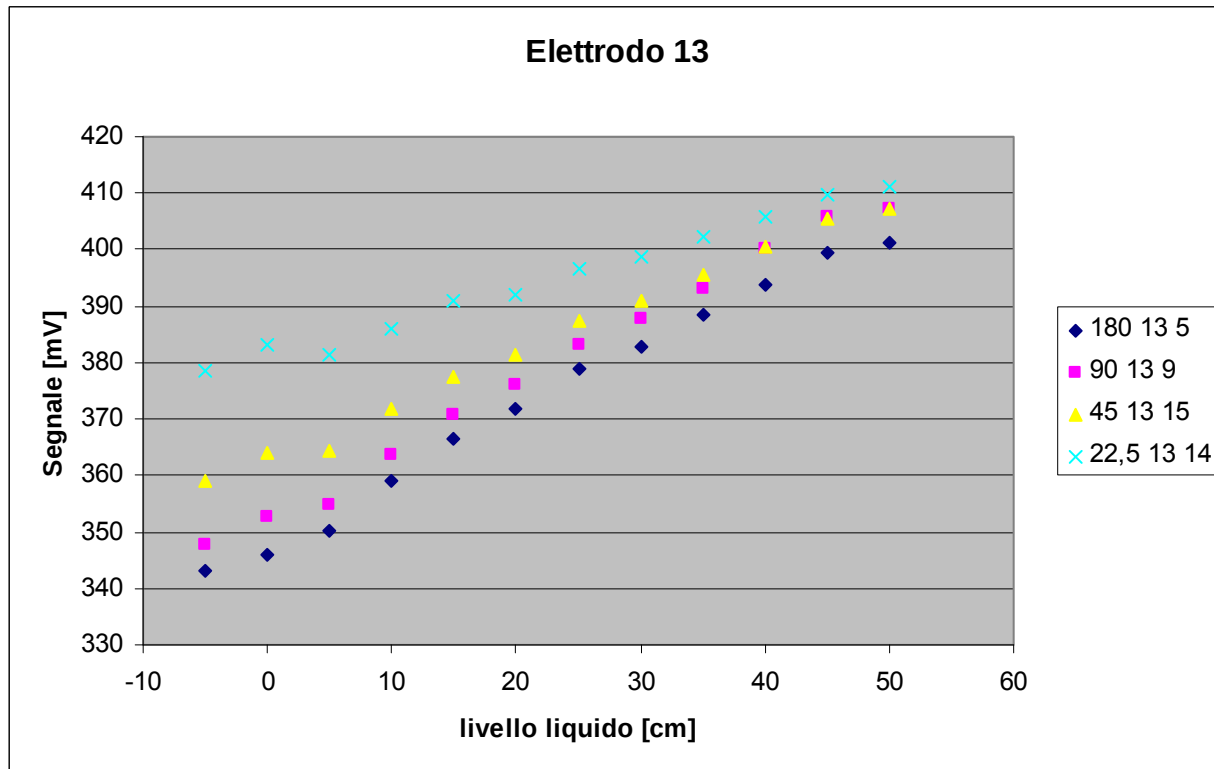


Figura 26: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 13

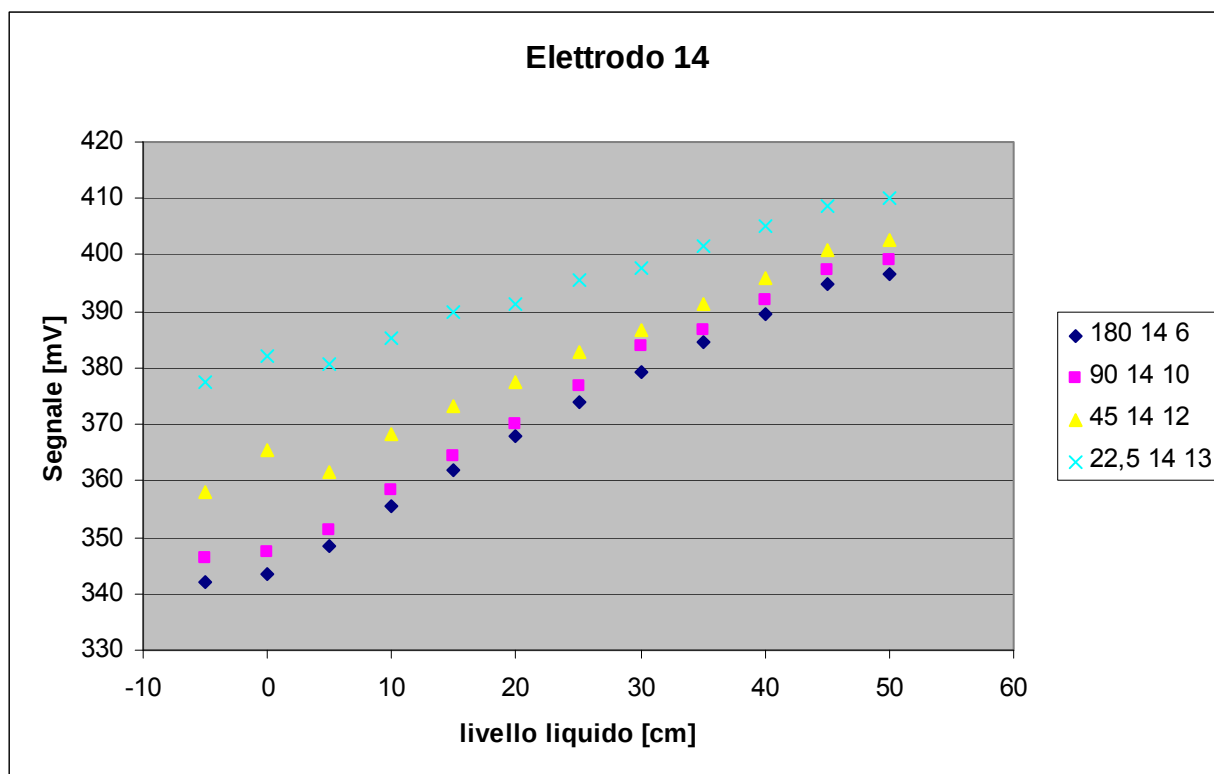


Figura 27: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 14

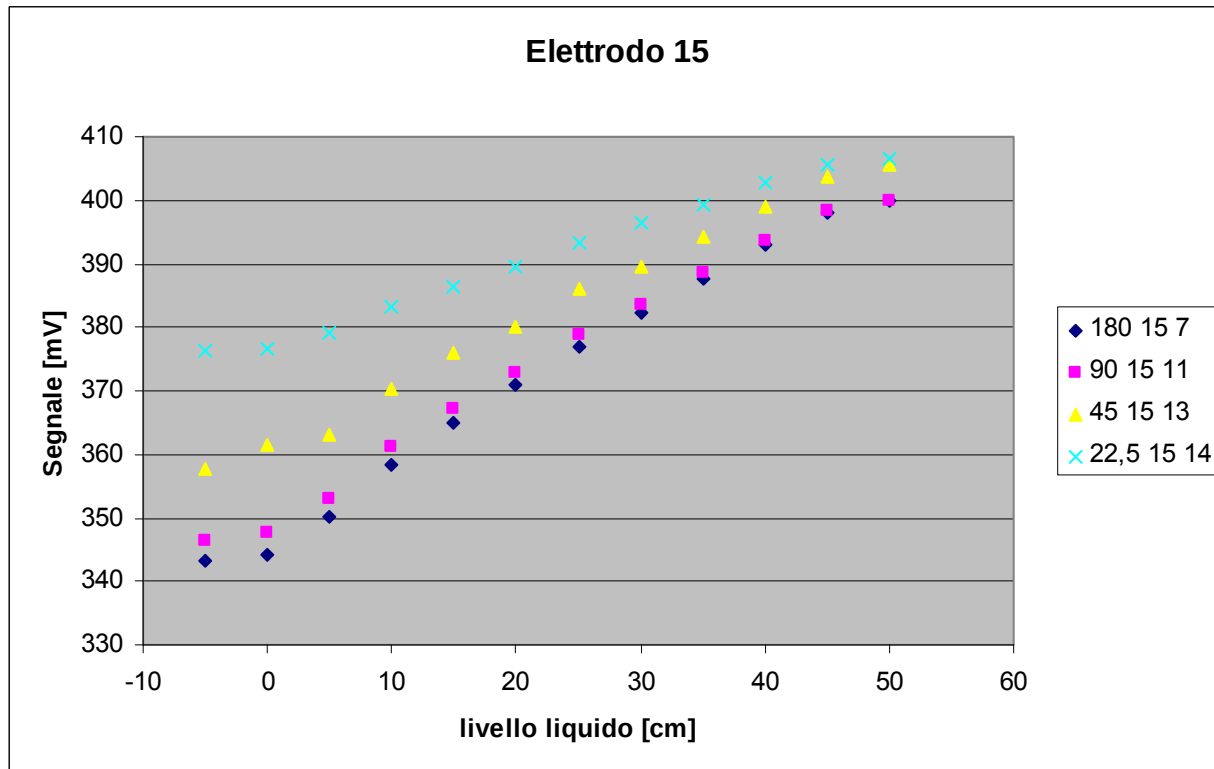


Figura 28: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 15

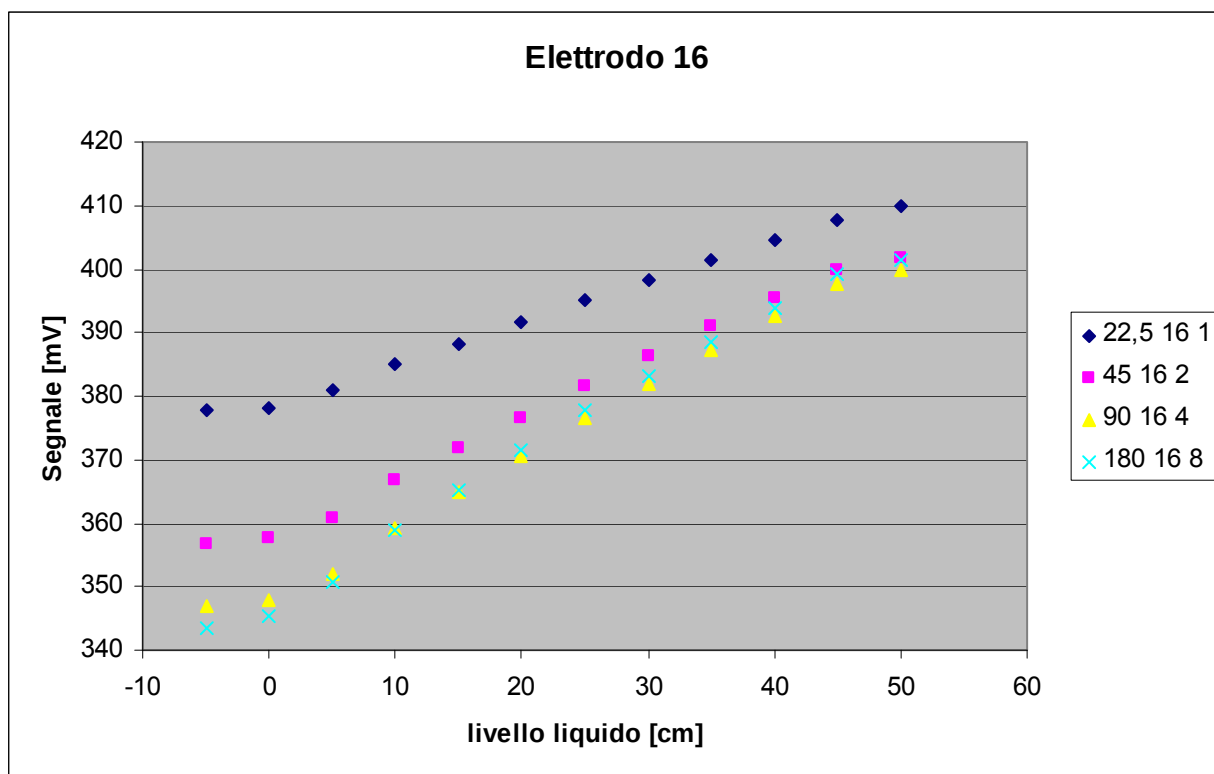


Figura 29: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 16

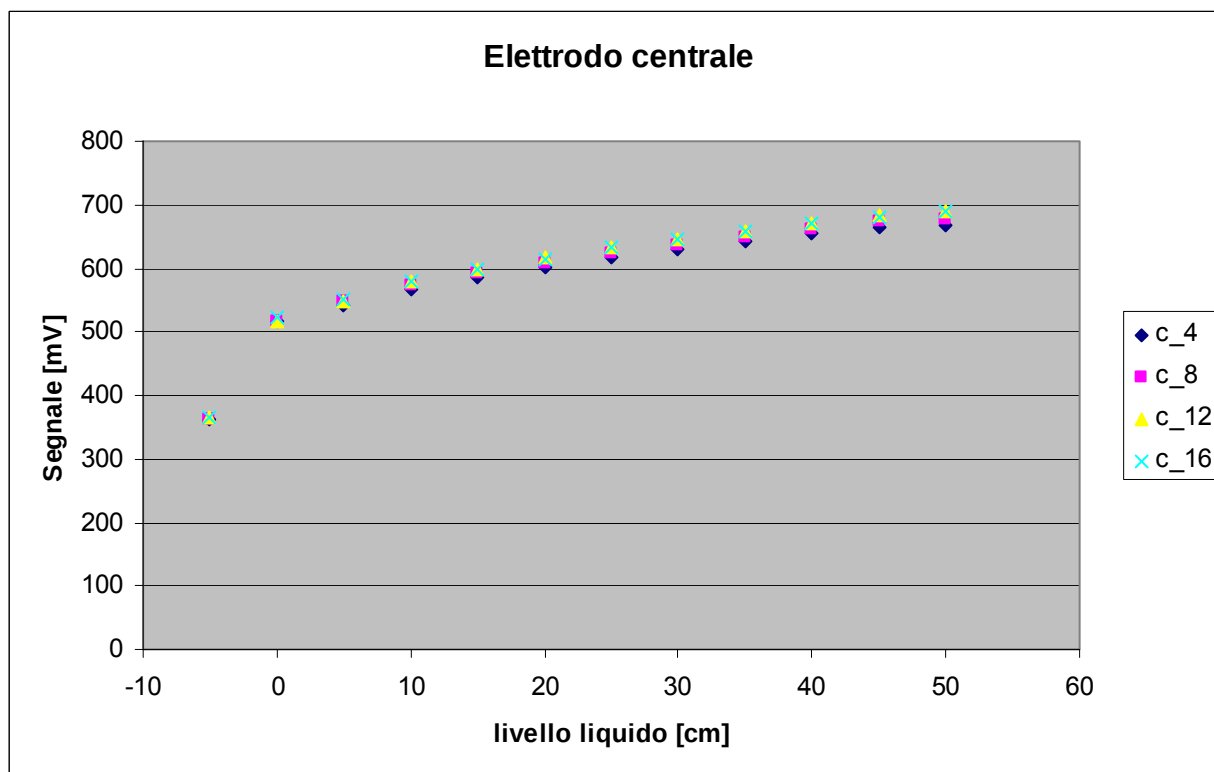


Figura 30: Andamento segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo centrale

Gli elettrodi periferici evidenziano una variazione del segnale di circa 60 mV con sensibilità variabile a seconda della coppia di elettrodi considerata, in particolare mostrano sensibilità crescente al crescere dell'angolo compreso tra di essi.

I segnali ottenuti con l'elettrodo centrale, posto a diretto contatto col fluido, risultano più alti con una variazione di circa 160 mV.

Per tutte le coppie di elettrodi il segnale è monotono crescente all'aumentare del livello di liquido.

Quando la sonda è interessata da tutta acqua (livello superiore a 45 cm) oppure da solo aria (livello inferiore a 0 cm) il segnale mantiene un valore costante, indicando una buona stabilità e una insensibilità alle variazioni di capacità esterne al volume di controllo.

Le prove statiche di livello sono state ripetute in giorni diversi per verificare la ripetibilità del segnale. Il rapporto segnale/disturbo è molto contenuto, e ciò è evidenziato dalla bassa deviazione standard dei segnali ottenuti in giorni diversi, mediamente inferiore allo 0,4 %.

Le due figure seguenti (Figure 31 e 32) riportano i valori del segnale per alcune combinazioni di elettrodi al variare del livello. Oltre ai valori medi sono riportati i valori massimi e minimi acquisiti in modo tale da avere una rappresentazione grafica della ripetibilità del segnale.

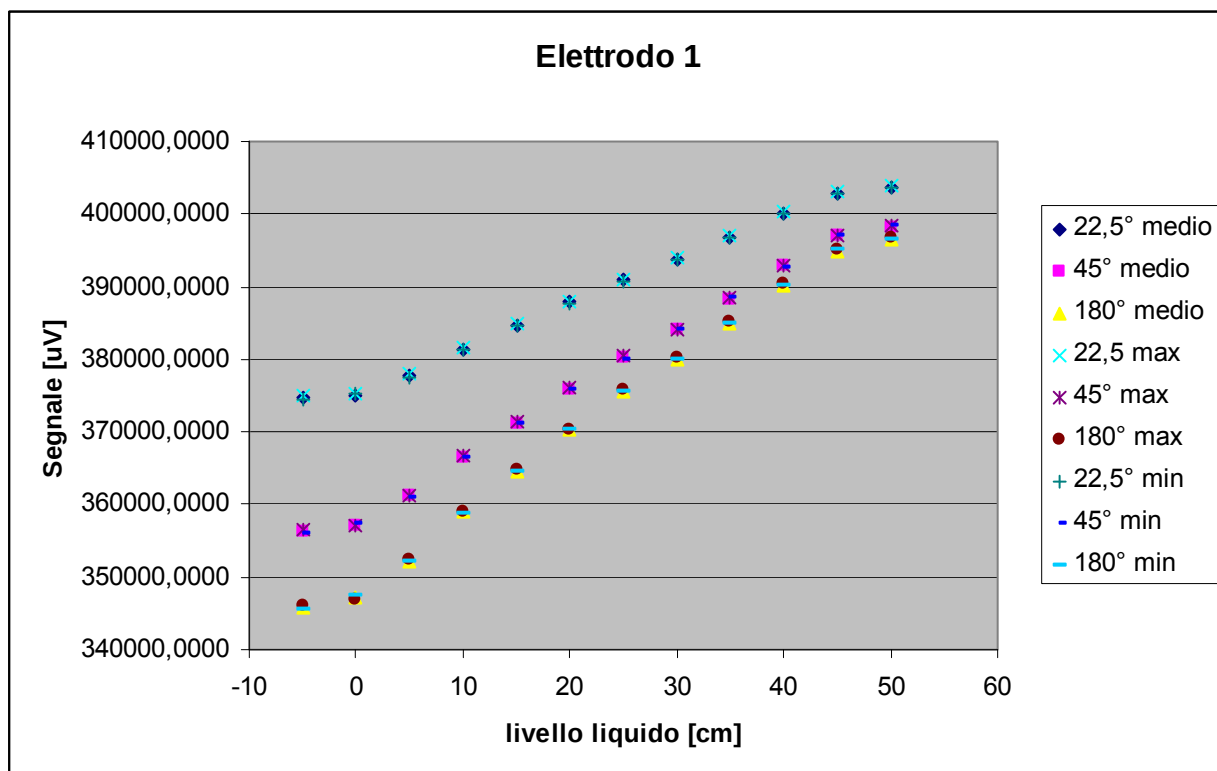


Figura 31: Dispersione segnale per alcune combinazioni dell'elettrodo 1

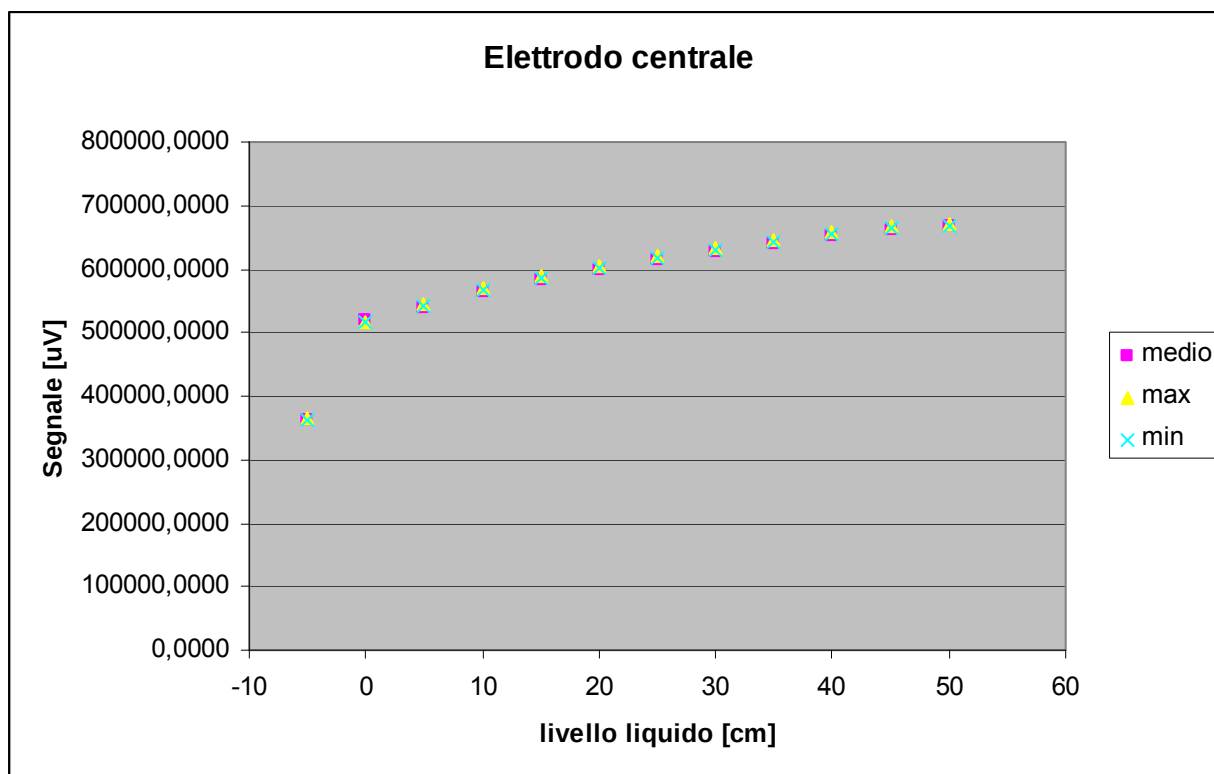


Figura 32: Dispersione segnale elettrodo centrale

I segnali RMS sia massimi che minimi sono praticamente sovrapposti al valor medio, sia per le prove effettuate con gli elettrodi periferici che per le prove effettuate con l'elettrodo centrale. Ciò indica un'ottima ripetibilità del segnale in condizioni statiche.

5.2 Prove in deflusso bifase

5.2.1 Modalità di conduzione delle prove

La modalità di conduzione delle prove in deflusso bifase è articolata nei seguenti passi:

- 1- Si riempie il circuito prova barre con acqua demineralizzata con l'ausilio di una pompa a pistoncini ad alta pressione (pompa IMAMI), tenendo chiuse le valvole di adduzione di liquido e vapore alla sezione di prova del capacitivo.
- 2- Si eroga potenza alle barre scaldanti in modo da portare l'impianto in temperatura e pressione (orientativamente intorno a 30-40 bar).
- 3- Si dà inizio al flussaggio nella sezione di prova del capacitivo aprendo la valvola di adduzione del vapore posta sulla sommità del pressurizzatore. Contemporaneamente si avvia la pompa IMAMI per mantenere costante il livello di liquido all'interno del circuito.
- 4- Si sale di potenza fino al valore desiderato e si regola la portata della pompa IMAMI in modo da mantenere costanti pressione, temperatura e livello del liquido all'interno del circuito.
- 5- Quando l'impianto è in condizioni stazionarie, si avvia l'acquisizione delle grandezze termoidrauliche del circuito prova barre e della sezione di prova della sonda capacitiva.
- 6- Si effettuano 5 cicli di acquisizione per ciascun punto sperimentale caratterizzato da portata bifase e titolo noti.
- 7- Si chiudono le valvole rapide intercettando un volume di controllo e si ferma la pompa IMAMI.
- 8- Si effettua un ulteriore ciclo di acquisizione.
- 9- Il fluido bifase viene fatto passare all'interno di un condensatore e raccolto all'interno di un contenitore a tara nota.
- 10- Si inietta aria compressa all'interno della sezione di prova per rimuovere completamente il fluido intercettato dalle valvole rapide.
- 11- Si pesa il fluido condensato utilizzando una bilancia da laboratorio.
- 12- Si effettua una acquisizione con sola aria calda contenuta all'interno della sonda che servirà per la normalizzazione del segnale.
- 13- Si riaprono le valvole rapide e si riparte dal punto 3.
- 14- Al termine di ogni gruppo di prove, si riempie la sonda con acqua e si effettua una acquisizione.

5.2.2 Matrice sperimentale di prove

La Tabella 2 mostra la matrice sperimentale delle prove in deflusso bifase.

Le prove effettuate sono divise in gruppi, in funzione della potenza, erogata dalle barre scaldanti, all'interno del circuito prova barre.

La potenza effettiva ceduta al fluido è pari alla differenza tra la potenza erogata dalle barre e la potenza dispersa dal circuito. Le dispersioni sono state valutate sperimentalmente e sono pari a circa 2,5 – 3 kW.

La potenza erogata al netto delle dispersioni e la portata immessa nel circuito prova barre dalla pompa IMAMI determinano la portata di vapore in ingresso alla sezione di prova della sonda capacitiva ricavabile dall'equazione (1) del paragrafo 4.5.

Il grado di vuoto medio all'interno della sezione di prova è funzione della portata e del titolo del vapore immesso. Esso può essere modificato aprendo parzialmente la valvola manuale di adduzione del liquido se si vuole aumentare la percentuale di liquido, oppure aprendo il drenaggio del liquido dalla sezione di prova, se si vuole aumentare la percentuale di vapore.

In questo modo, agendo sulle valvole di adduzione e drenaggio, è possibile, per ciascun gruppo di prove realizzare delle miscele bifase caratterizzate da gradi di vuoto diversi.

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
1	1	25	11,7	0,9837
	2	25	10,2	0,7436
	3	25	12,2	0,7356
2	4	40	17,5	0,9858
	5	40	20,8	0,9782
	6	40	23,7	0,8252
	7	40	20	0,9584
3	8	45	18,8	0,9938
	9	45	23,5	0,9914
	10	45	20,2	0,9915
4	11	50	67,8	0,6351
	12	50	28,8	0,9824
	13	50	43,5	0,7455
5	14	75	36,5	0,908
	15	75	37,2	0,587
	16	75	36,5	0,9591
	17	75	82,8	0,5794
6	18	80	135,2	0,5077
	19	80	38	0,987
	20	80	40,6	0,9417
	21	80	41,1	0,829
7	22	120	66,5	0,9213
	23	120	64,5	0,743
	24	120	67,5	0,748

Tabella 2: Matrice sperimentale prove in deflusso bifase

5.3 Risultati prove in deflusso bifase

Per ciascun gruppo di dati sperimentali, caratterizzati dalla stessa potenza erogata dalle barre scaldanti dell'impianto prova barre, sono riportati i grafici relativi all'andamento di:

- Portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva;
- Titolo di vapore in ingresso;
- Temperatura e pressione all'interno della sezione di prova durante la fase di misura;
- Segnale normalizzato in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi;
- Segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per alcune combinazioni di elettrodi;

La portata bifase e il titolo in ingresso alla sezione di prova della sonda capacitiva sono stati calcolati applicando, istante per istante, rispettivamente le equazioni (1) e (4) del paragrafo 4.5.

Nei grafici di portata bifase e di titolo è riportato anche il trend, calcolato con una media mobile di periodo 20.

I grafici della temperatura e pressione del fluido all'interno della sezione di prova della sonda capacitiva si riferiscono alla stessa finestra temporale. Nei punti caratterizzati da alti gradi di vuoto, la pressione e temperatura si mantengono costanti, durante la fase di misura, mentre, hanno tendenzialmente un andamento fluttuante nei punti a più basso grado di vuoto.

Per ciascun gruppo di punti sperimentali, caratterizzati dalla stessa portata in ingresso alla sezione di prova (ovvero dalla stessa potenza erogata dalle barre scaldanti), sono state eseguite 5 acquisizioni in modo da valutare l'andamento medio del segnale per ogni combinazione di elettrodi.

In tutte le prove si è riscontrata una deviazione standard percentuale sempre inferiore allo 1%.

Per poter confrontare misure effettuate tra coppie di elettrodi posti a distanze diverse, il segnale RMS in output medio è stato normalizzato nel seguente modo:

$$V^* = \frac{V - V_{vap}}{V_{liq} - V_{vap}}$$

Il segnale normalizzato varia così tra 0 (tutto vapore) a 1 (tutto liquido) e, legando correttamente il segnale di ciascuna coppia di elettrodi al loro effettivo intervallo di funzionamento, rende confrontabili i segnali ottenuti attivando coppie di elettrodi a distanze differenti.

Per ciascun gruppo di punti sperimentali è riportato l'andamento del segnale normalizzato in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi.

Per ciascuna prova è stato considerato il valor medio tra segnali ottenuti con coppie di elettrodi omologhi.

I segnali normalizzati, con valore assoluto più grande, sono quelli ottenuti per deflussi caratterizzati da un grado di vuoto minore ovvero quelli caratterizzati da una maggiore presenza di liquido. All'aumentare del grado di vuoto, i valori dei segnali registrati con coppie di elettrodi omologhi diminuiscono.

Tale andamento è rispettato per tutte le coppie di elettrodi.

Per ciascun gruppo di punti è riportato anche l'andamento del segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto. I grafici si riferiscono a misure effettuate considerando quattro coppie di elettrodi periferici angolati di 45°, 67,5°, 180° e quattro combinazioni di elettrodi comprendenti l'elettrodo centrale.

Le combinazioni di elettrodi considerate sono state scelte in modo tale da verificare la coerenza tra segnali ottenuti tramite analisi tomografica e regime di flusso all'interno della sezione di prova.

Pur non conoscendo con precisione i regimi di moto che si instaurano all'interno della sezione di prova, si può ipotizzare che il moto sia stratificato, probabilmente a fiotti, caratterizzato da una alta concentrazione di fase liquida nella parte inferiore del condotto e un maggior tenore di vapore nella parte superiore.

Facendo riferimento alla figura 33, che mostra la reale disposizione degli elettrodi in una generica sezione della sonda capacitiva, è logico aspettarsi una maggiore concentrazione di fase liquida in prossimità dell'elettrodo 8, posto nella zona inferiore della sonda e una maggior concentrazione di fase vapore in prossimità dell'elettrodo 16 posto nella zona superiore.

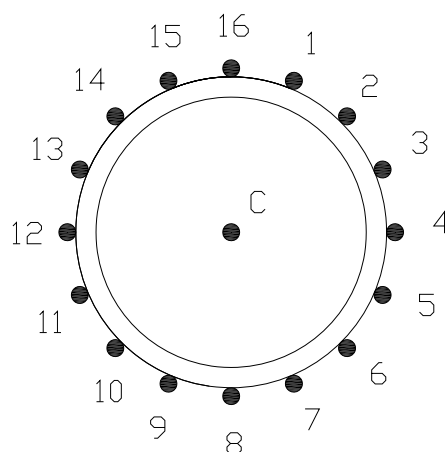


Figura 33: disposizione degli elettrodi periferici

Le coppie considerate di elettrodi a 45° e $67,5^\circ$ si trovano a cavallo della mediana verticale e orizzontale.

Le combinazioni orientate a 45° sono le 1-15, 3-5, 7-9 e 11-13; quelle orientate a $67,5^\circ$ sono le 1-14, 3-6, 7-10, e 11-14.

Le coppie di elettrodi orientate a 180° si trovano lungo la mediana verticale e orizzontale e sono le coppie 2-10, 4-12, 6-14 e 8-16, mentre per le misure effettuate con l'elettrodo centrale sono stati considerati gli elettrodi periferici 4, 8, 12 e 16.

Dall'analisi dei segnali in funzione del grado di vuoto per le diverse combinazioni si evince che:

- la zona inferiore della sonda, in prossimità dell'elettrodo 8, è quella caratterizzata dal maggior tenore di liquido.
- viceversa la zona superiore è quella caratterizzata dal minor tenore di liquido ed infatti i segnali ottenuti con elettrodi vicini all'elettrodo 16 sono in valore assoluto i più bassi.
- i segnali ottenuti con elettrodi posti in prossimità della mediana orizzontale risultano equivalenti ed in valore assoluto intermedi tra la zona superiore e quella inferiore della sonda.
- La funzione che descrive l'andamento del segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto è monotona decrescente.

Per tutti i grafici l'asse delle ascisse esprime il tempo in secondi.

Nei grafici relativi alla portata bifase e al titolo in ingresso alla sonda capacitiva è riportato in viola l'andamento effettivo e in nero il trend con una media mobile di periodo 20.

Risultati prove gruppo 1

Prova	alpha	modalità di conduzione delle prove
1	0,9837	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi a monte e a valle della sonda aperti
2	0,7436	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, un drenaggio aperto
3	0,7356	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi chiusi

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
1	1	25	11,7	0,9837

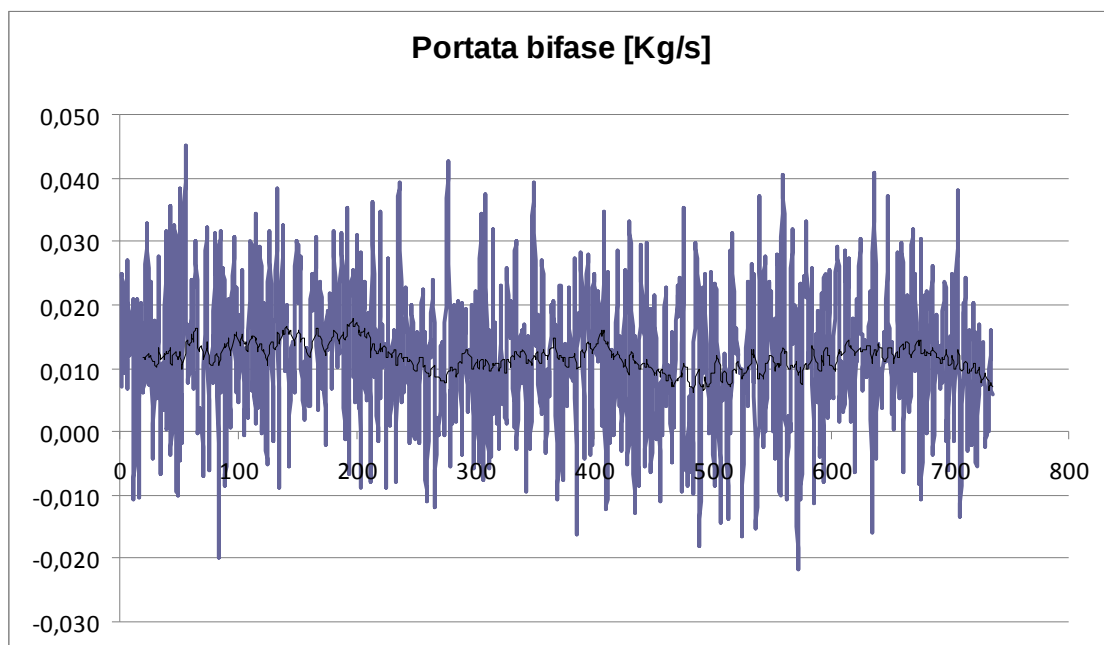


Figura 34: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

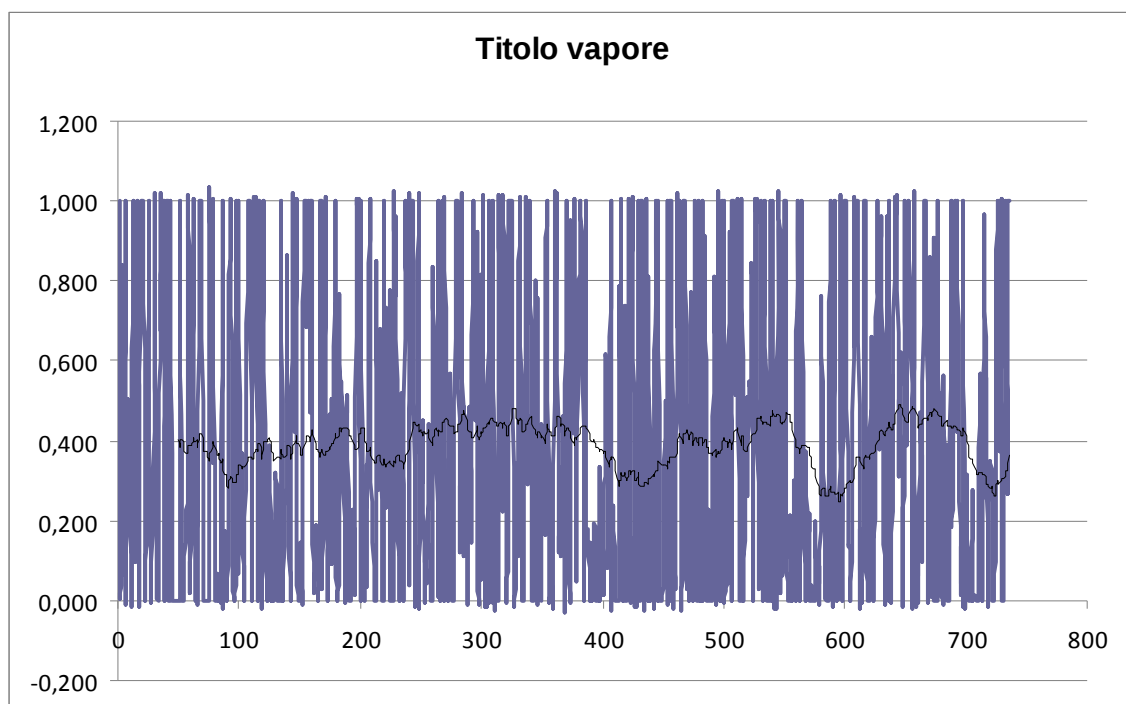


Figura 35: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

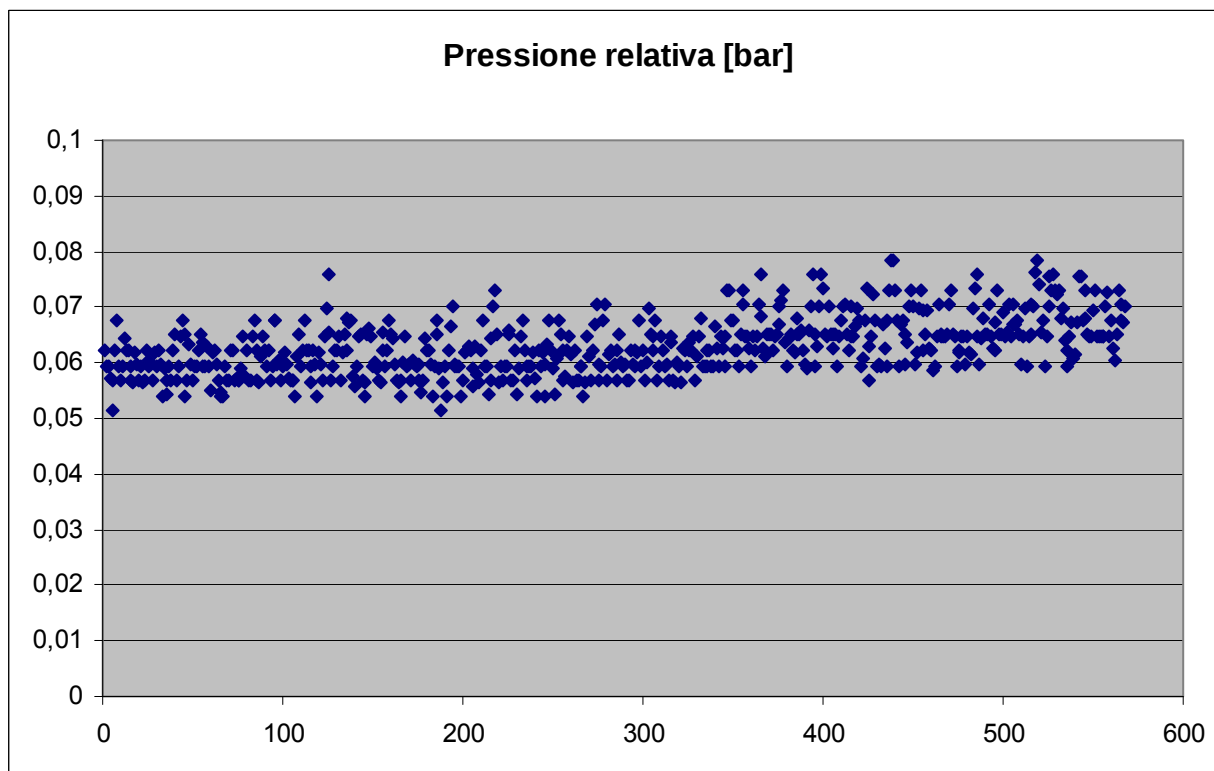


Figura 36: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

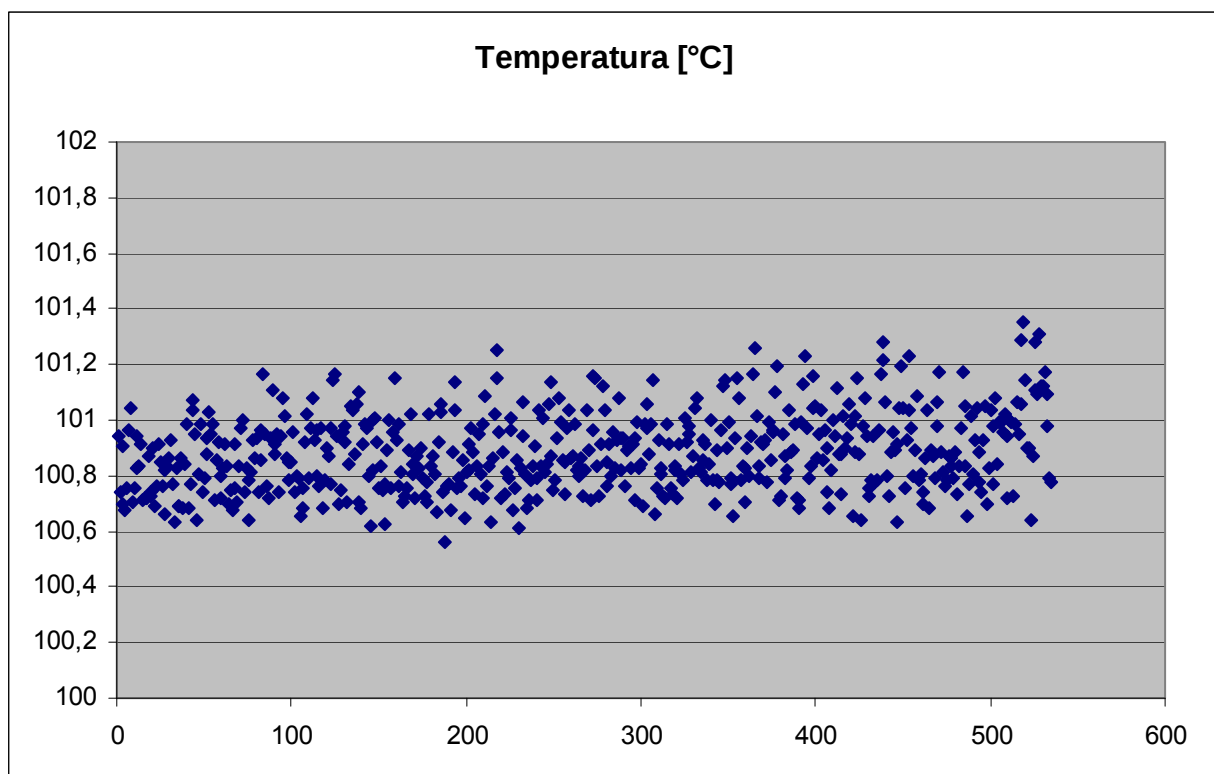


Figura 37: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
1	2	25	10,2	0,7436

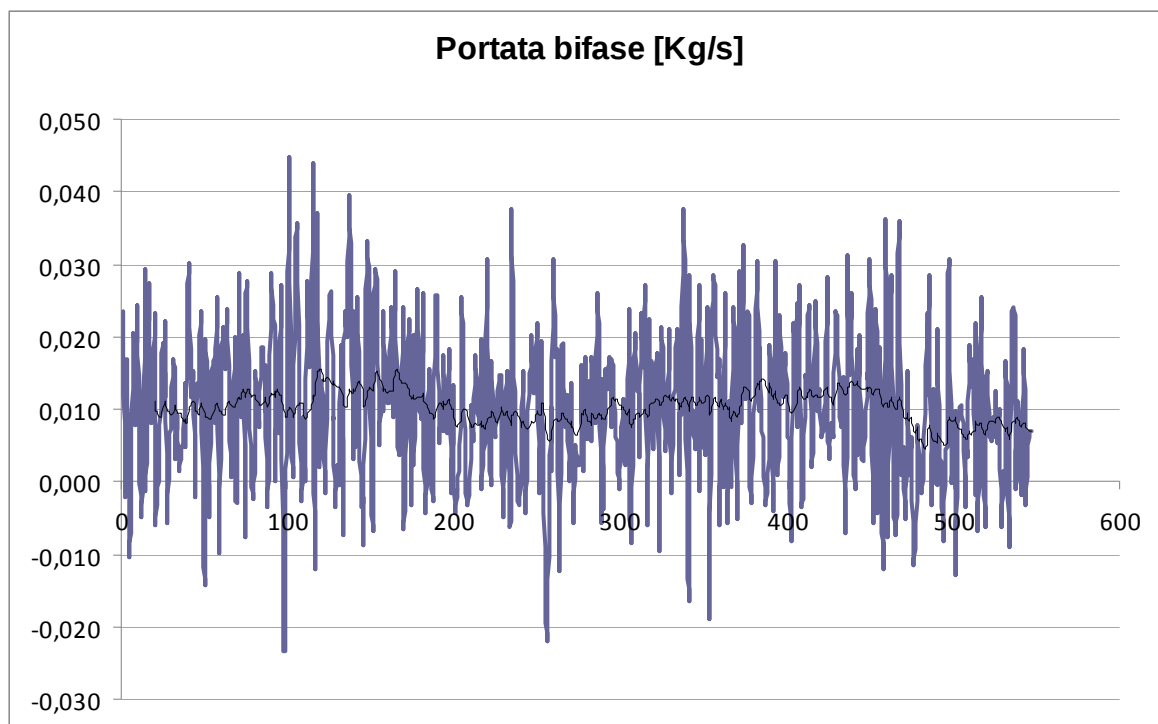


Figura 38: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

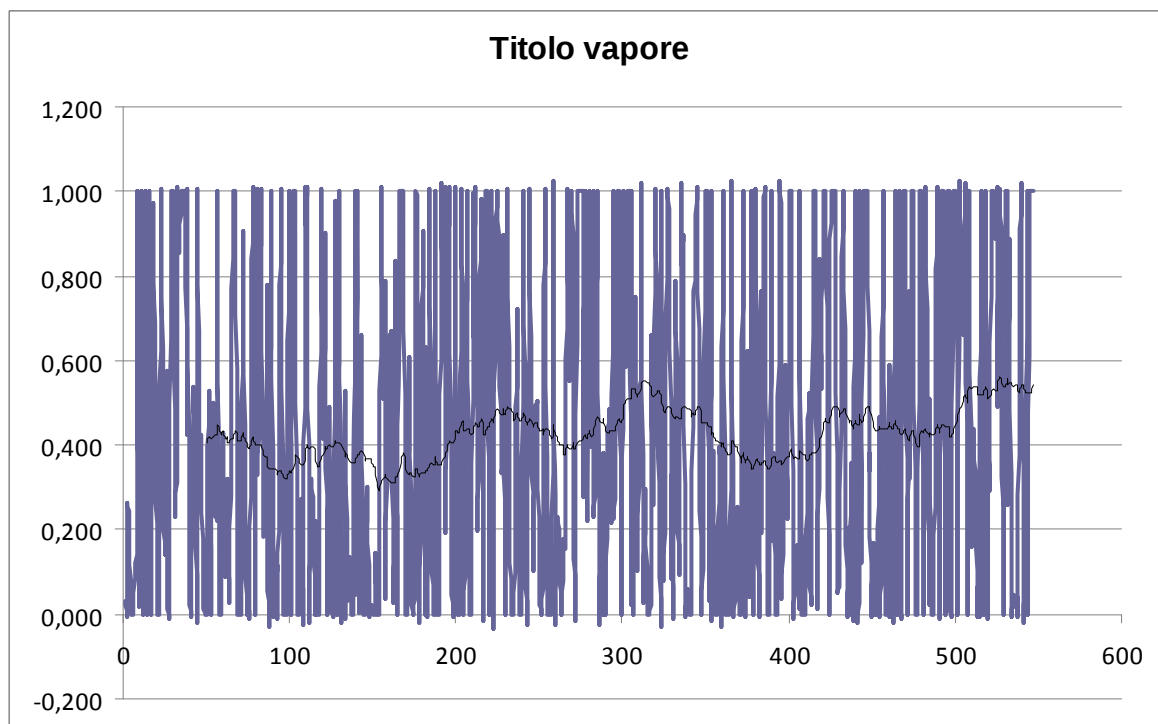


Figura 39: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

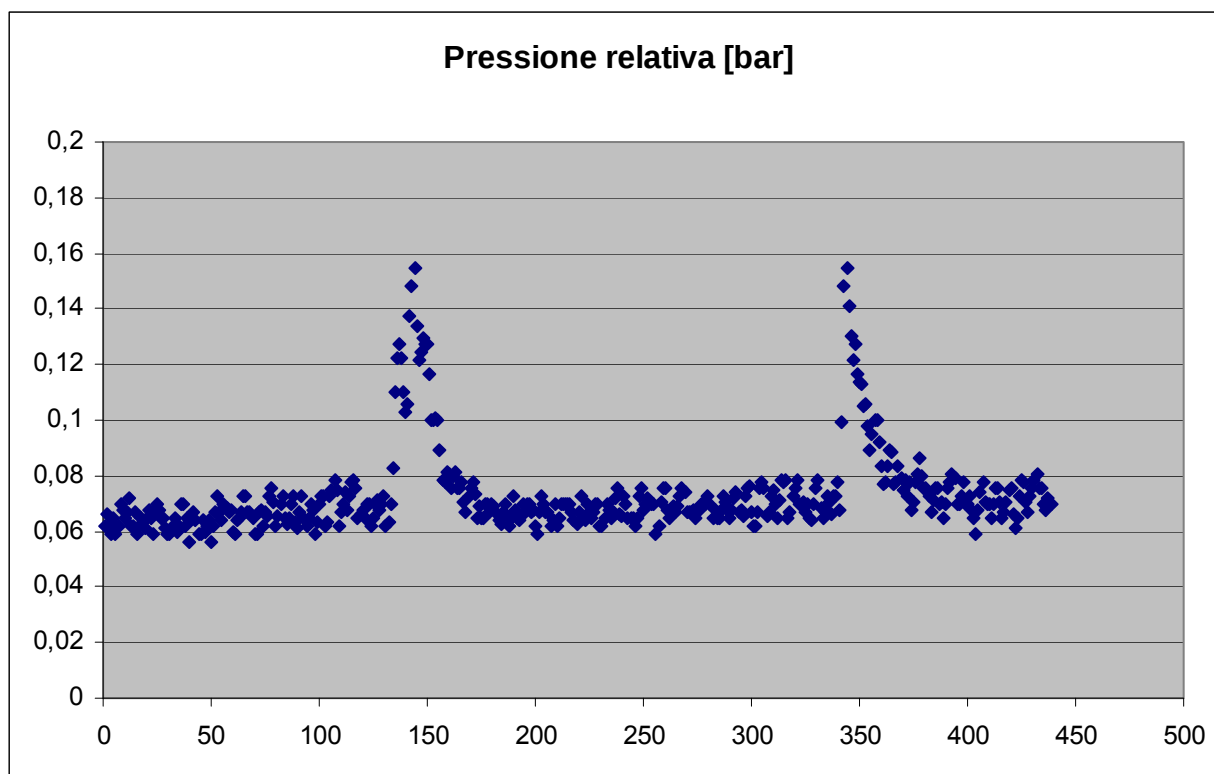


Figura 40: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

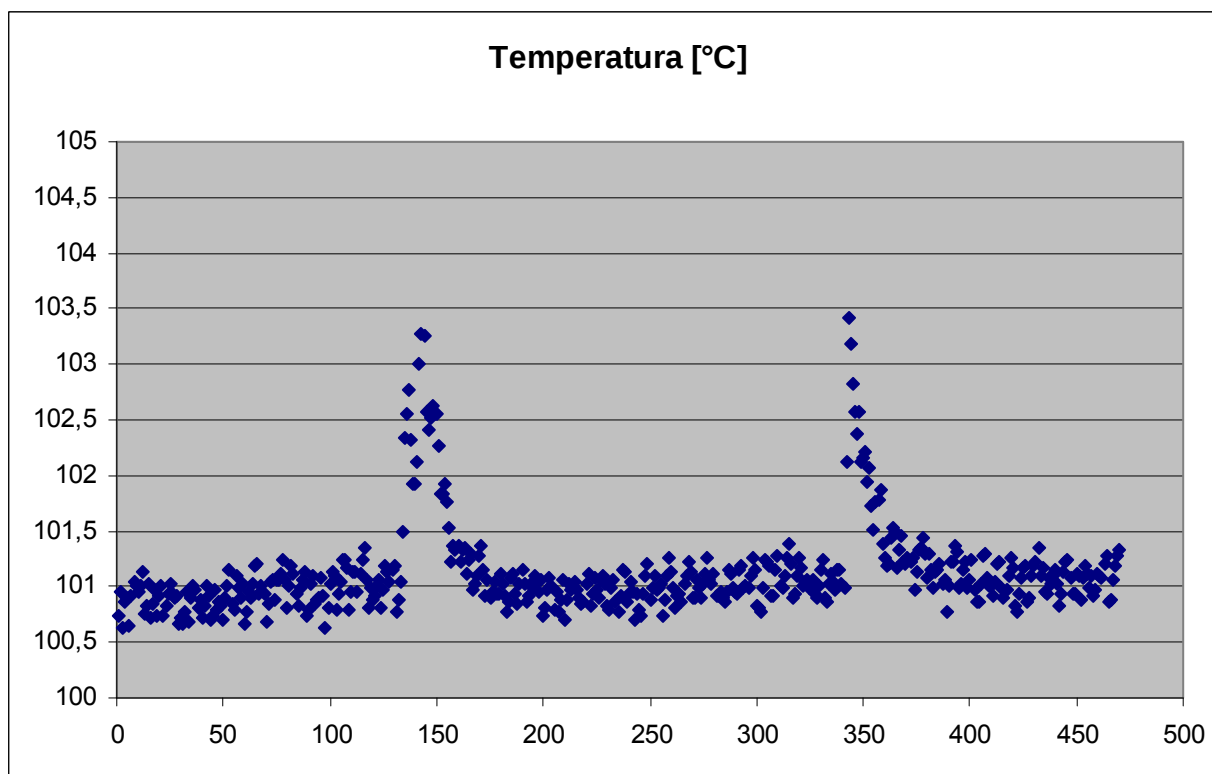


Figura 41: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
1	3	25	12,2	0,7356

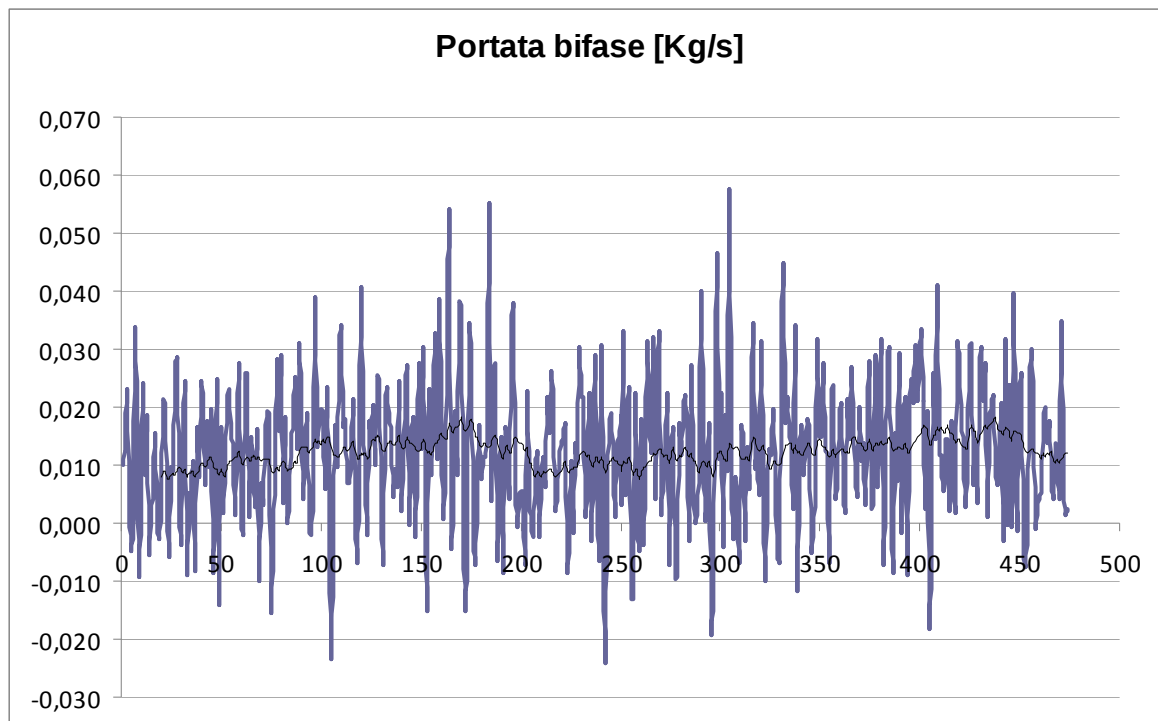


Figura 42: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

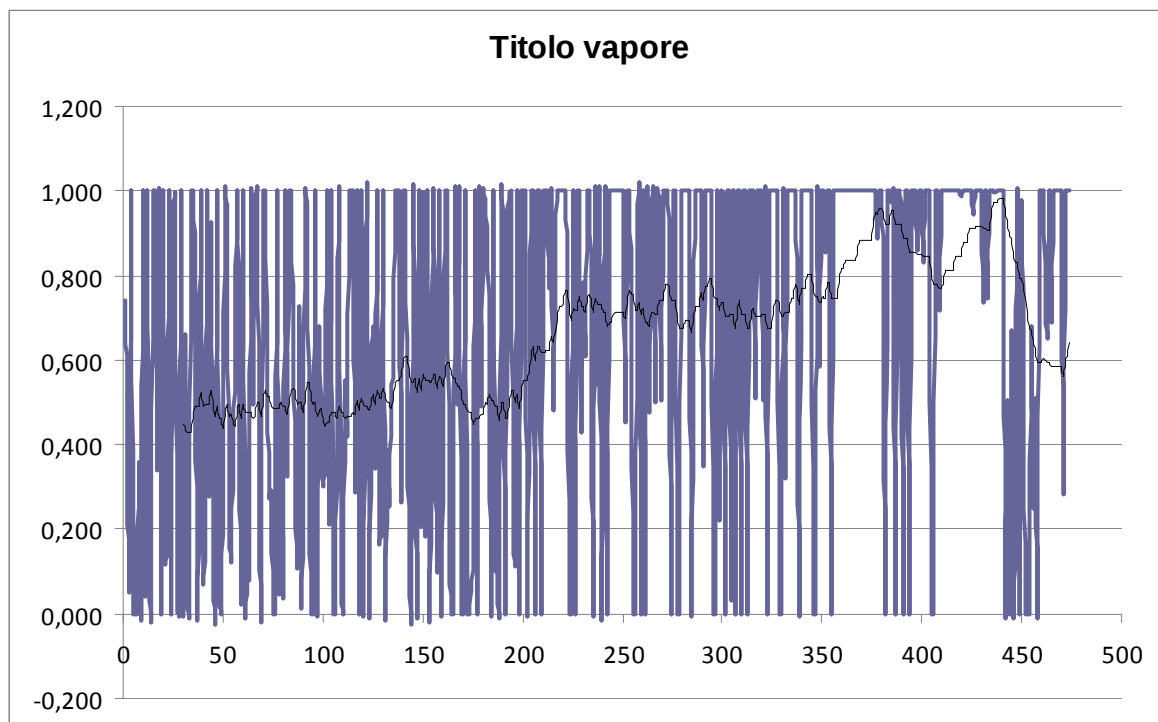


Figura 43: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

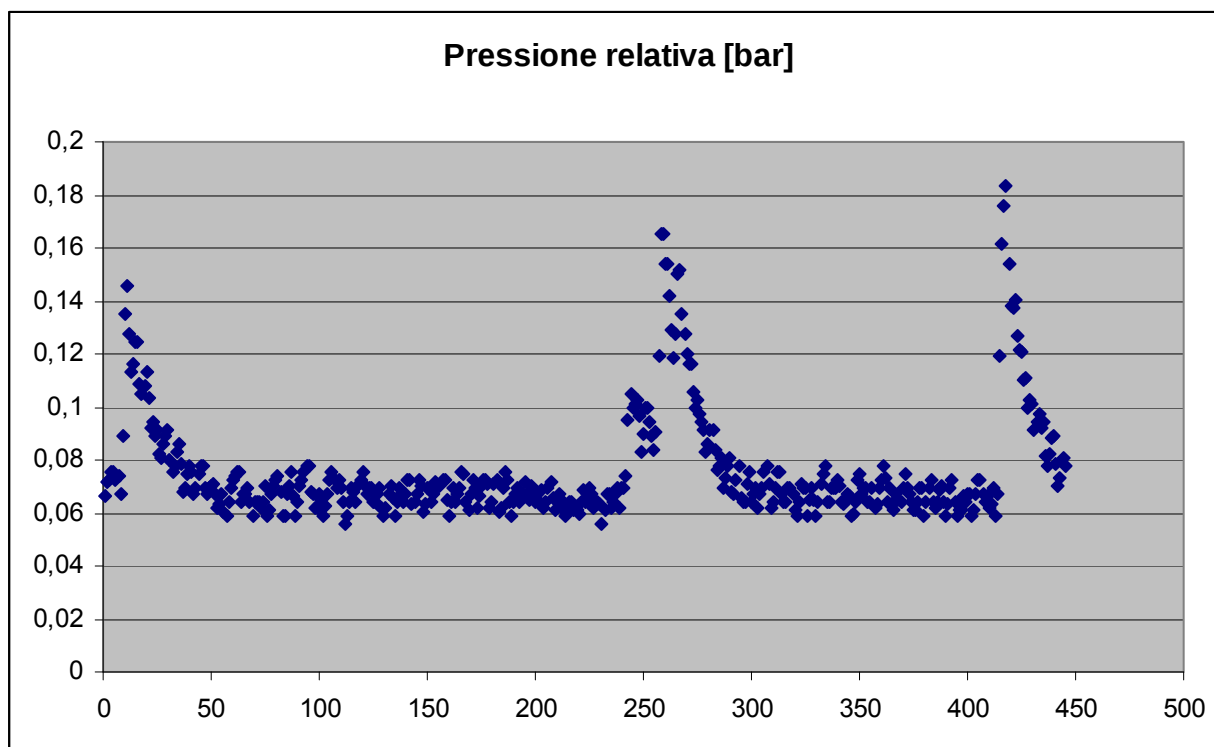


Figura 44: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

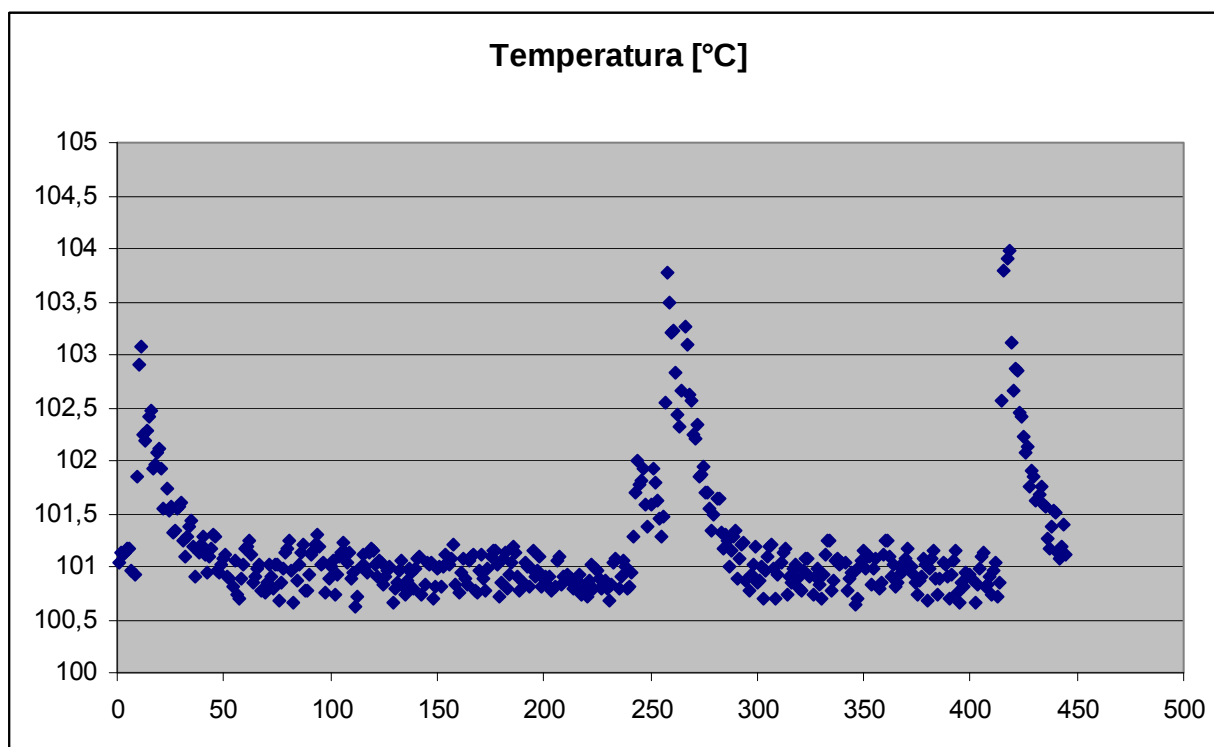


Figura 45: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

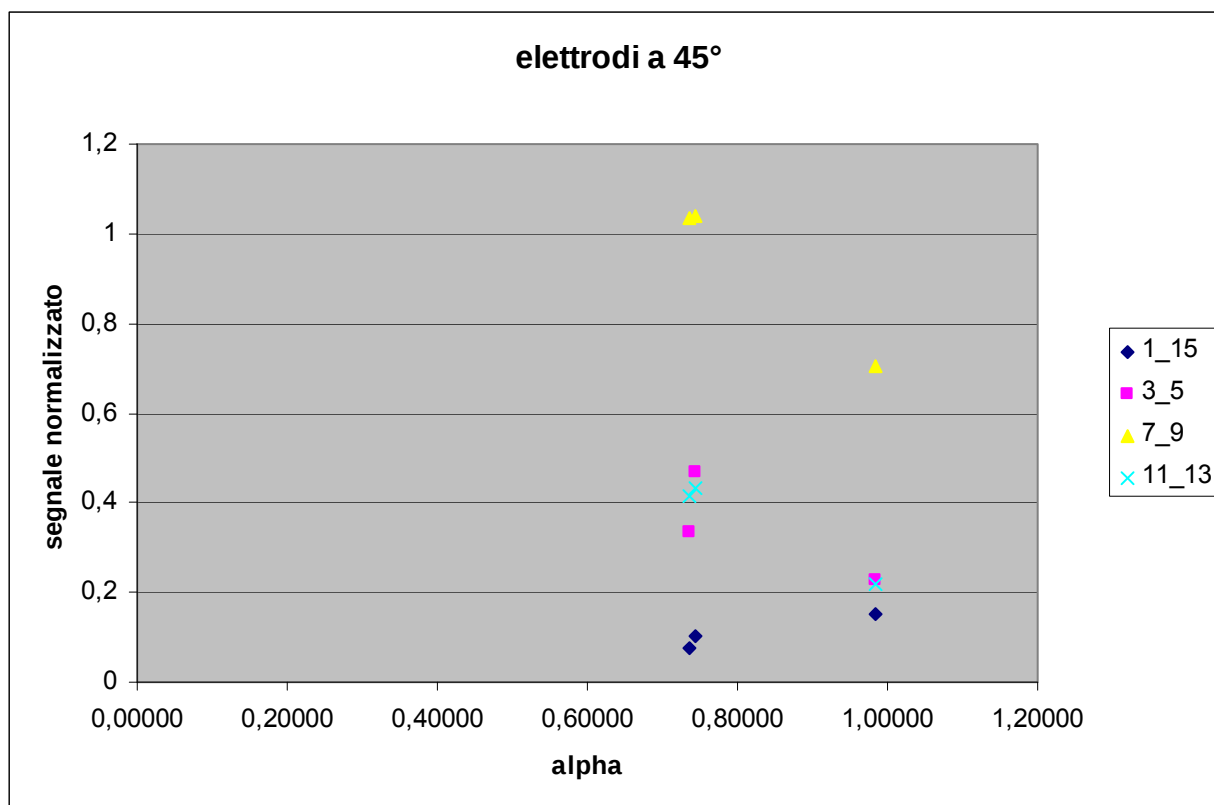


Figura 46: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°

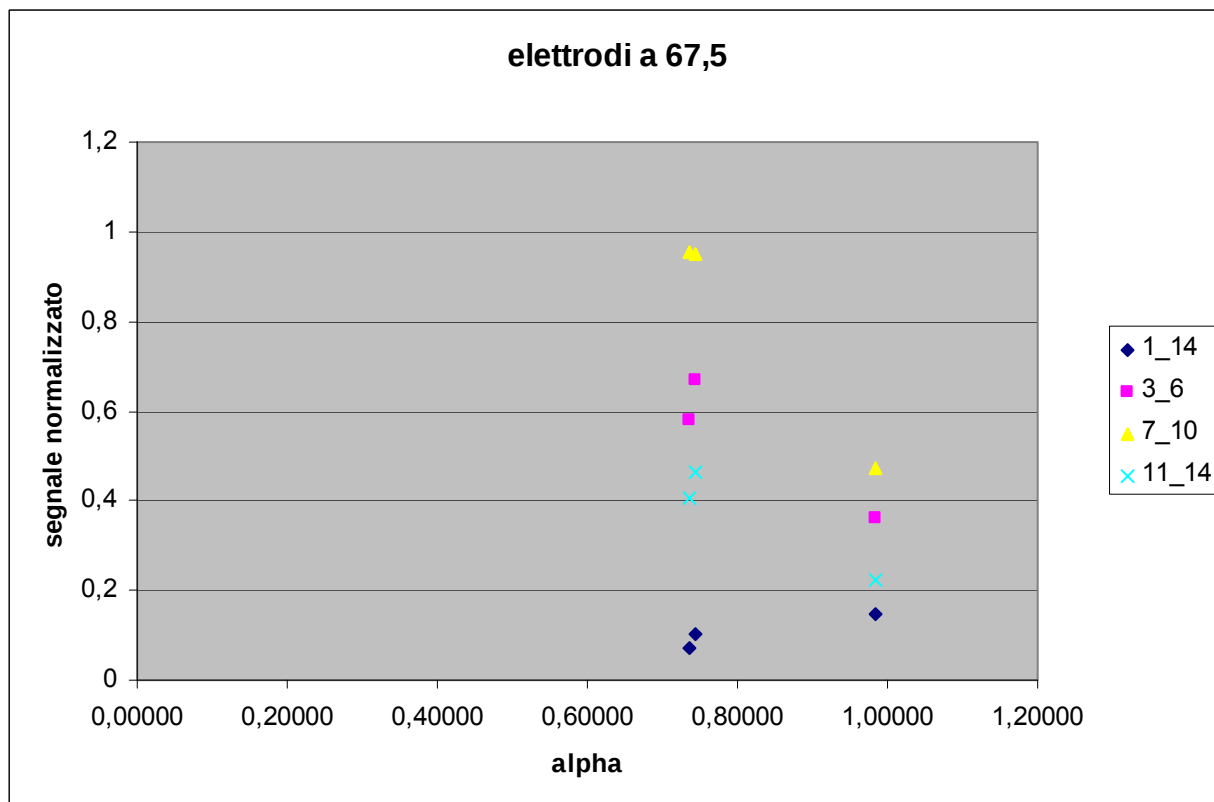


Figura 47: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°

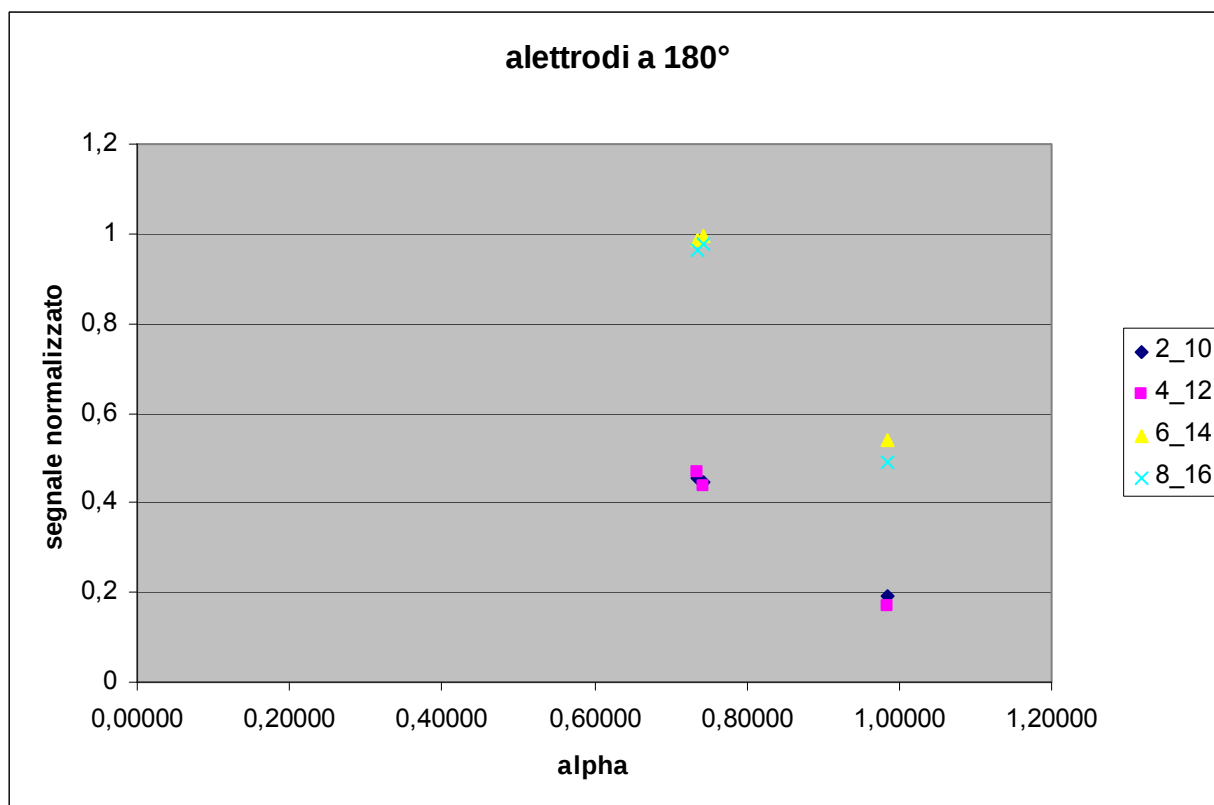


Figura 48: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°

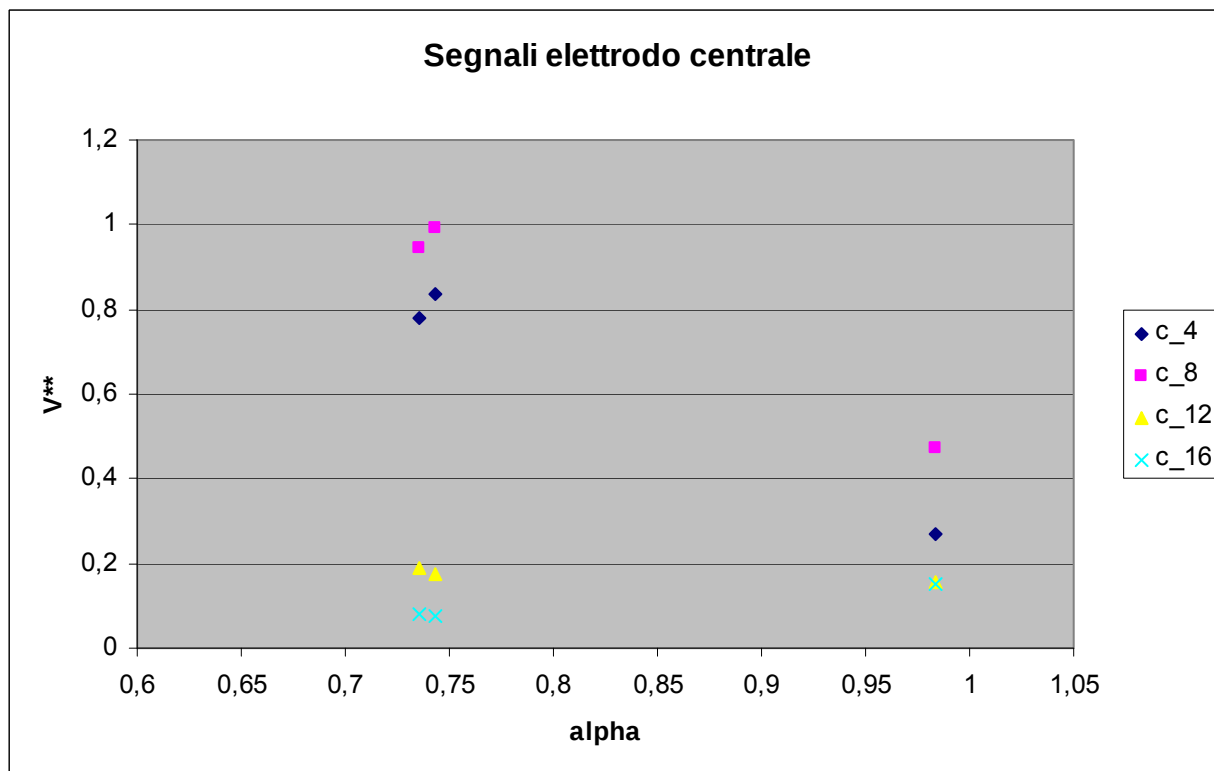


Figura 49: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato l'elettrodo centrale

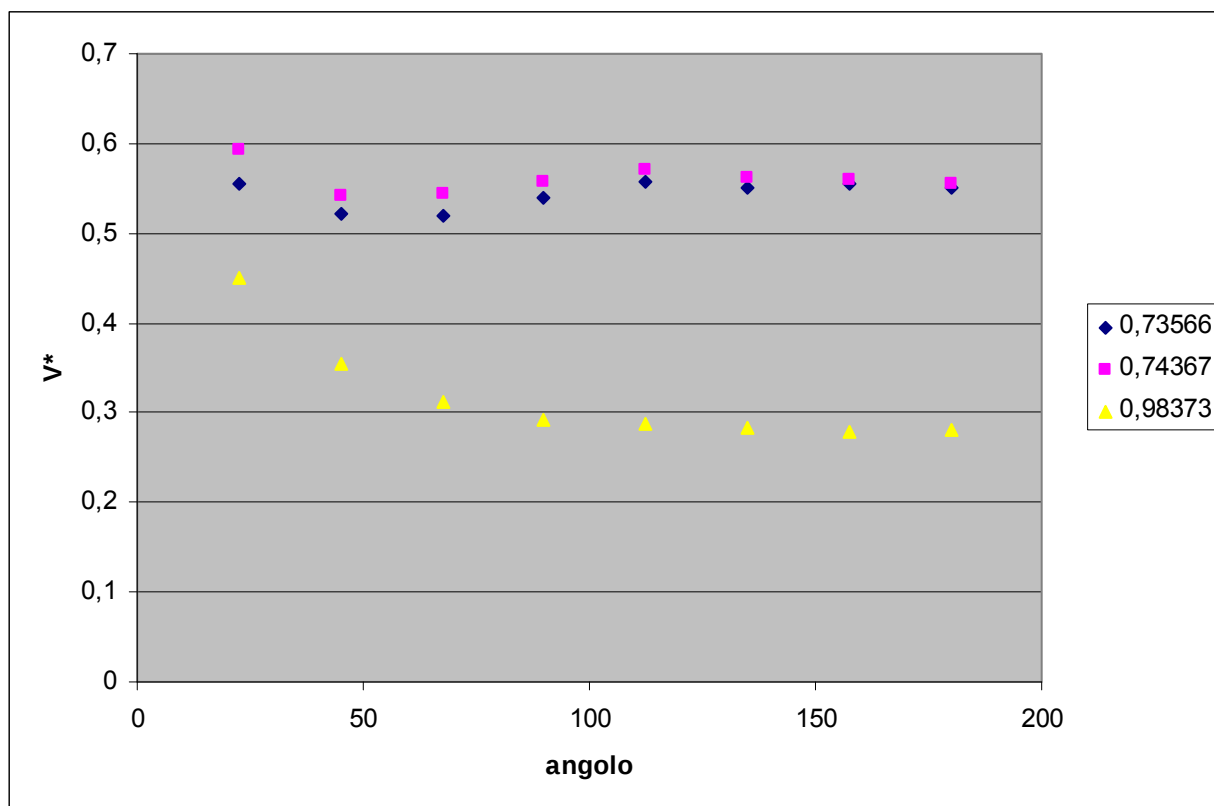


Figura 50: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha

L'andamento della temperatura e della pressione durante la fase di misura relativa alla prova 1, caratterizzato da un alto valore di grado di vuoto, è pressoché costante. Viceversa, la temperatura e la pressione nelle prove 2 e 3, caratterizzate da bassi gradi di vuoto, presentano un andamento fluttuante (Figure 40, 41, 44 e 45). Questo fatto ci fa supporre la presenza, in queste ultime prove, di un regime di moto caratterizzato dalla presenza di slug.

Il segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per le prove del gruppo 1, presenta un andamento monotono decrescente.

I segnali normalizzati più alti, sono quelli ottenuti con coppie di elettrodi poste in prossimità delle zone della sonda interessate da una maggior presenza di liquido e viceversa (Figura 46, 47, 48, 49 e 50).

Le curve che rappresentano, per ciascuna prova, l'andamento del segnale normalizzate in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi interessati nella misura (Figura 50) sono ordinate in funzione del grado di vuoto. Le curve relative alle prove 2 e 3 risultano sovrapposte infatti, i rispettivi gradi di vuoto sono praticamente i medesimi.

Risultati prove gruppo 2

prova	alpha	modalità di conduzione delle prove
4	0,9858	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
5	0,9782	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
6	0,8252	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
7	0,9584	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
2	4	40	17,5	0,9858

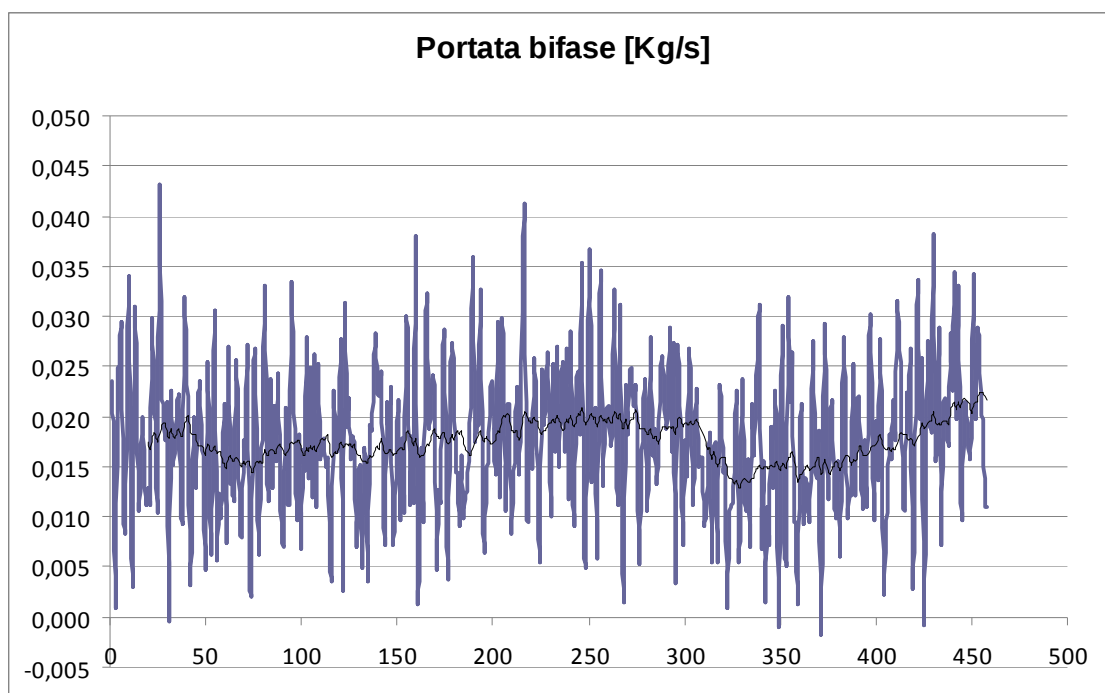


Figura 51: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

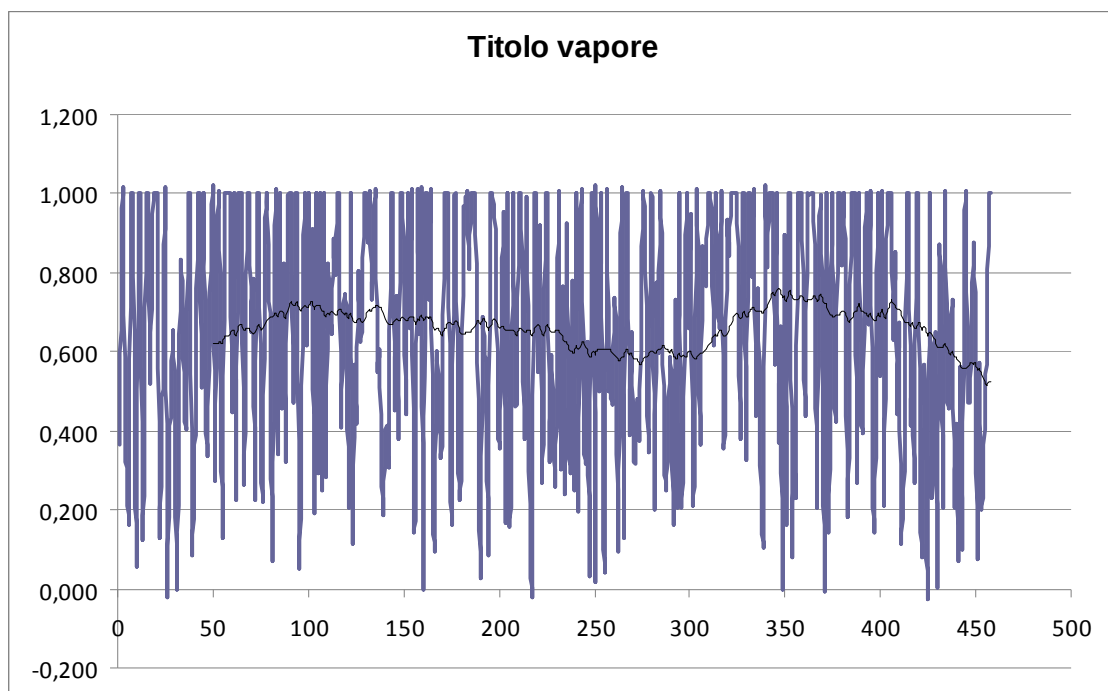


Figura 52: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

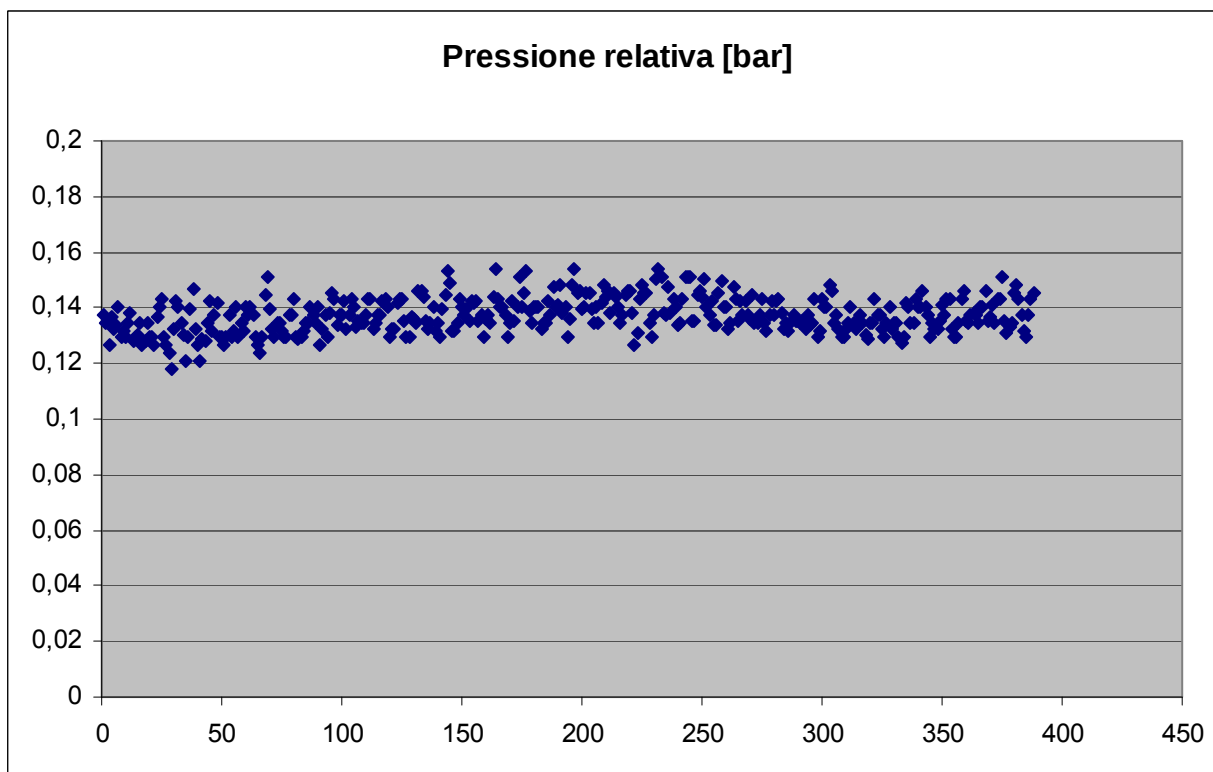


Figura 53: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

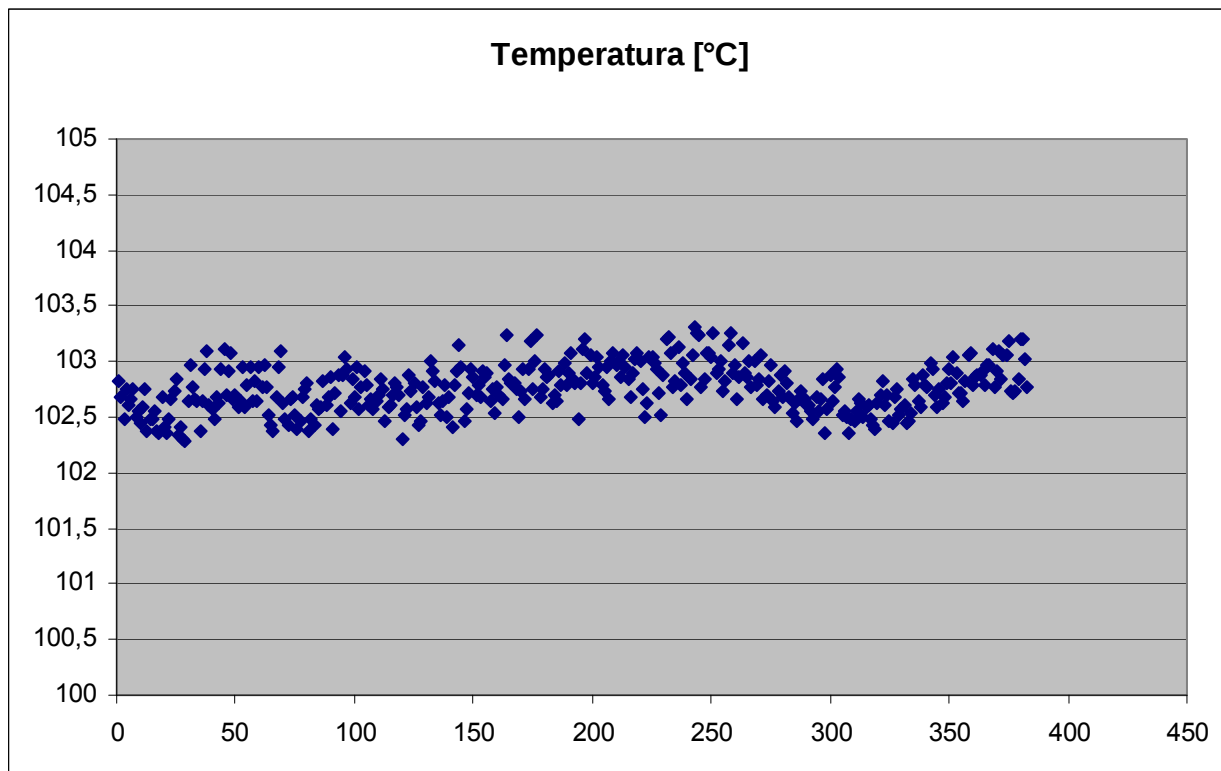


Figura 54: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
2	5	40	20,8	0,9782

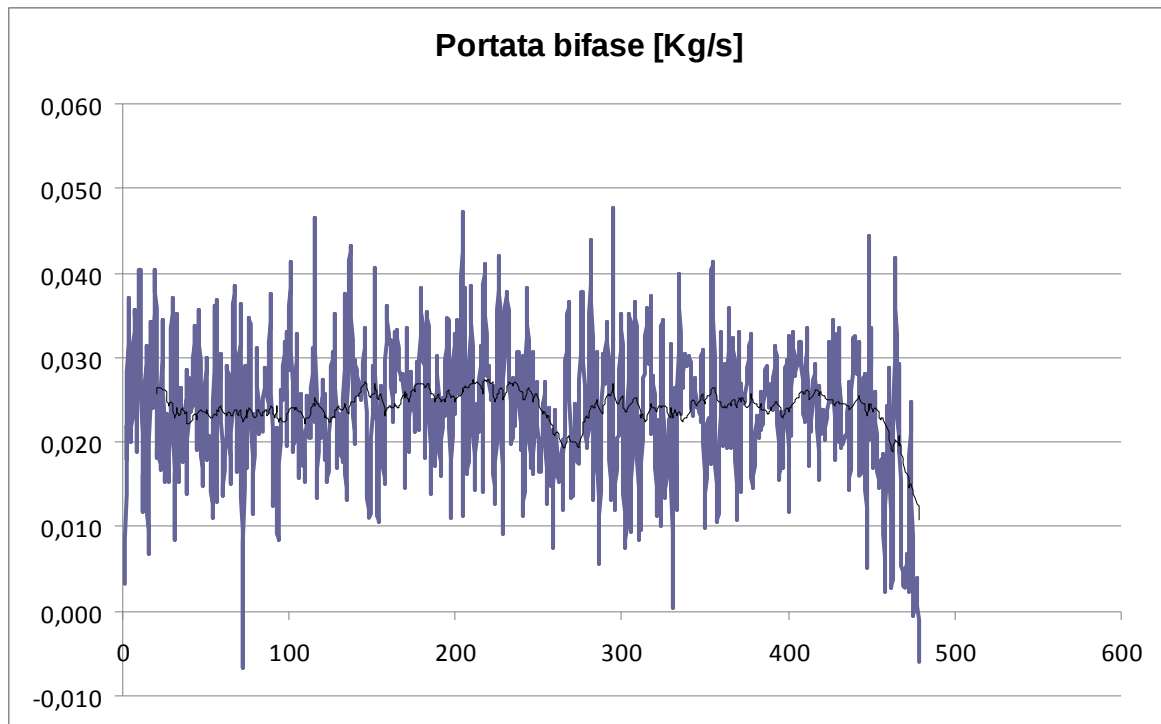


Figura 55: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

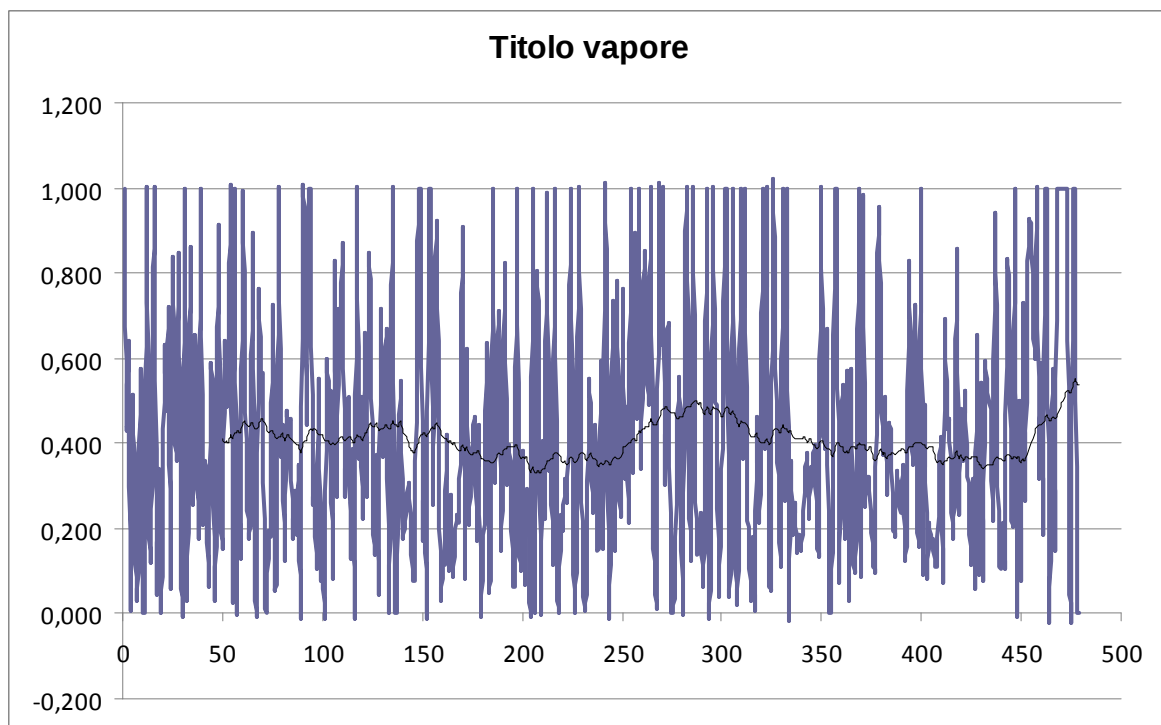


Figura 56: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

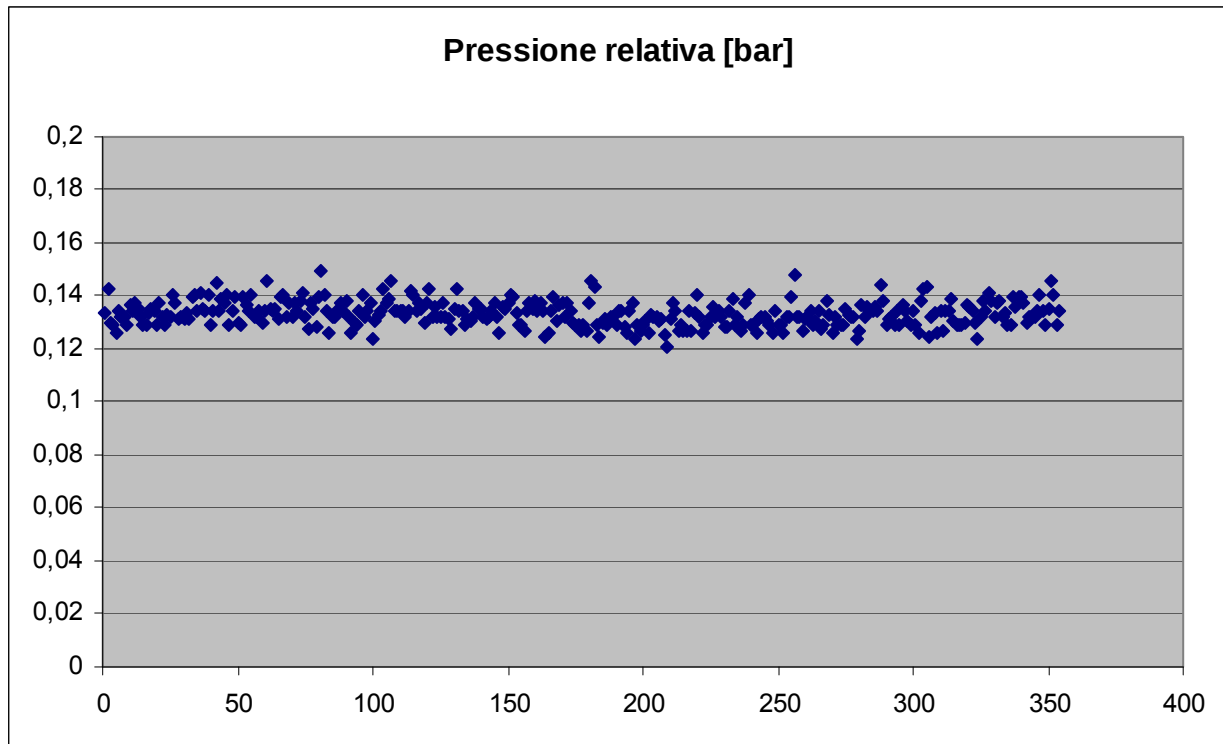


Figura 57: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

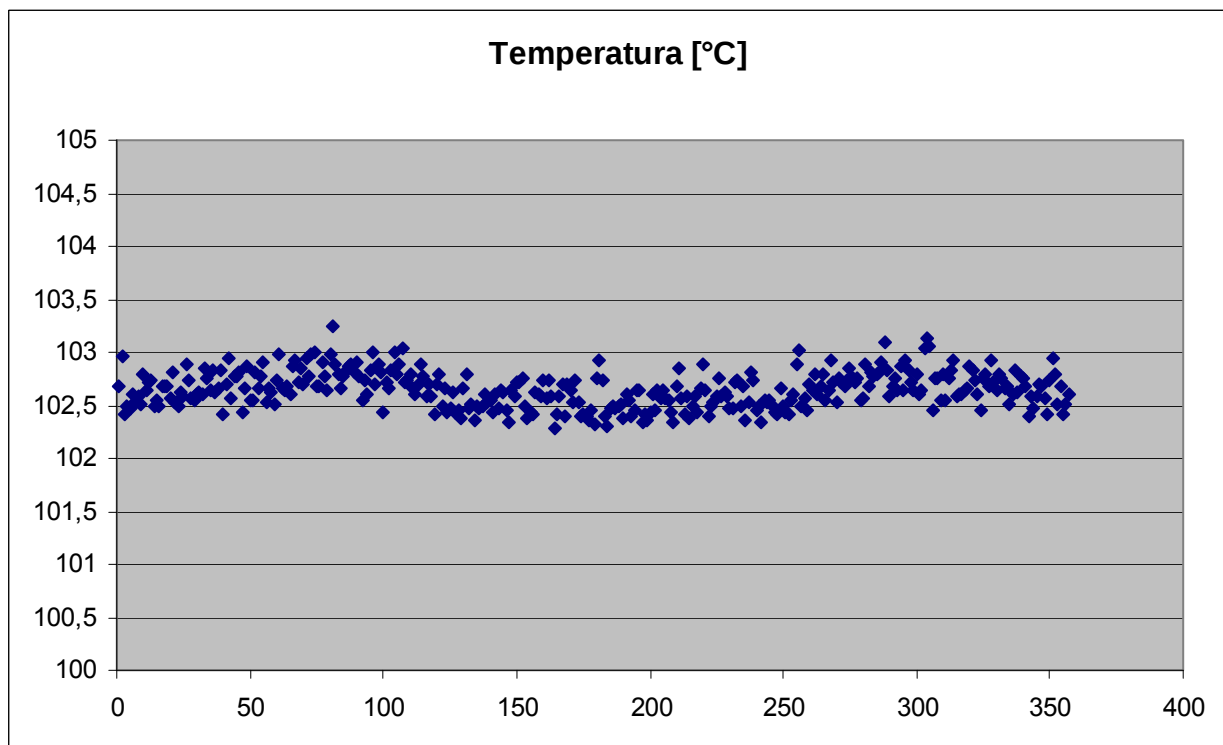


Figura 58: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
2	6	40	23,7	0,8252

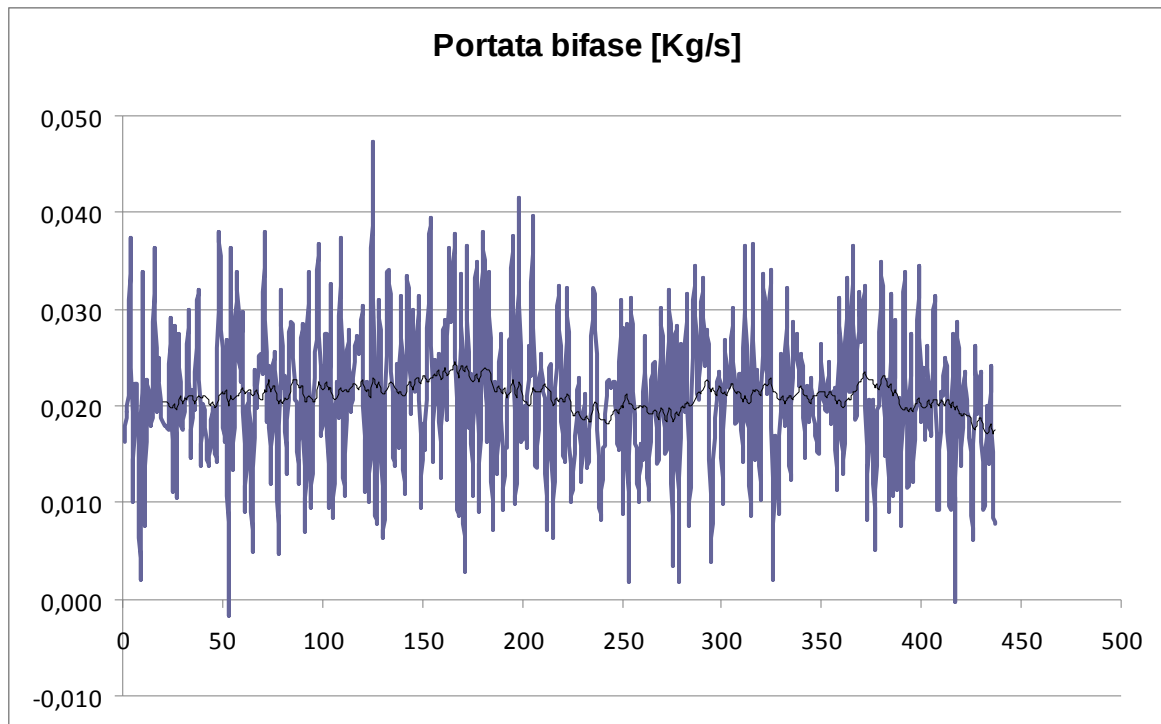


Figura 59: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

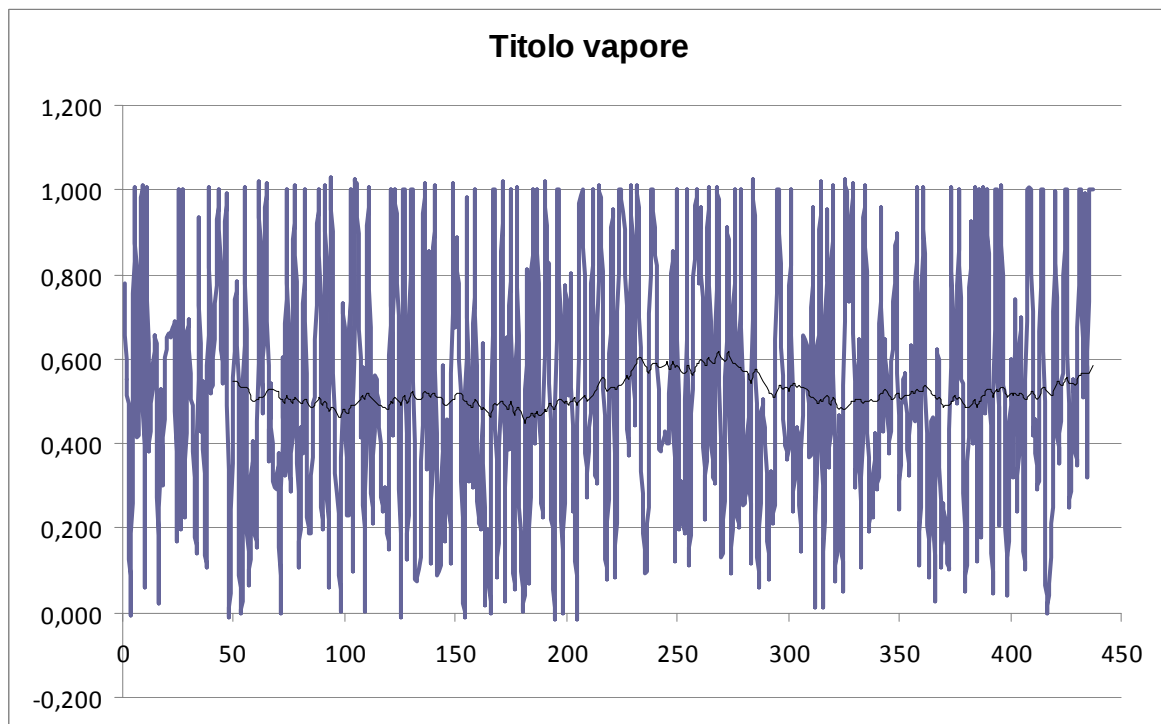


Figura 60: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

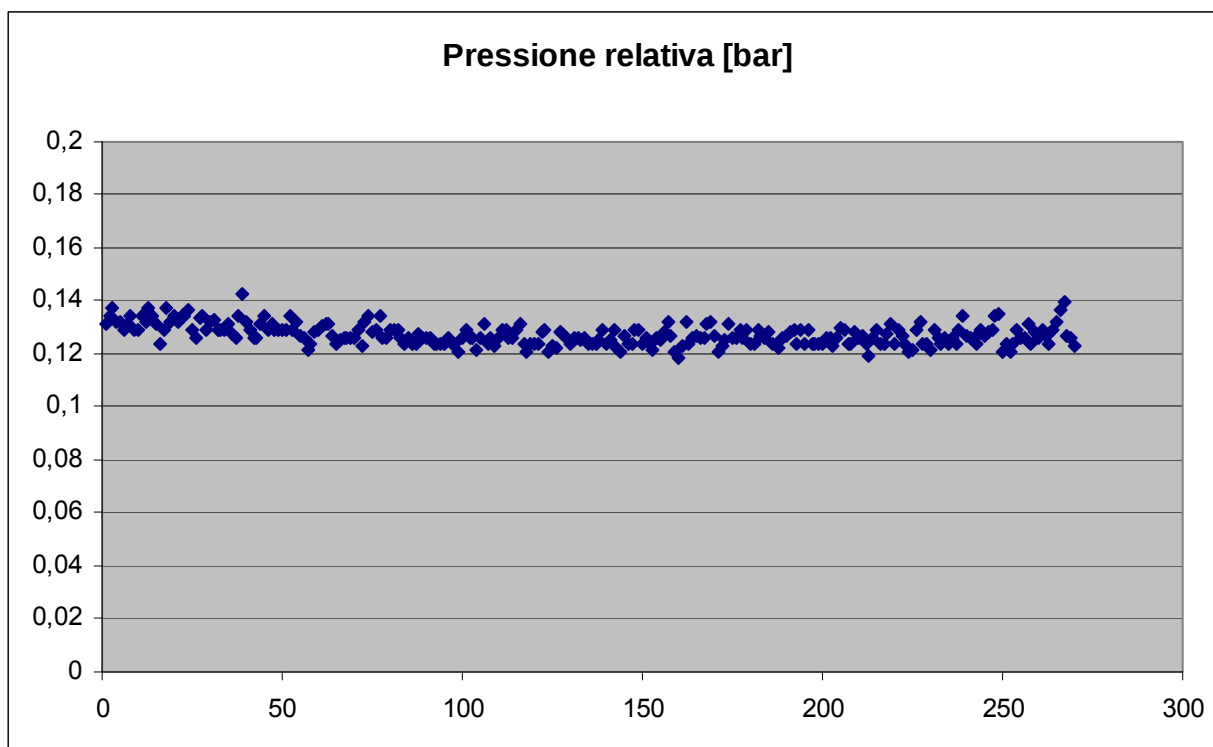


Figura 61: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

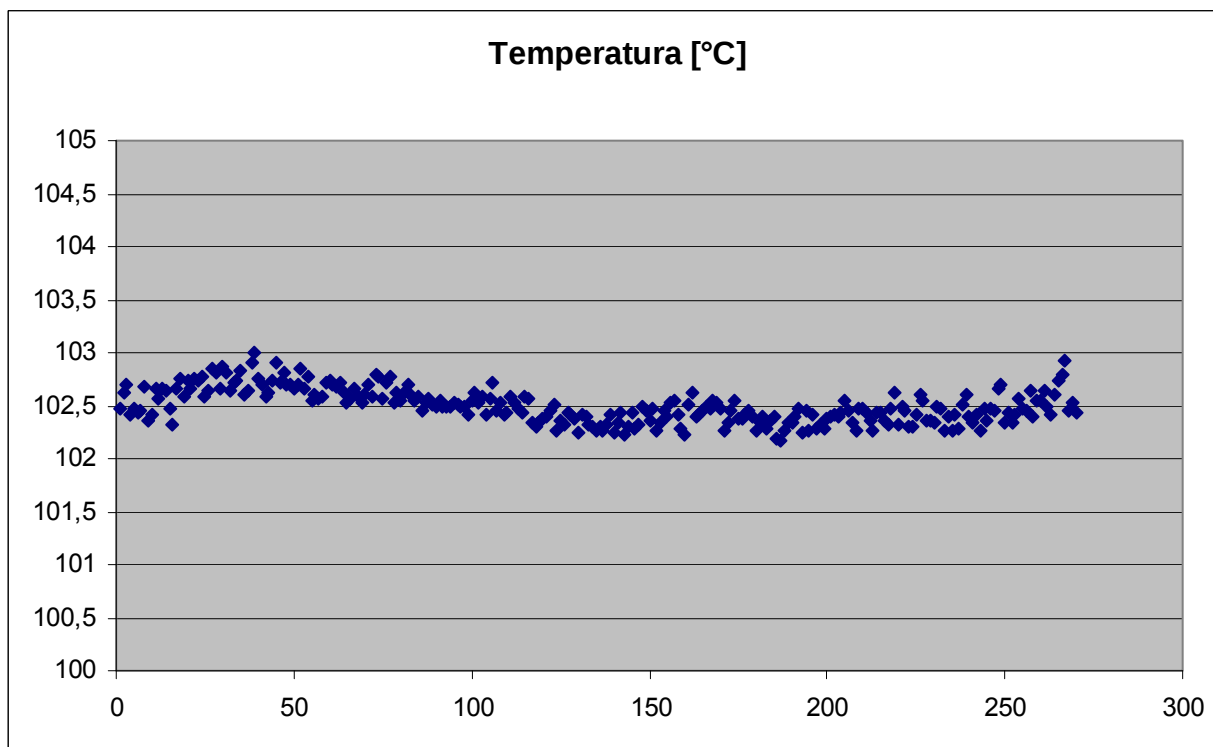


Figura 62: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
2	7	40	20	0,9584

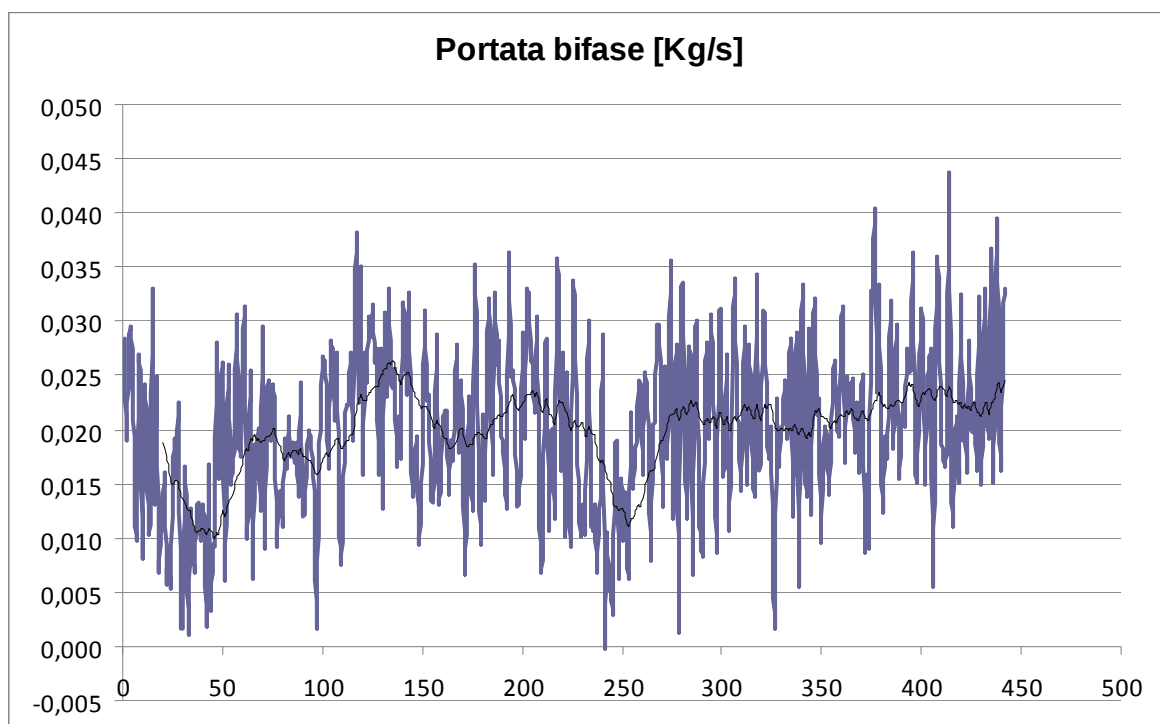


Figura 63: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

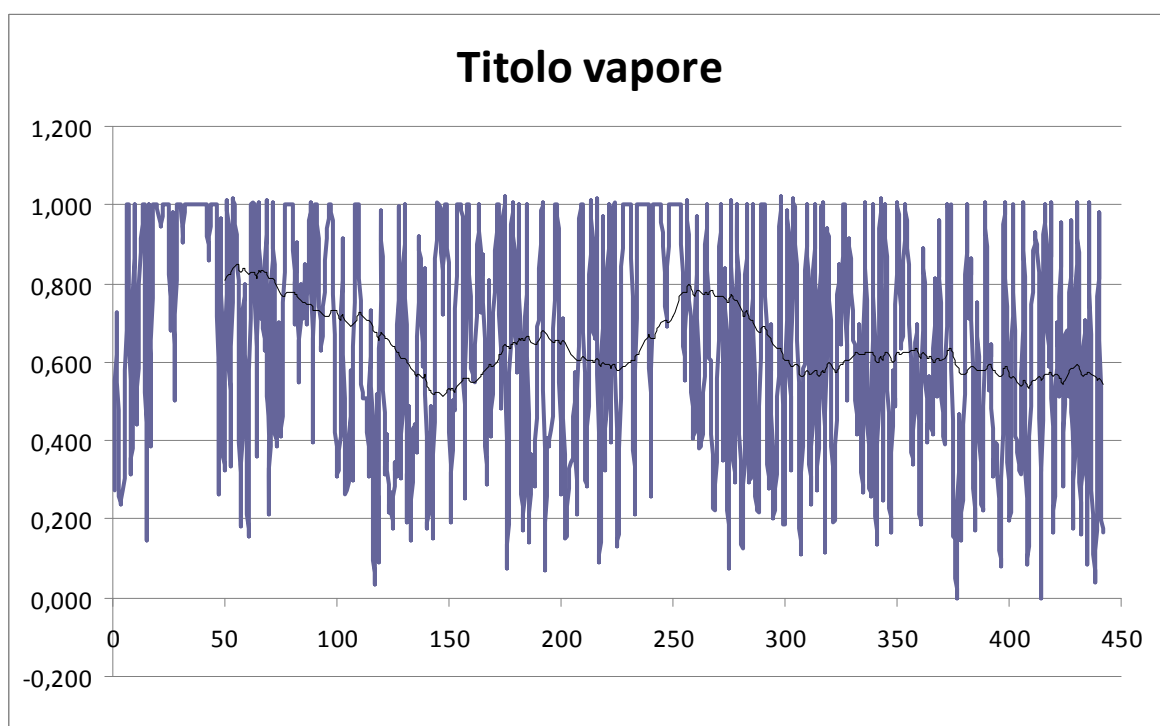


Figura 64: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

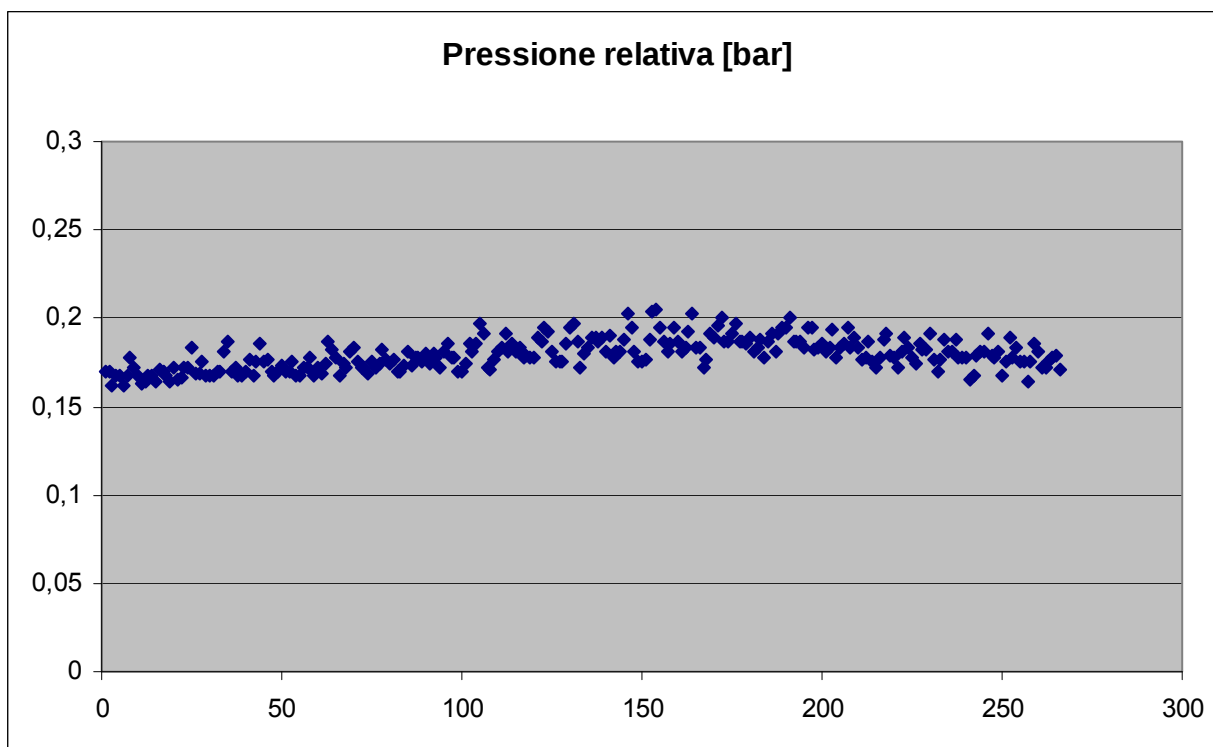


Figura 65: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

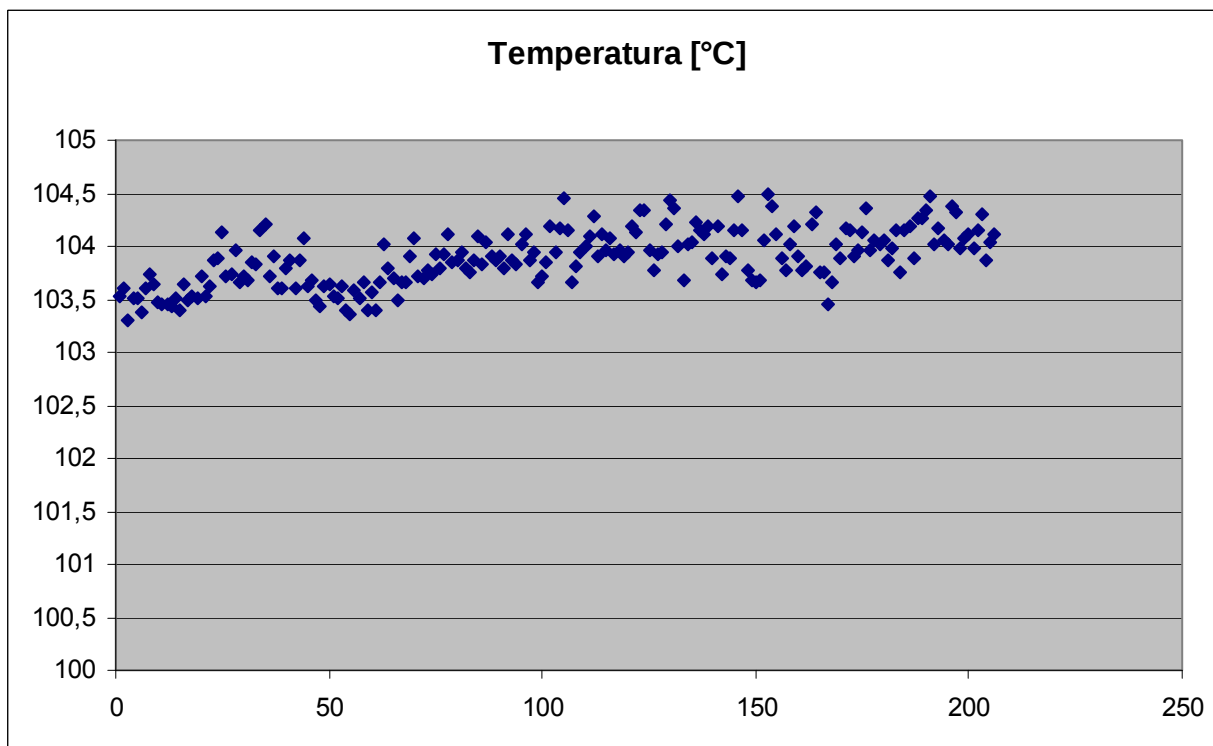


Figura 66: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

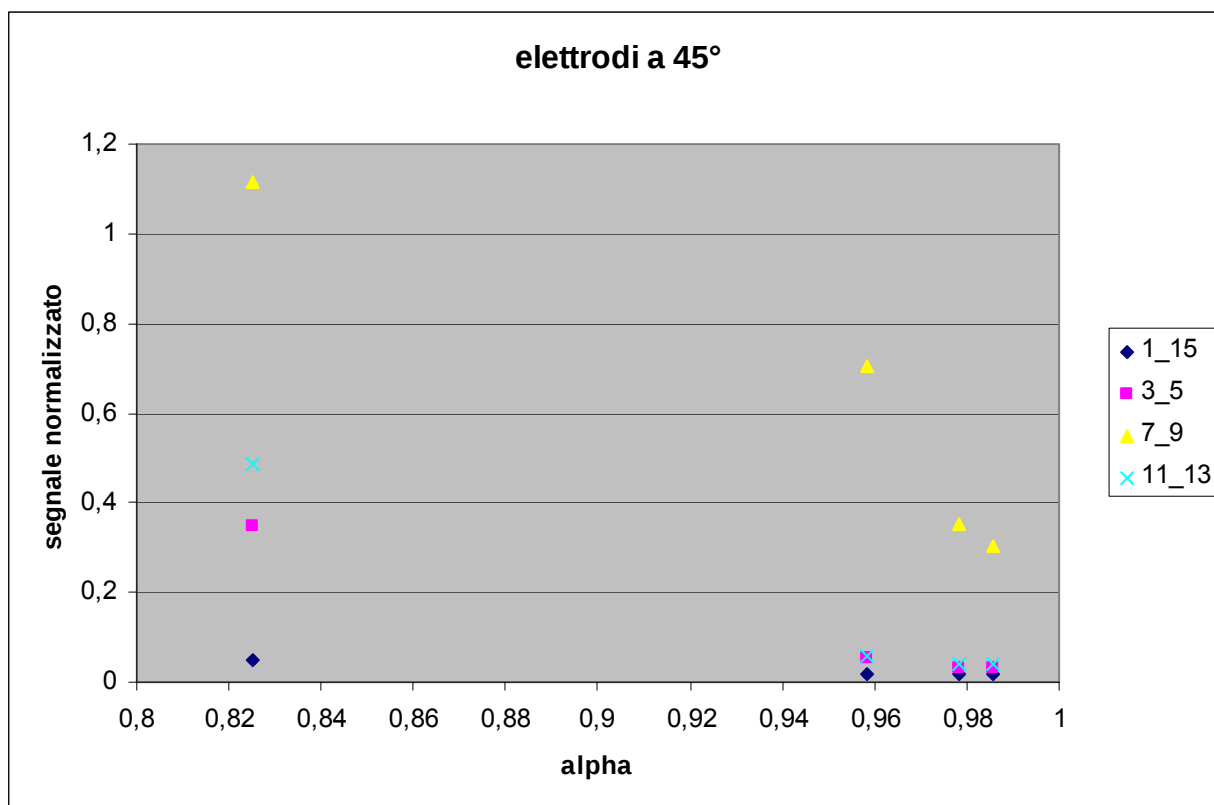


Figura 67: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°

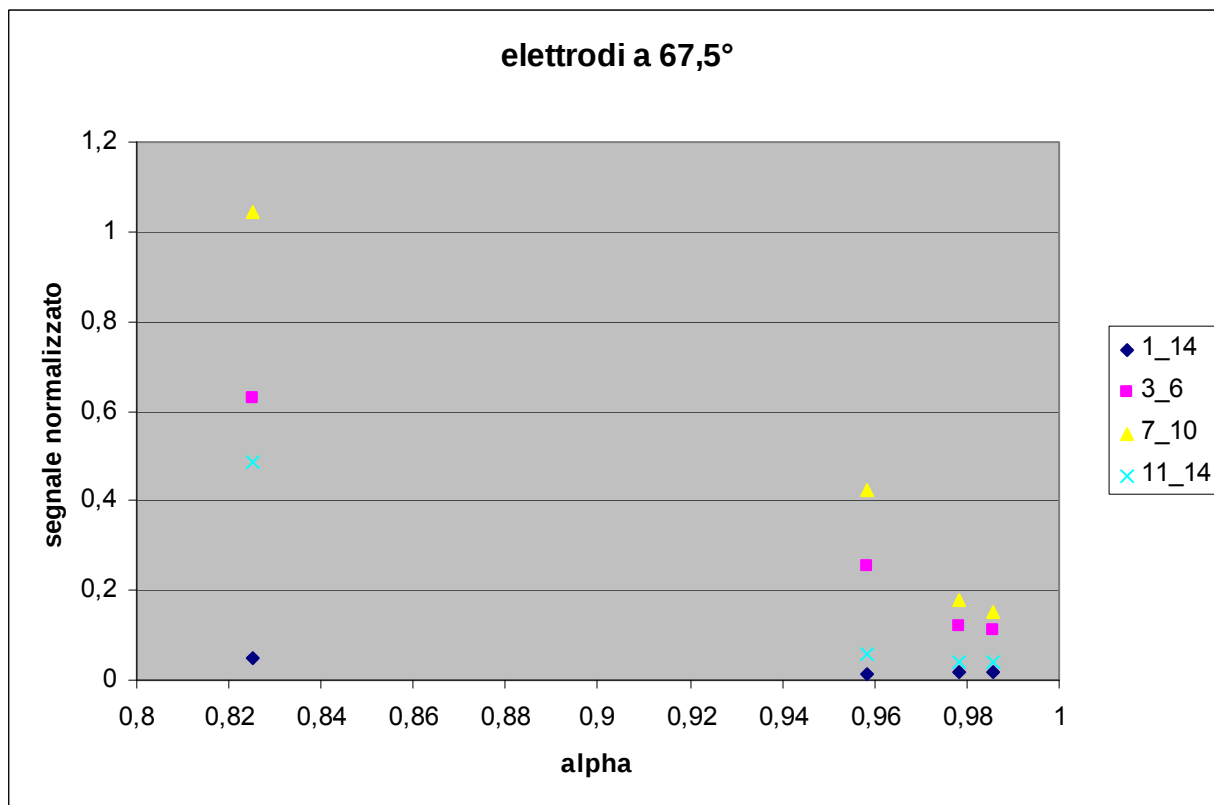


Figura 68: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°

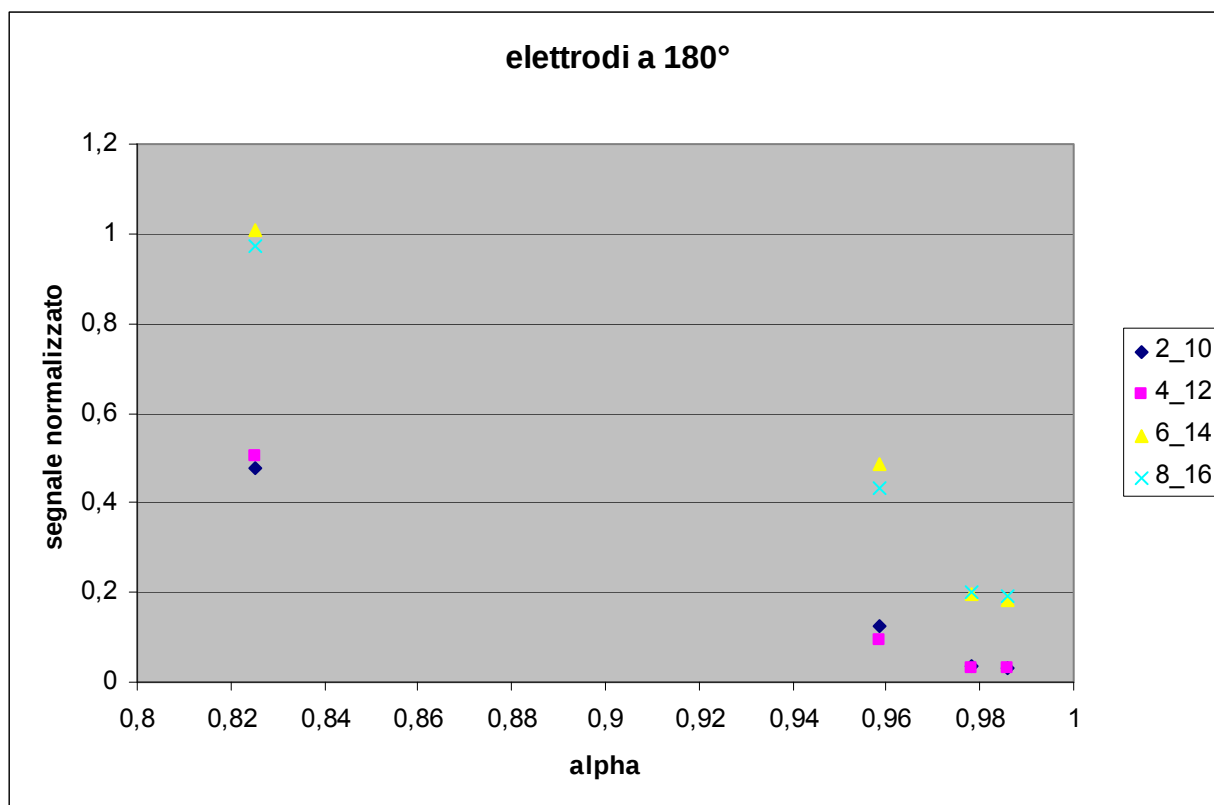


Figura 69: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°

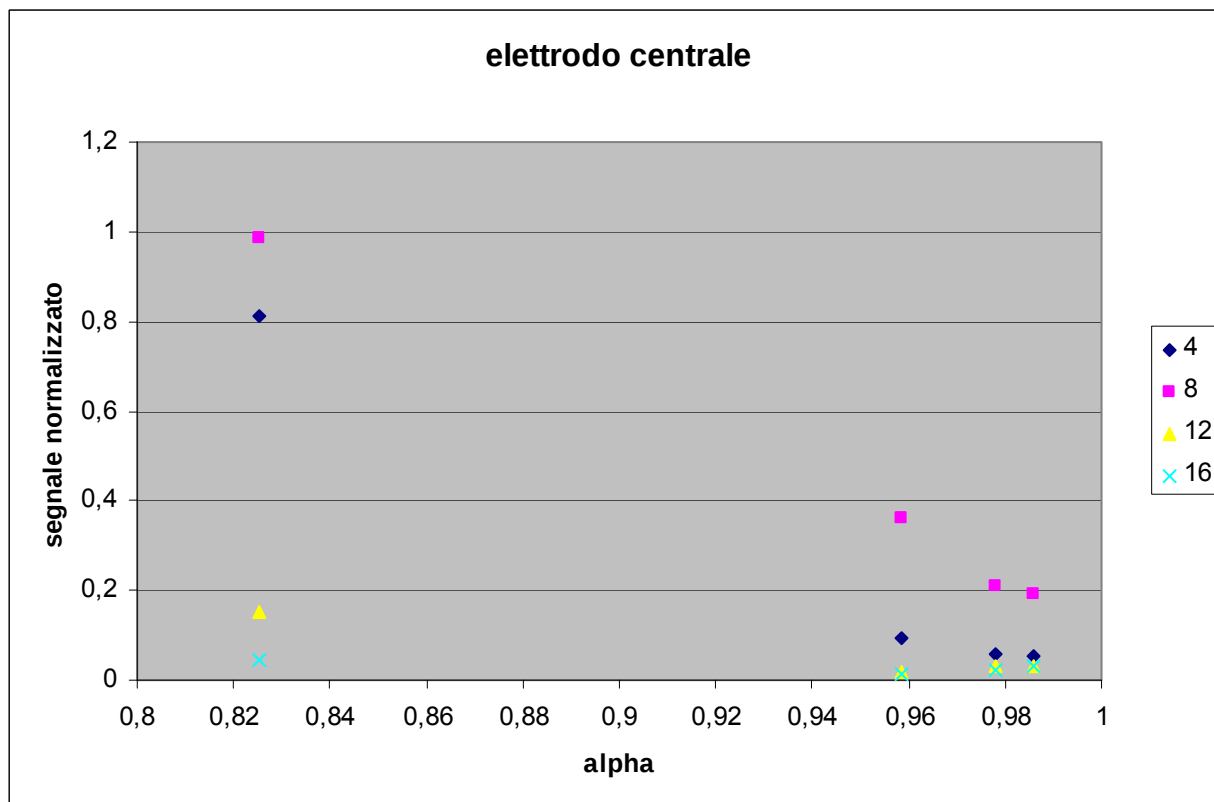


Figura 70: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato l'elettrodo centrale

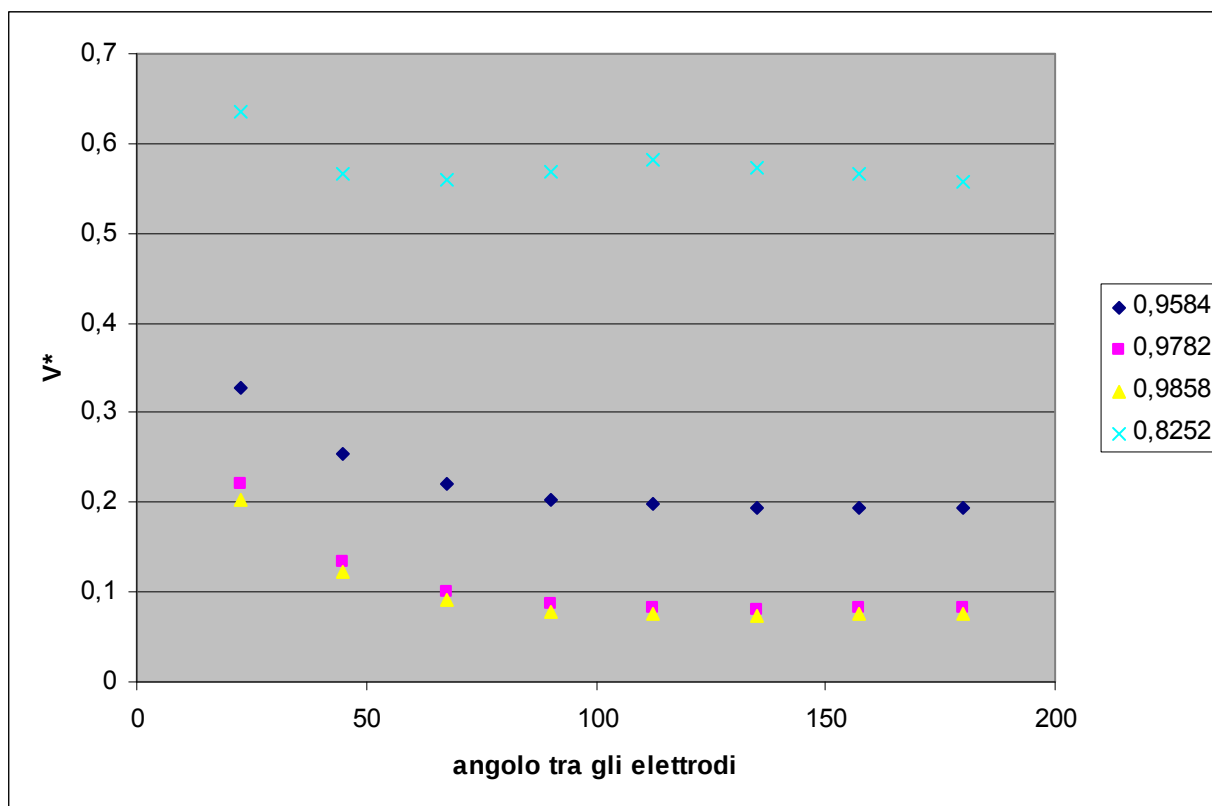


Figura 71: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha

L'andamento della pressione e della temperatura durante la fase di misura del gruppo di prove 2 si mantiene costante.

Il segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per le prove del gruppo 2, presenta un andamento monotono decrescente.

I segnali normalizzati più alti, sono quelli ottenuti con coppie di elettrodi poste in prossimità delle zone della sonda interessate da una maggior presenza di liquido e viceversa (Figura 67, 68, 69, 70).

Le curve che rappresentano, per ciascuna prova, l'andamento del segnale normalizzato in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi interessati nella misura (Figura 71) sono ordinate in funzione del grado di vuoto.

Risultati prove gruppo 3

prova	alpha	modalità di conduzione delle prove
8	0,9938	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
9	0,9914	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
10	0,9915	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
3	8	45	18,8	0,9938

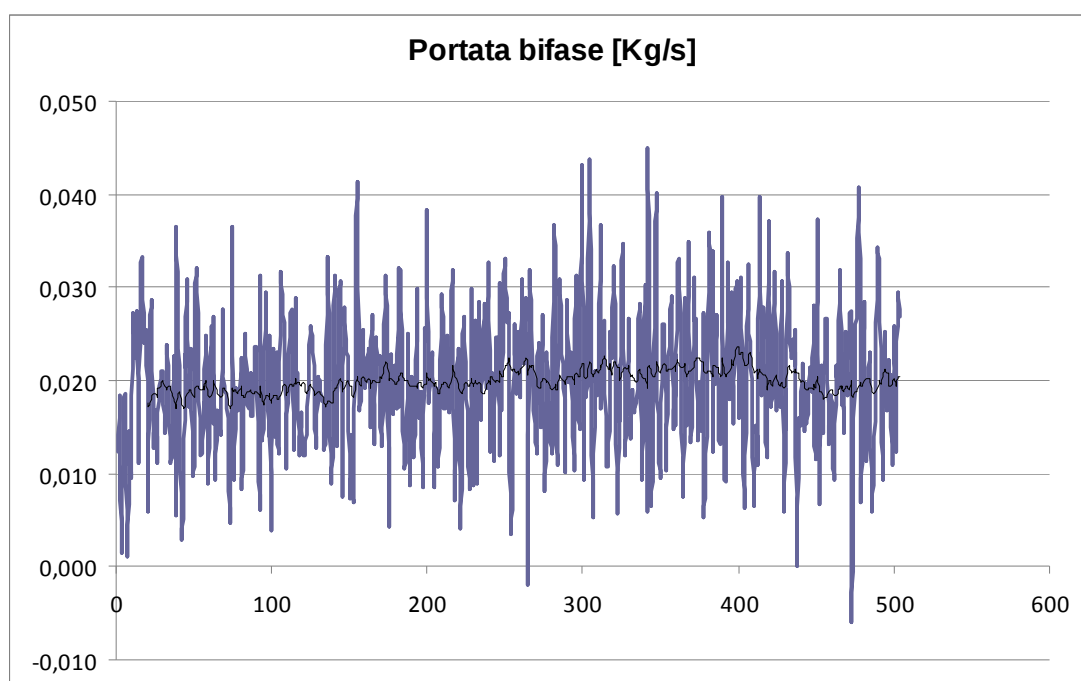


Figura 72: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

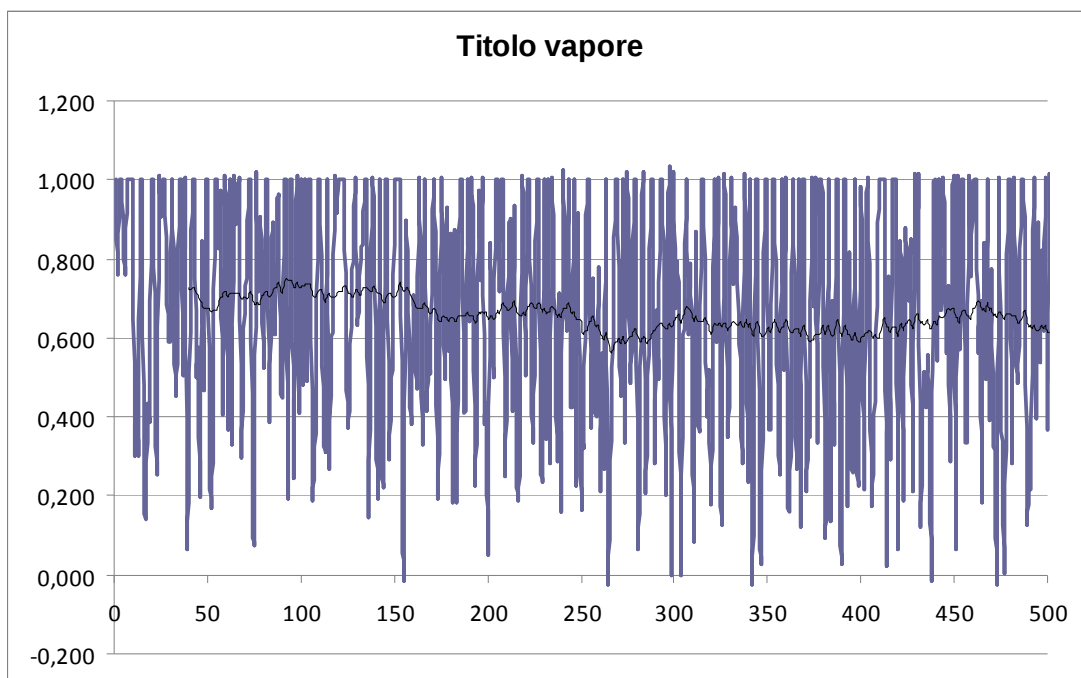


Figura 73: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

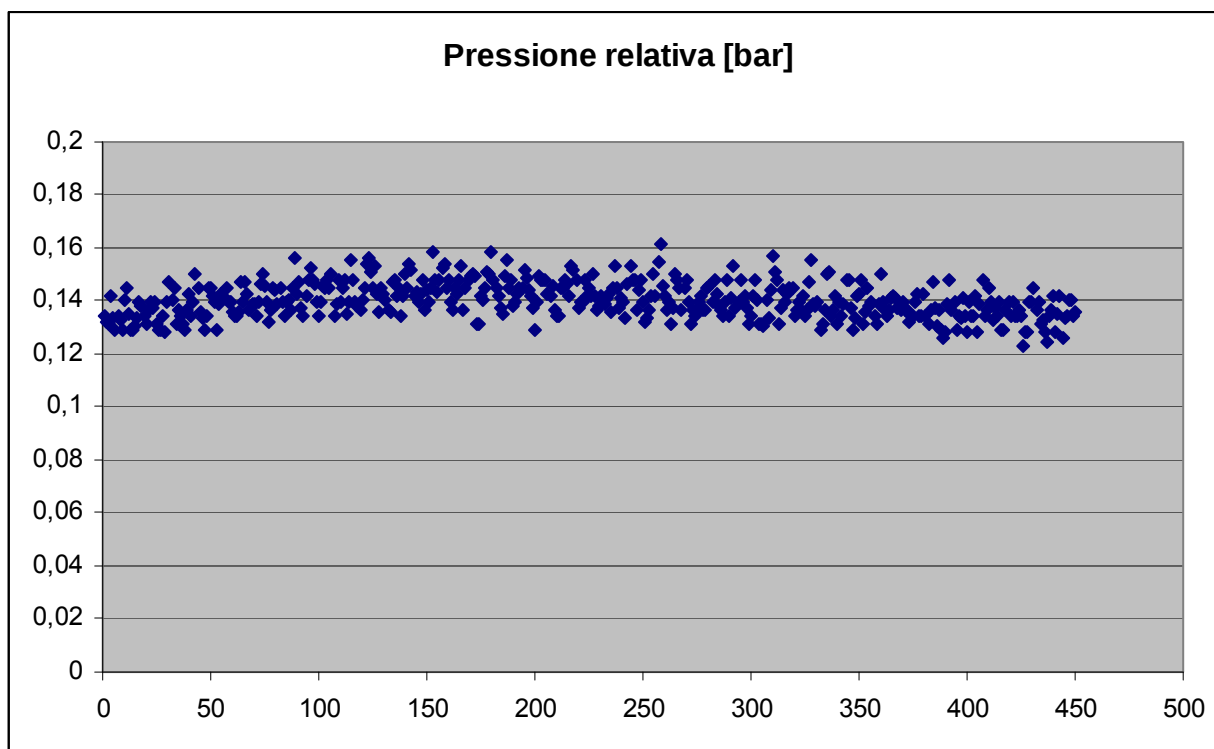


Figura 74: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

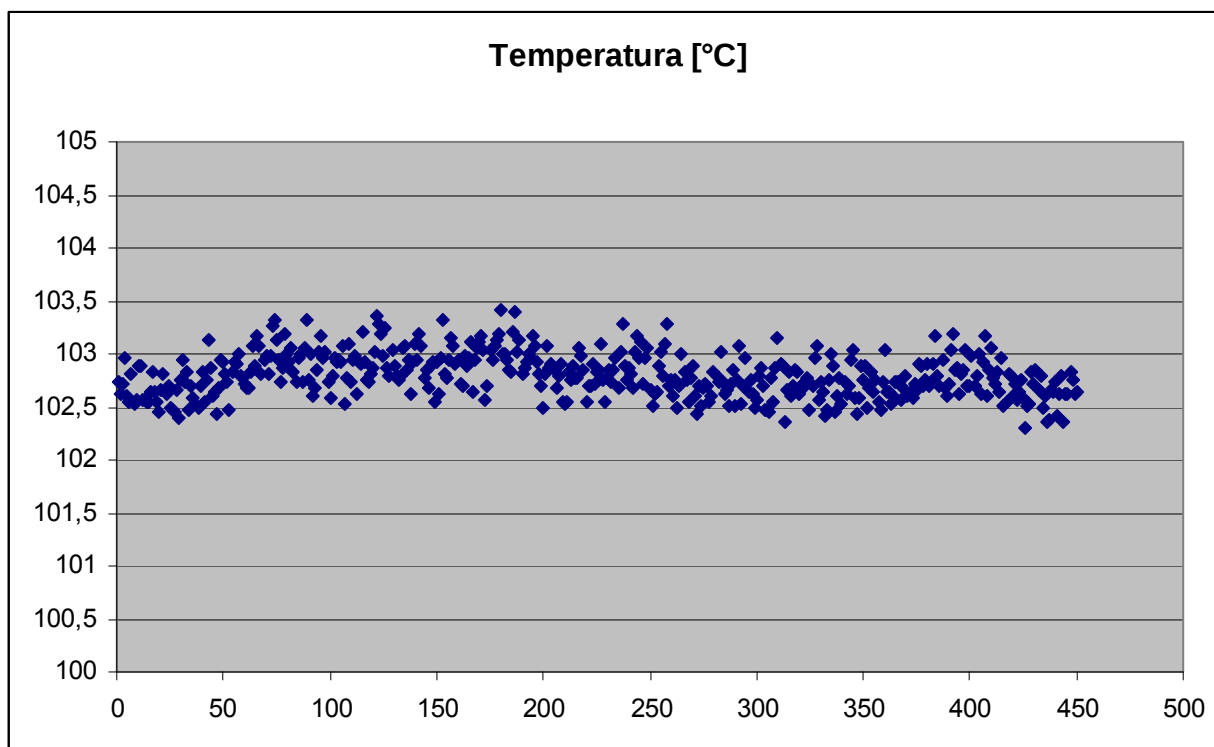


Figura 75: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
3	9	45	23,5	0,9914

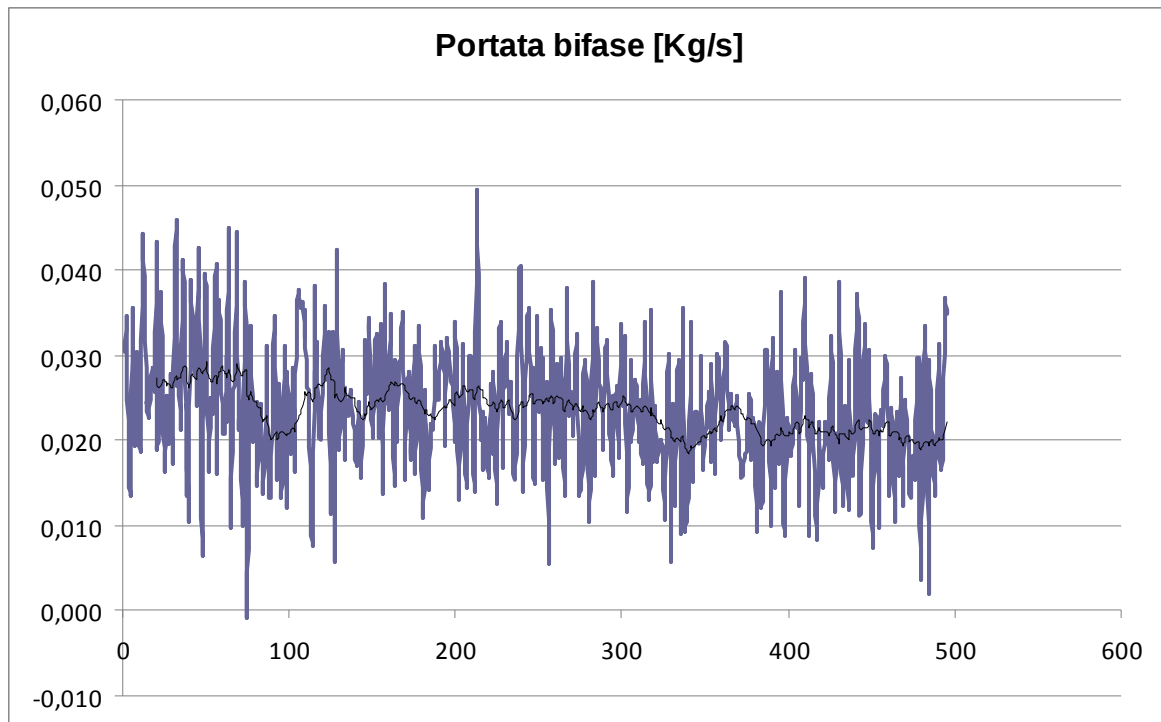


Figura 76: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

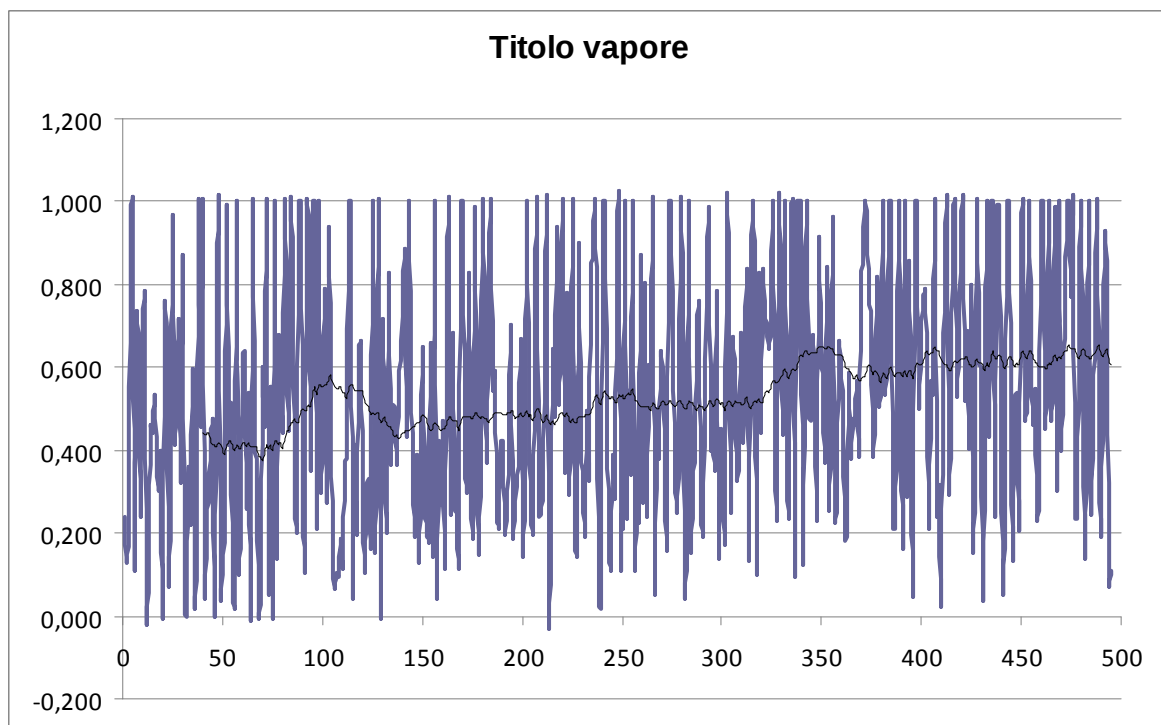


Figura 77: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

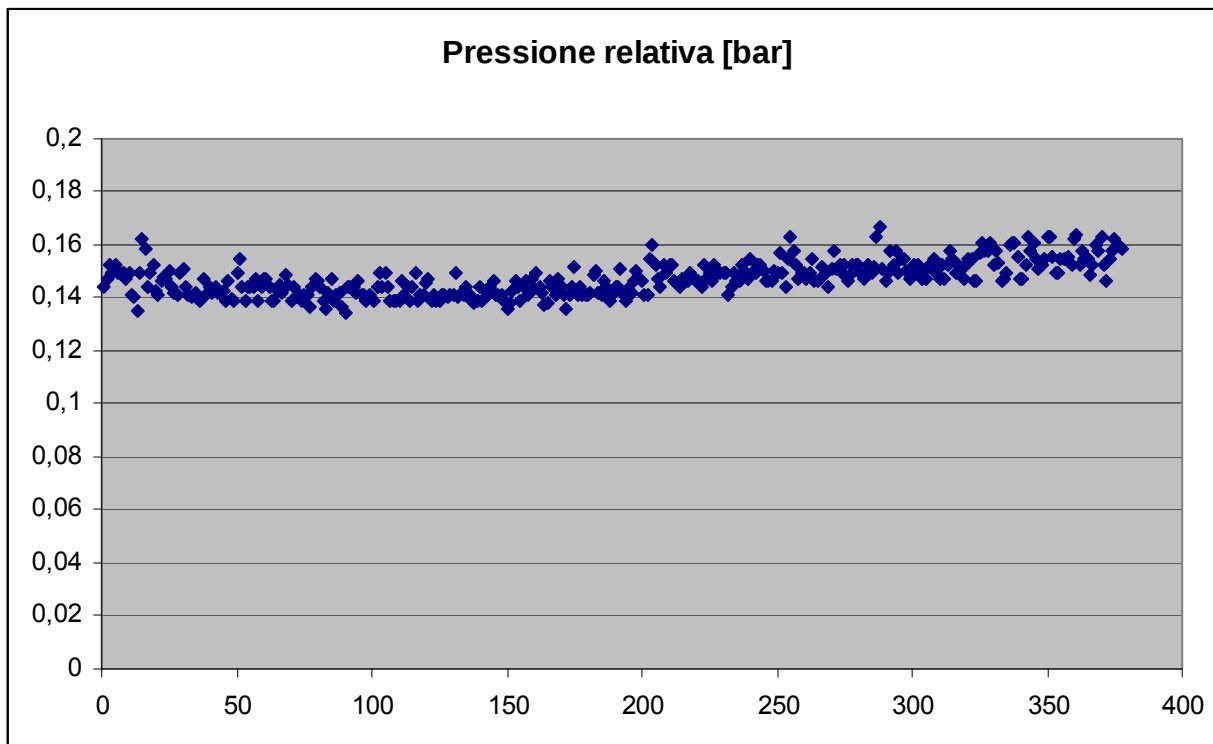


Figura 78: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

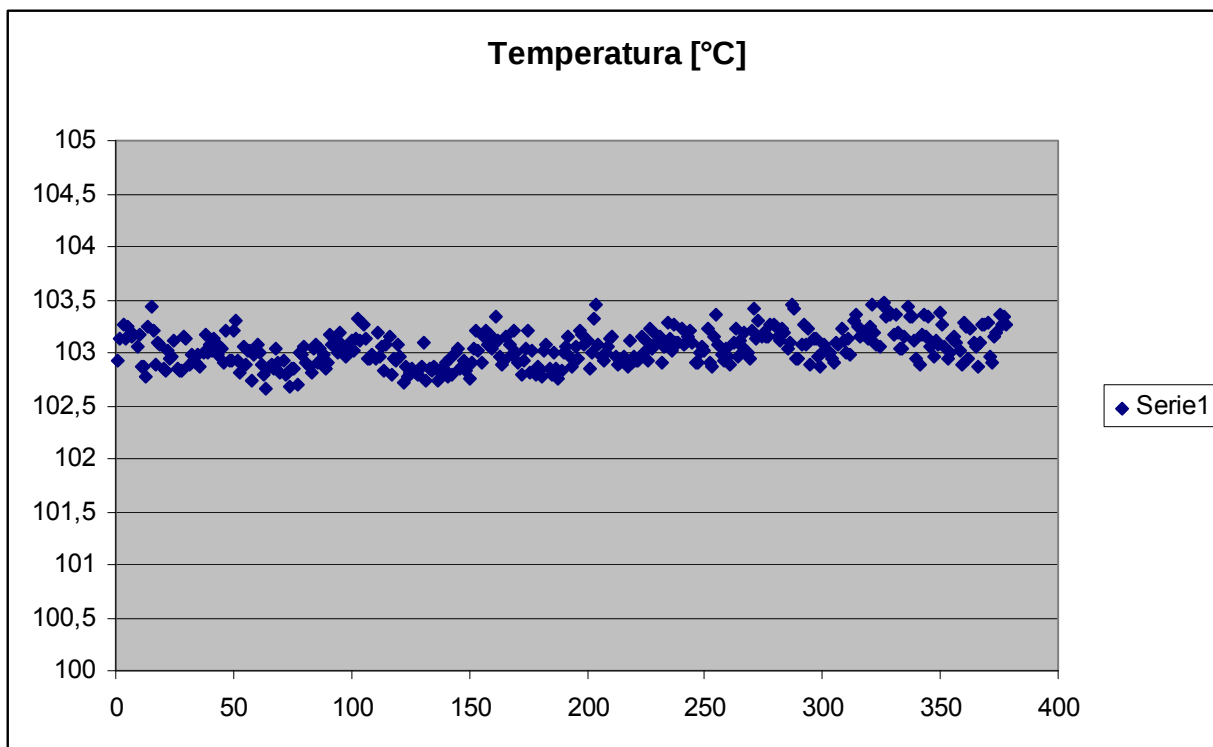


Figura 79: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
3	10	45	20,2	0,9915

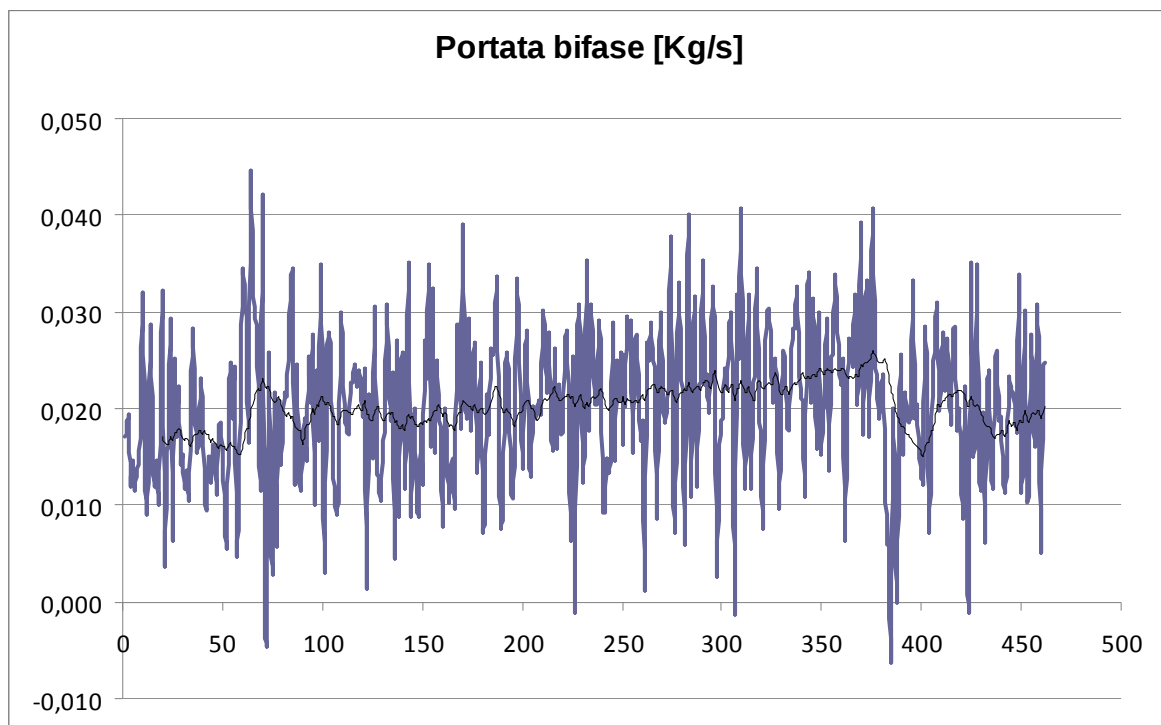


Figura 80: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

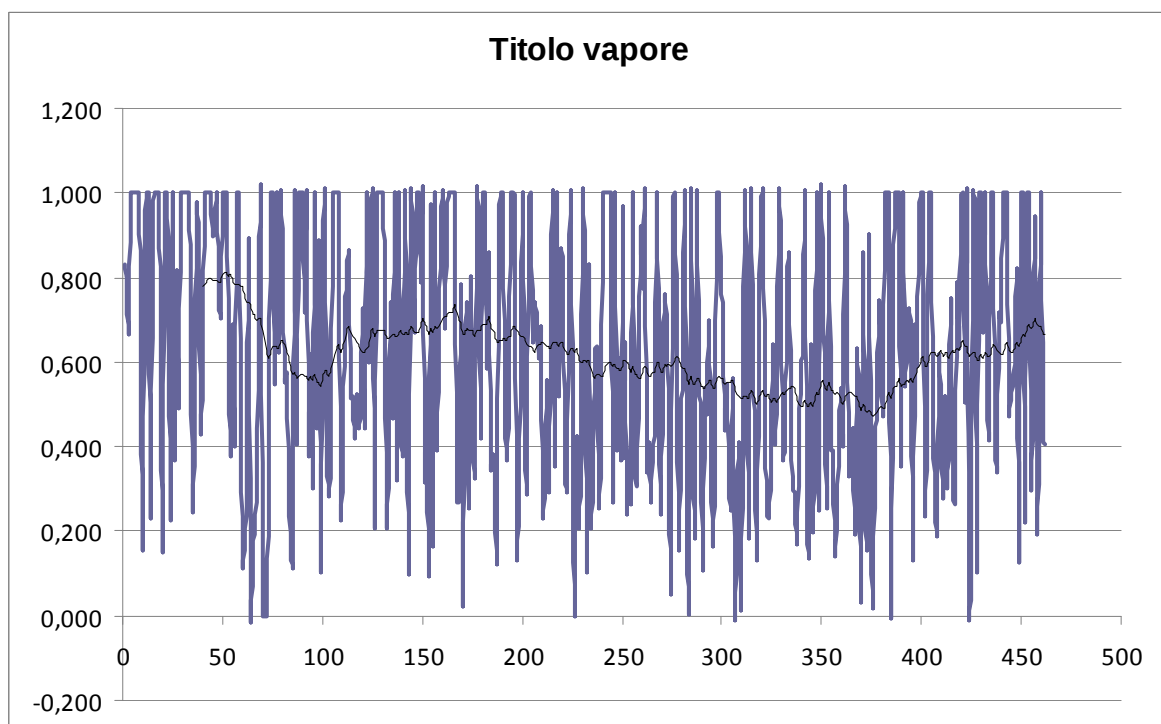


Figura 81: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

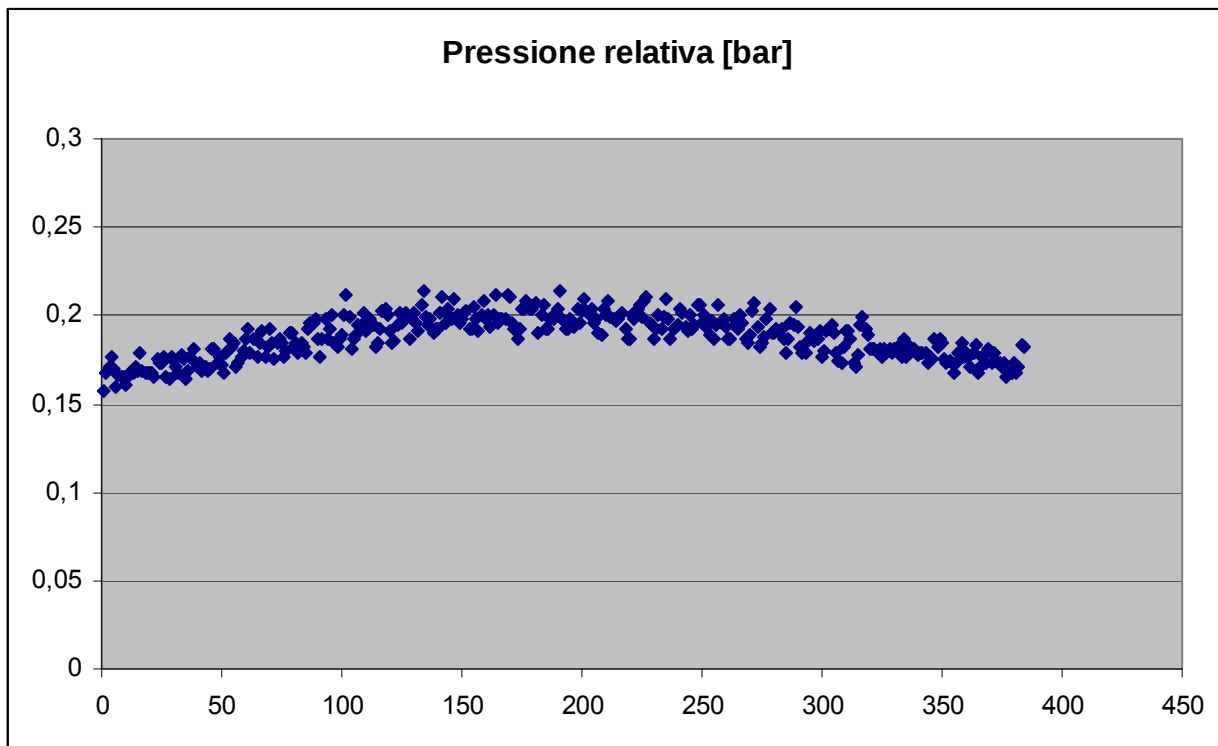


Figura 82: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

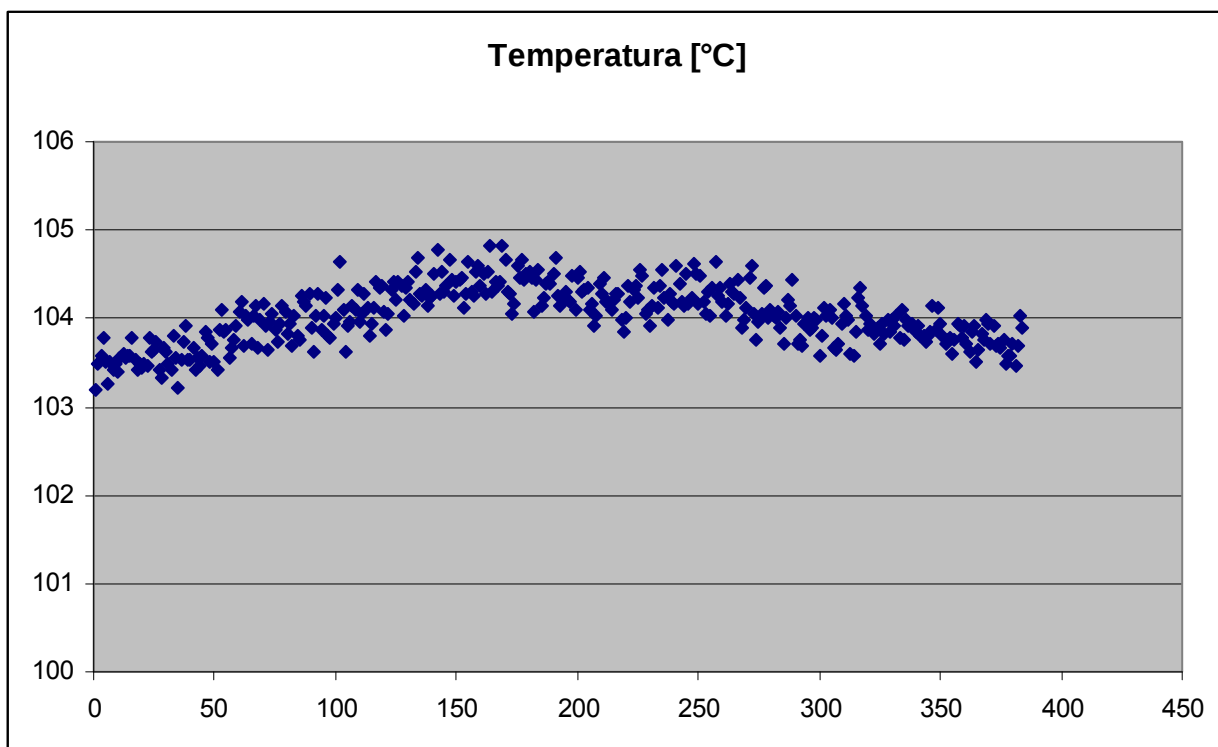


Figura 83: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Risultati prove gruppo 4

prova	alpha	modalità di conduzione delle prove
11	0,6351	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido aperta (1/8 di giro), un drenaggio aperto
12	0,9824	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido aperta (1/16 di giro), un drenaggio aperto
13	0,7455	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido aperta (1/16 di giro), due drenaggi aperti

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
4	11	50	67,8	0,6351

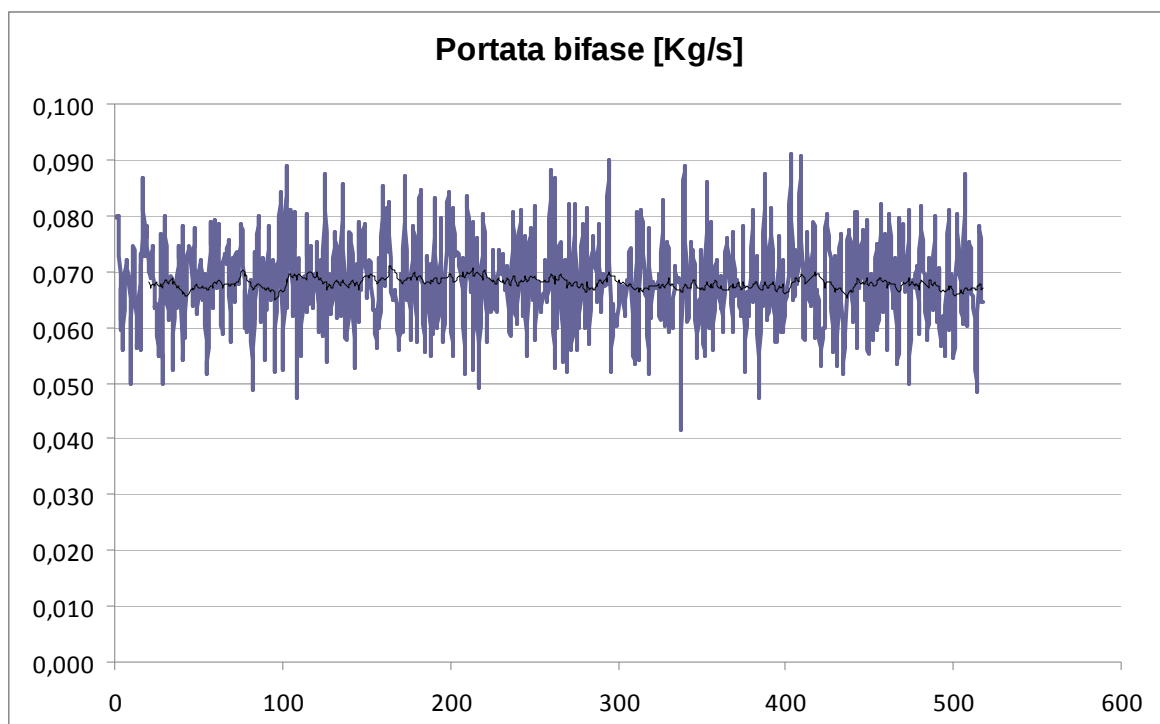


Figura 84: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

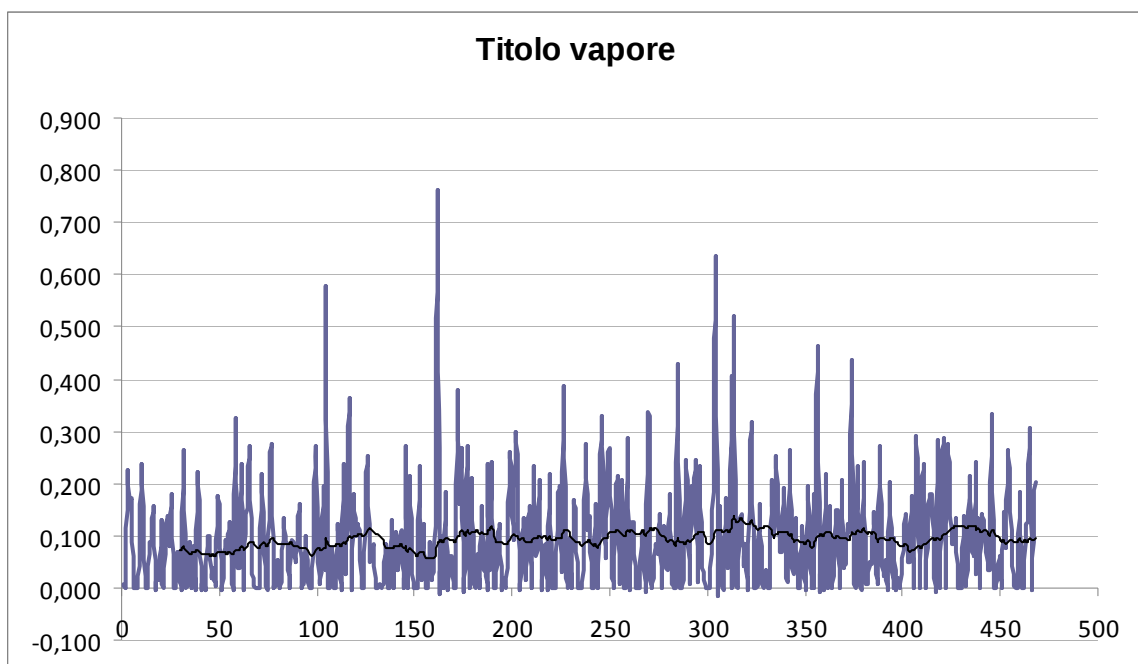


Figura 85: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

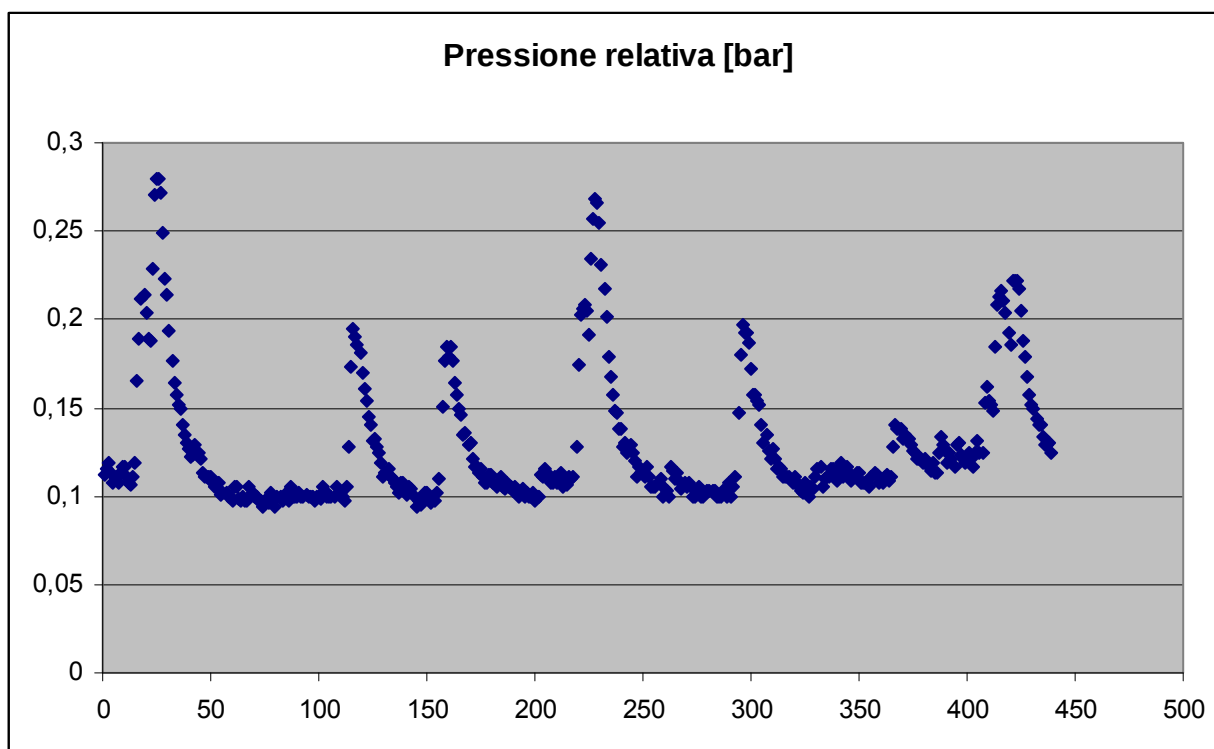


Figura 86: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

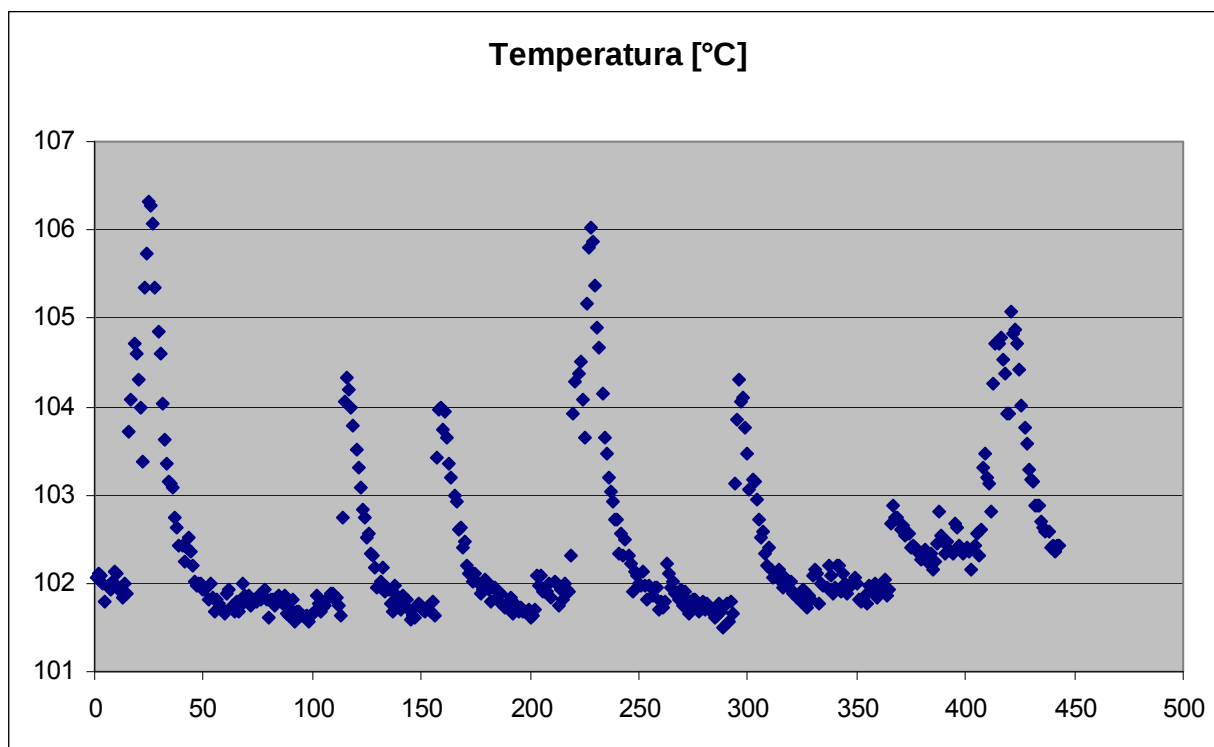


Figura 87: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
4	12	50	28,8	0,9824

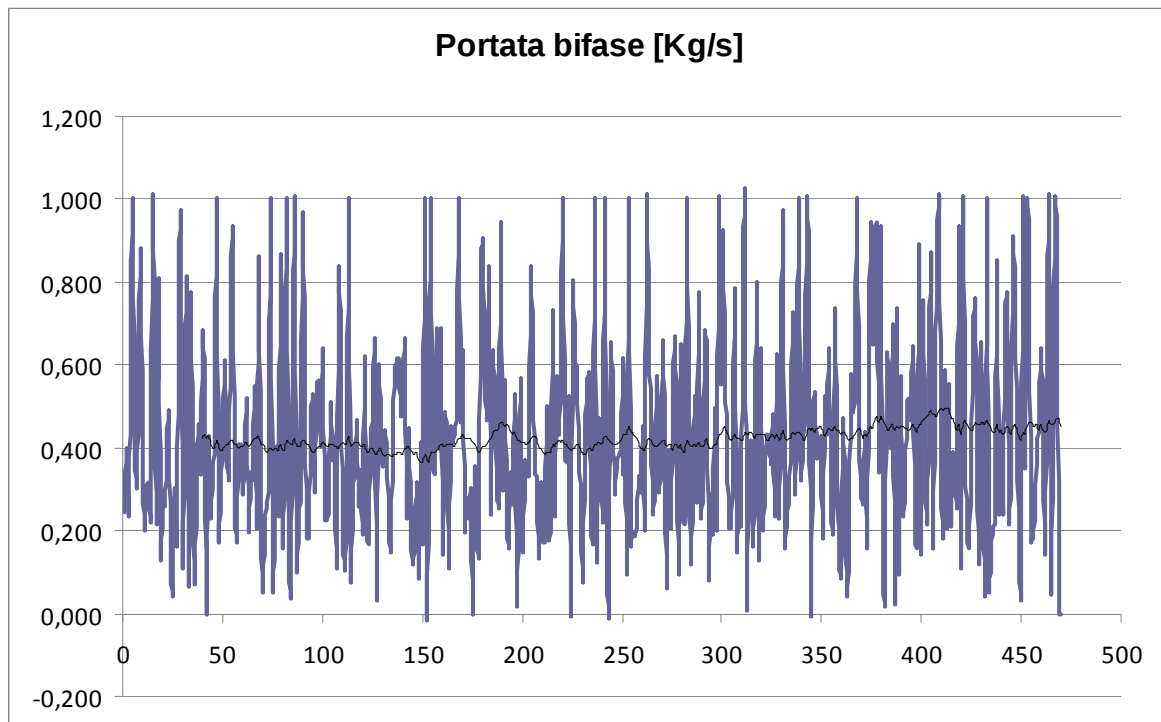


Figura 88: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

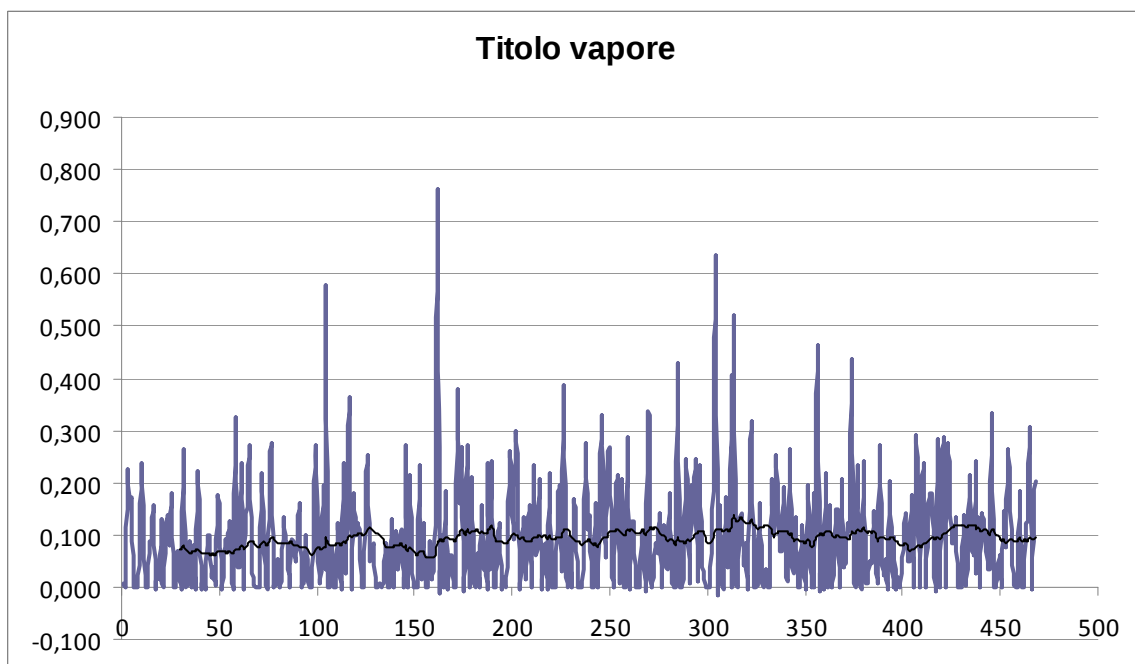


Figura 89: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

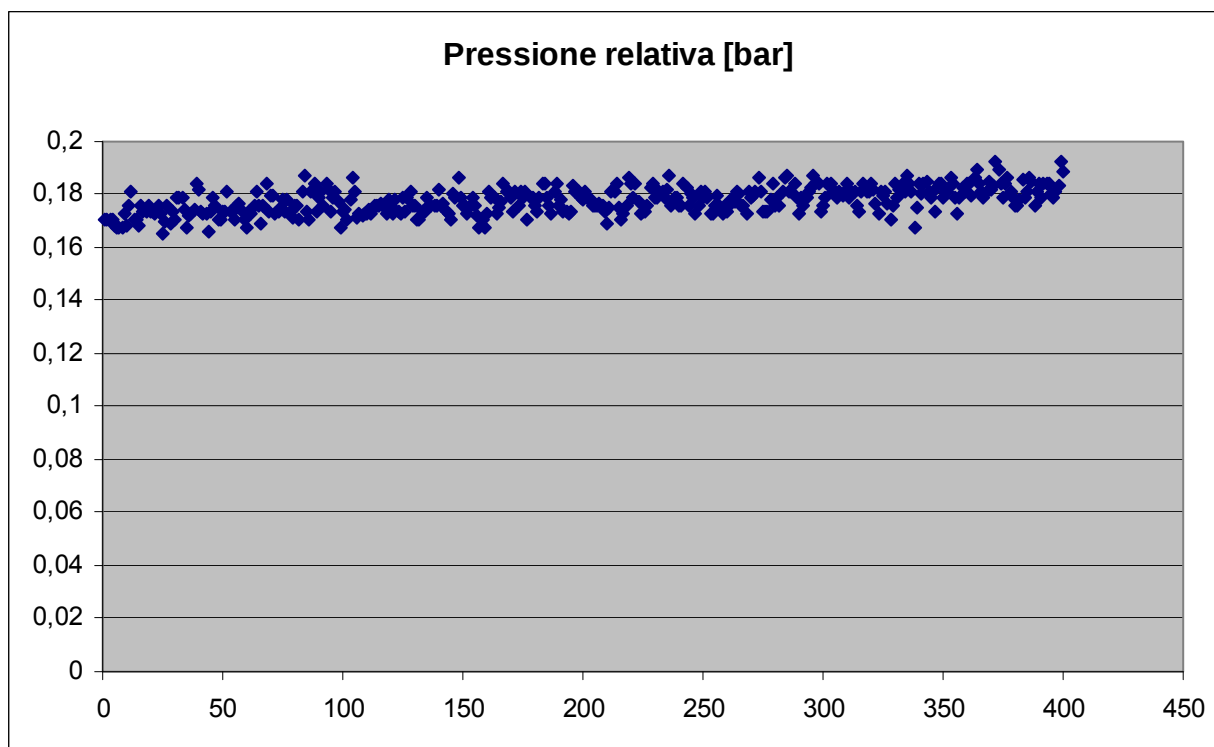


Figura 90: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

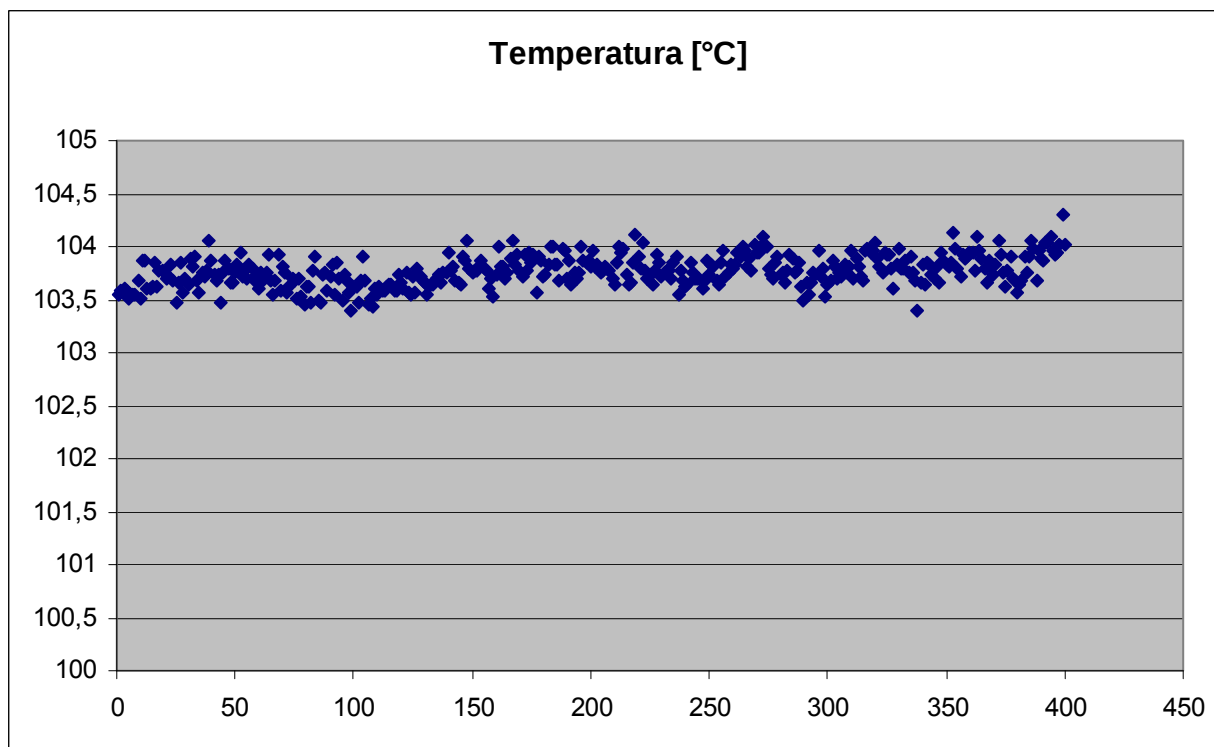


Figura 91: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
4	13	50	43,5	0,7455

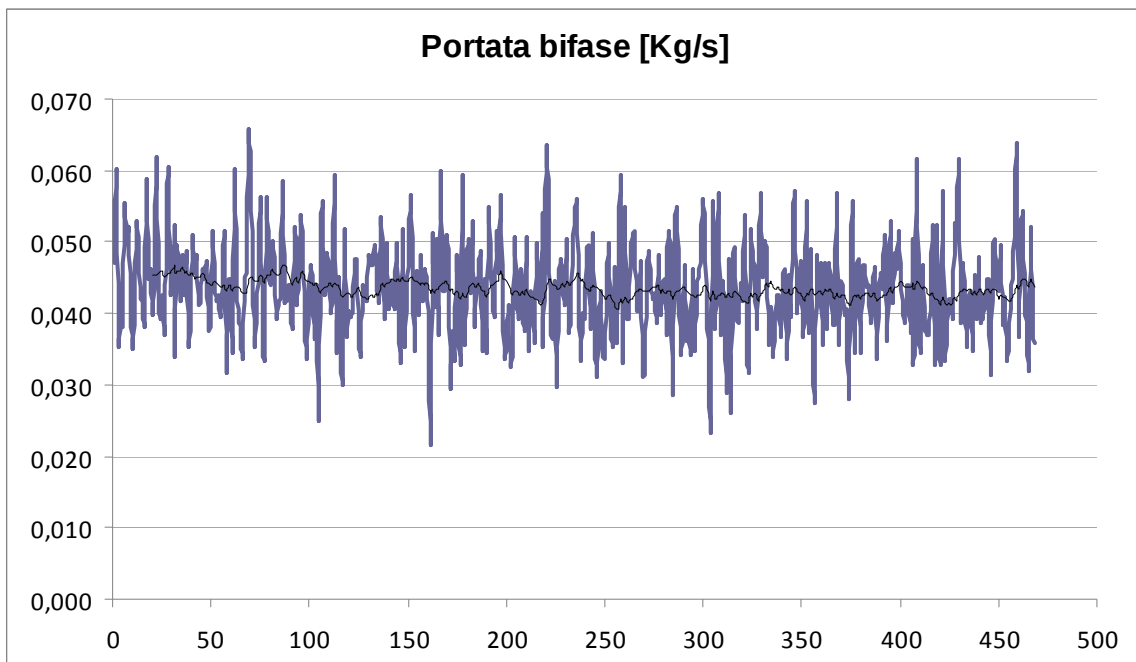


Figura 92: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

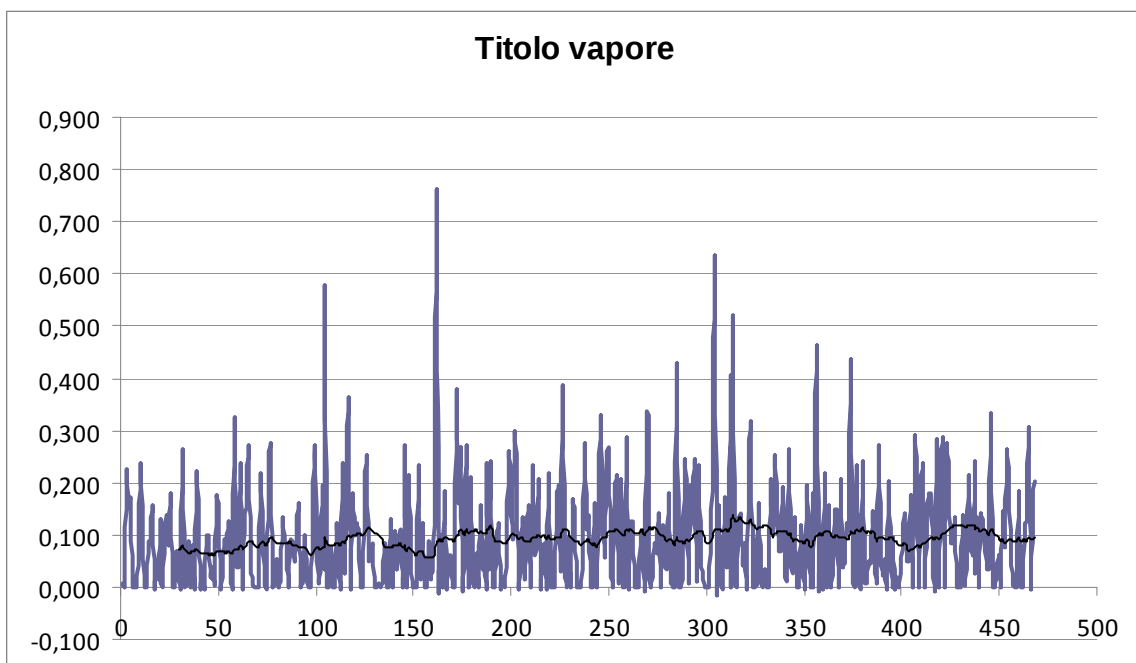


Figura 93: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

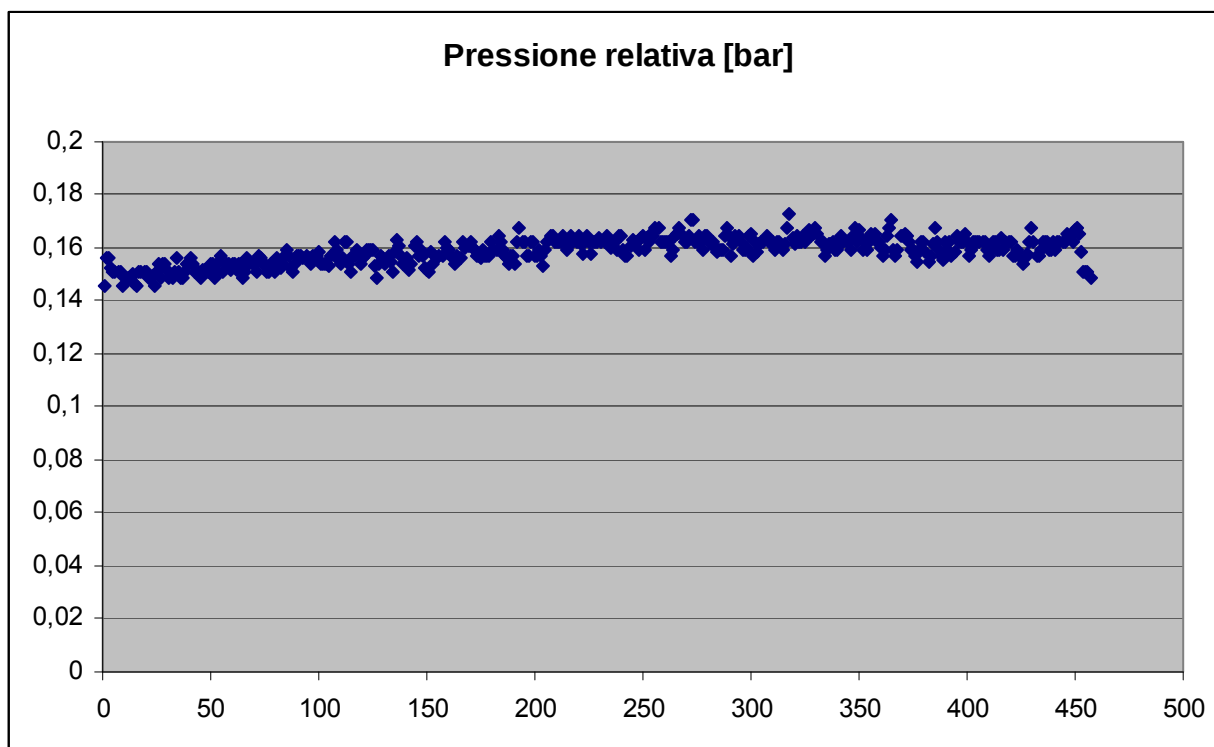


Figura 94: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

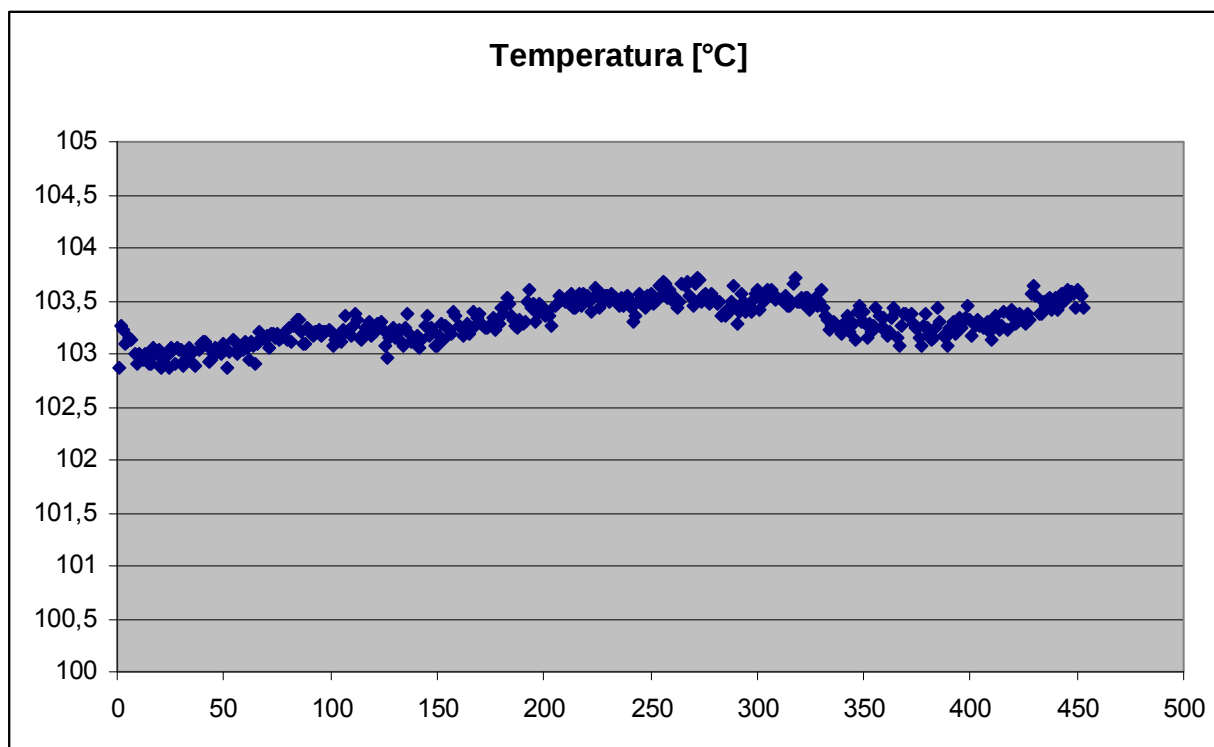


Figura 95: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

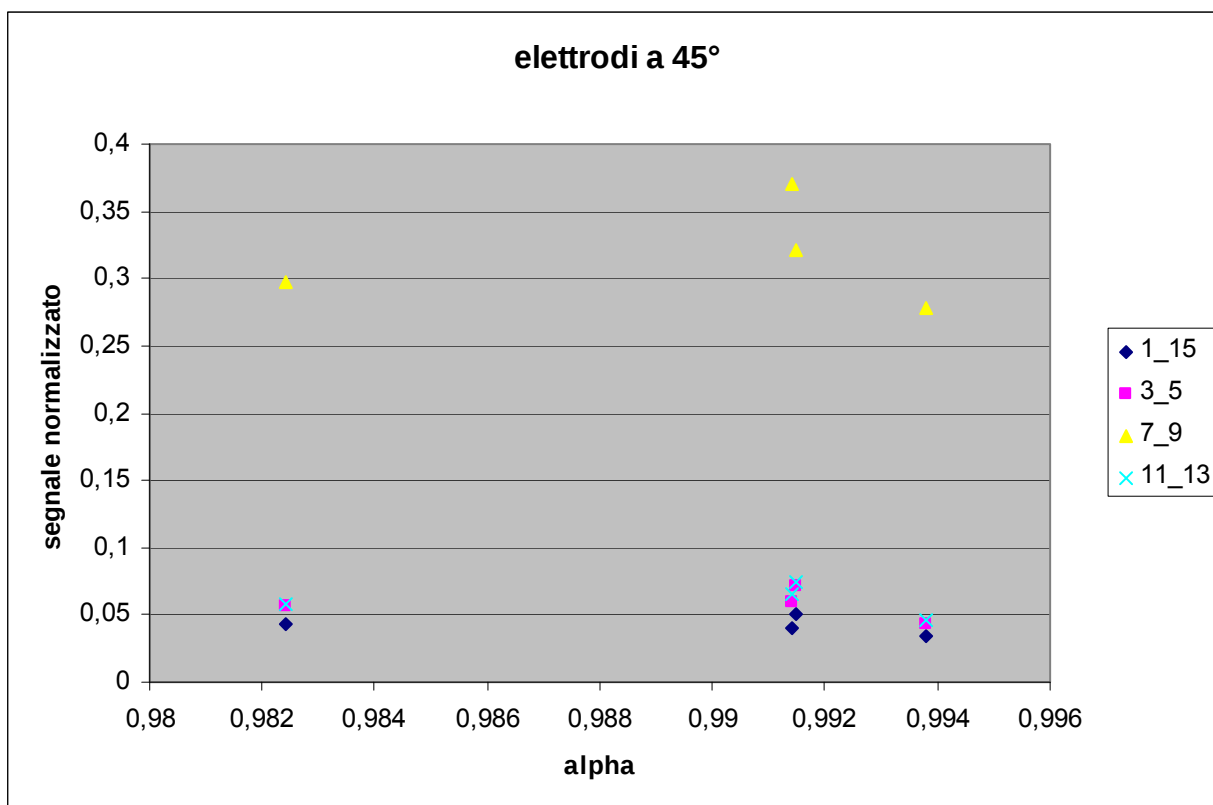


Figura 96: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°

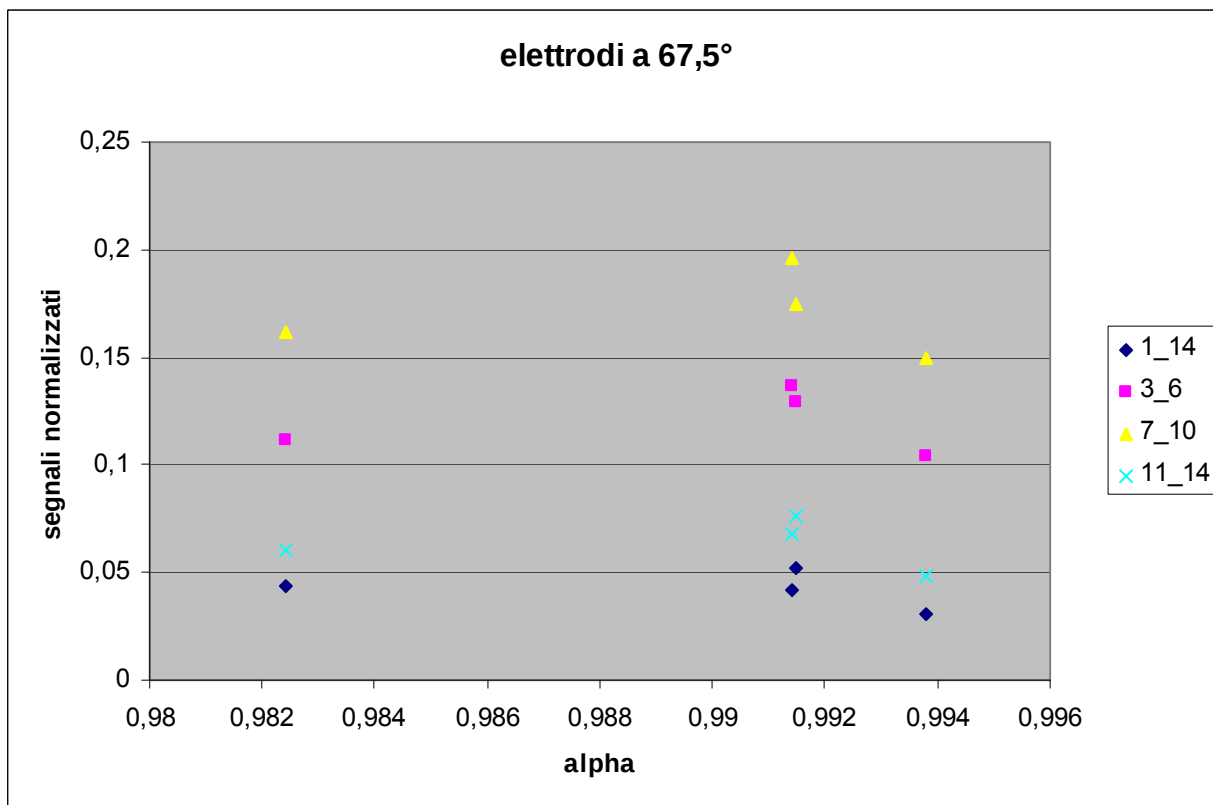


Figura 97: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°

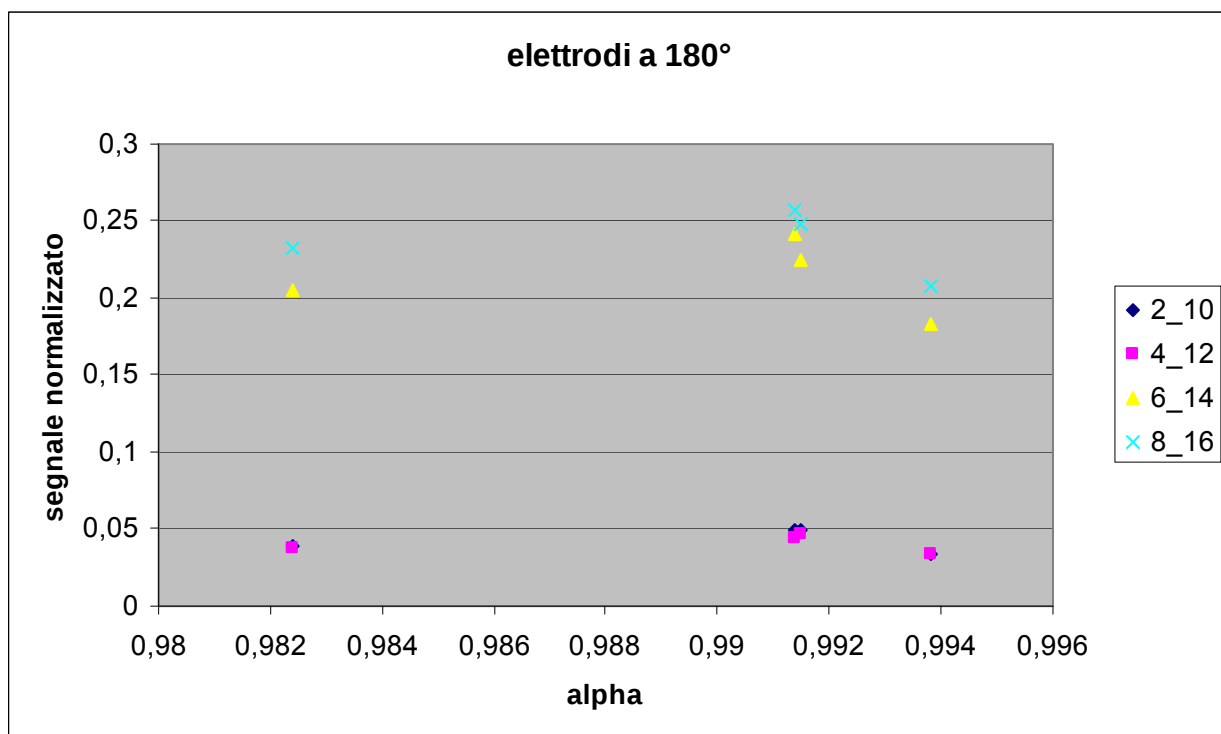


Figura 98: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°

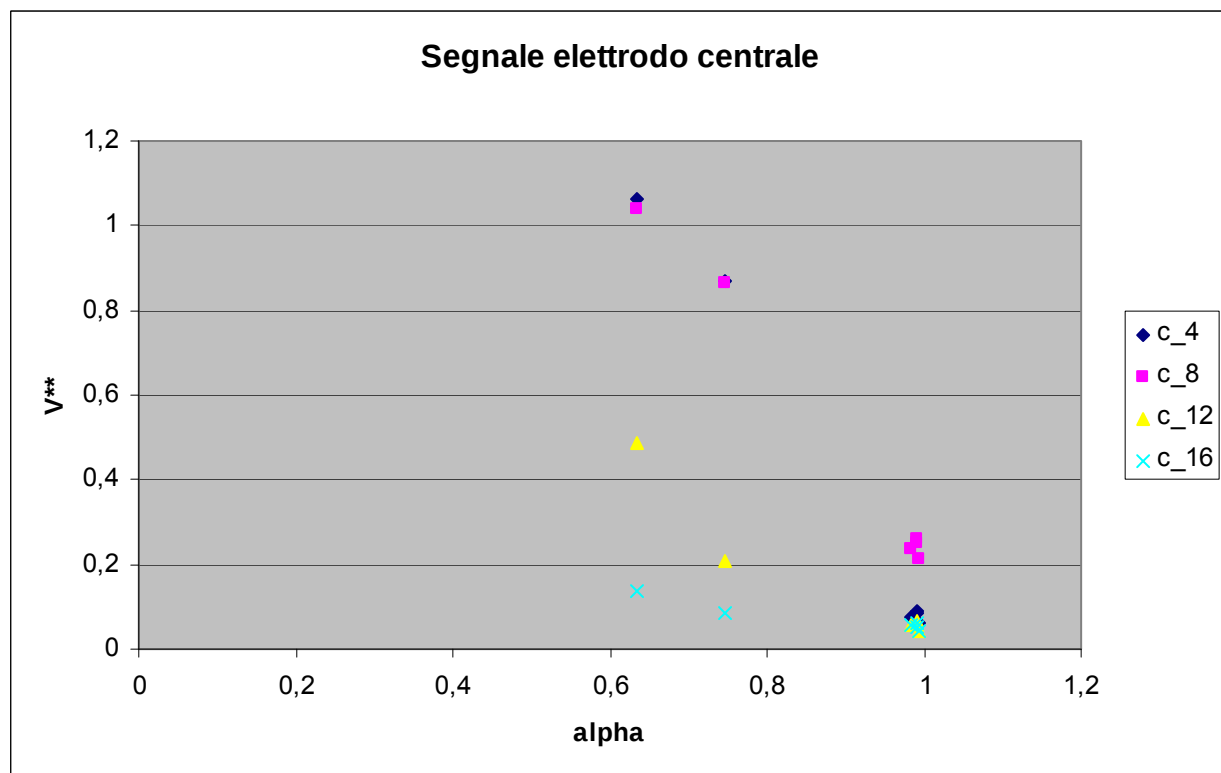


Figura 99: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato l'elettrodo centrale

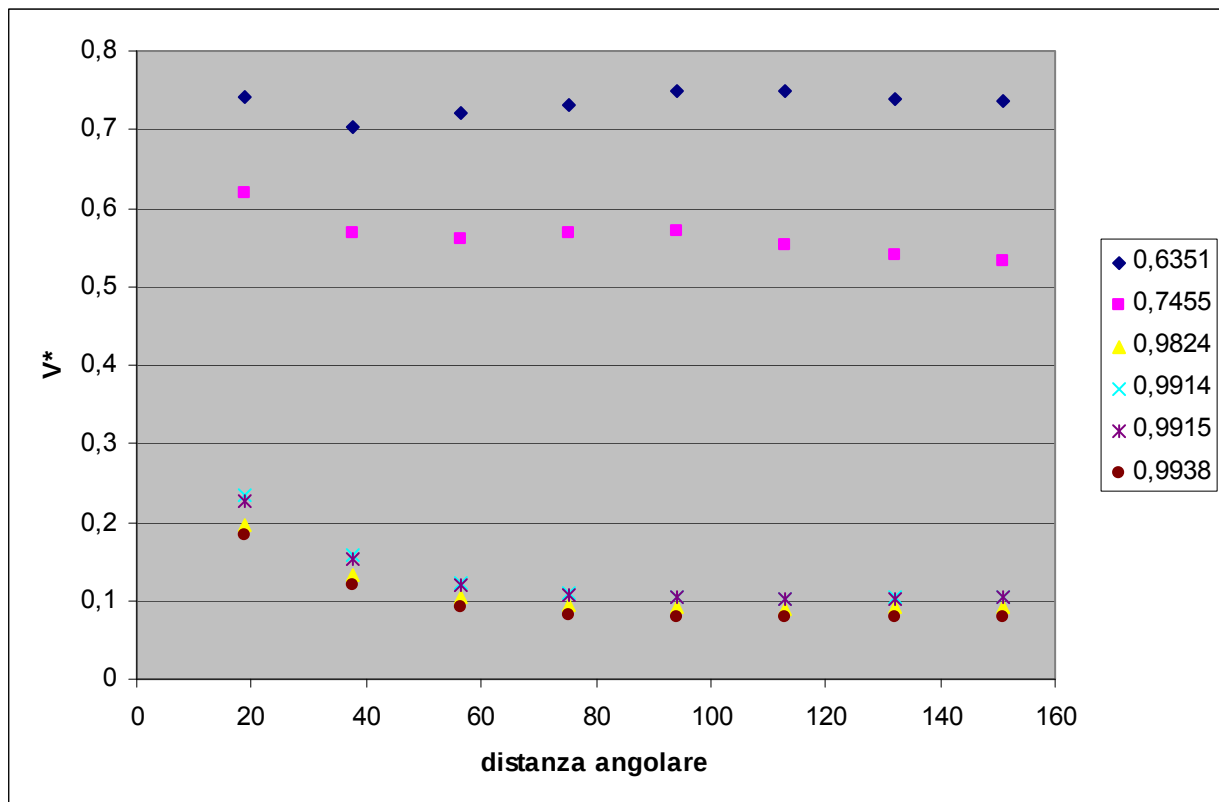


Figura 100: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha

L'andamento della temperatura e della pressione nelle prove 8, 9, 10, 12 e 13 durante tutta la fase di misura è costante. Viceversa, la temperatura e la pressione nella prova 11, caratterizzata da un grado di vuoto di circa 0,6351 presenta un andamento fluttuante (Figure 86 e 87) che indica probabilmente la presenza di un moto a slug.

Il segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per le prove del gruppo 3 e 4 presentano un andamento monotono decrescente. Una anomalia è riscontrata nei valori del segnale delle prove 9 e 10, i cui valori risultano più alti di quelli relativi alla prova 12 caratterizzata da un grado di vuoto inferiore (Figure 96, 97, 98 e 99).

Le curve che rappresentano, per ciascuna prova, l'andamento del segnale normalizzato in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi interessati nella misura (Figura 100) sono ordinate in funzione del grado di vuoto. Le curve relative alle prove 2 e 3 risultano sovrapposte infatti, i rispettivi gradi di vuoto sono praticamente i medesimi.

Risultati prove gruppo 5

prova	alpha	modalità di conduzione delle prove
14	0,908	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
15	0,587	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
16	0,9591	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
17	0,5794	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido aperta (3/4 di giro), un drenaggi aperti

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
5	14	75	36,5	0,908

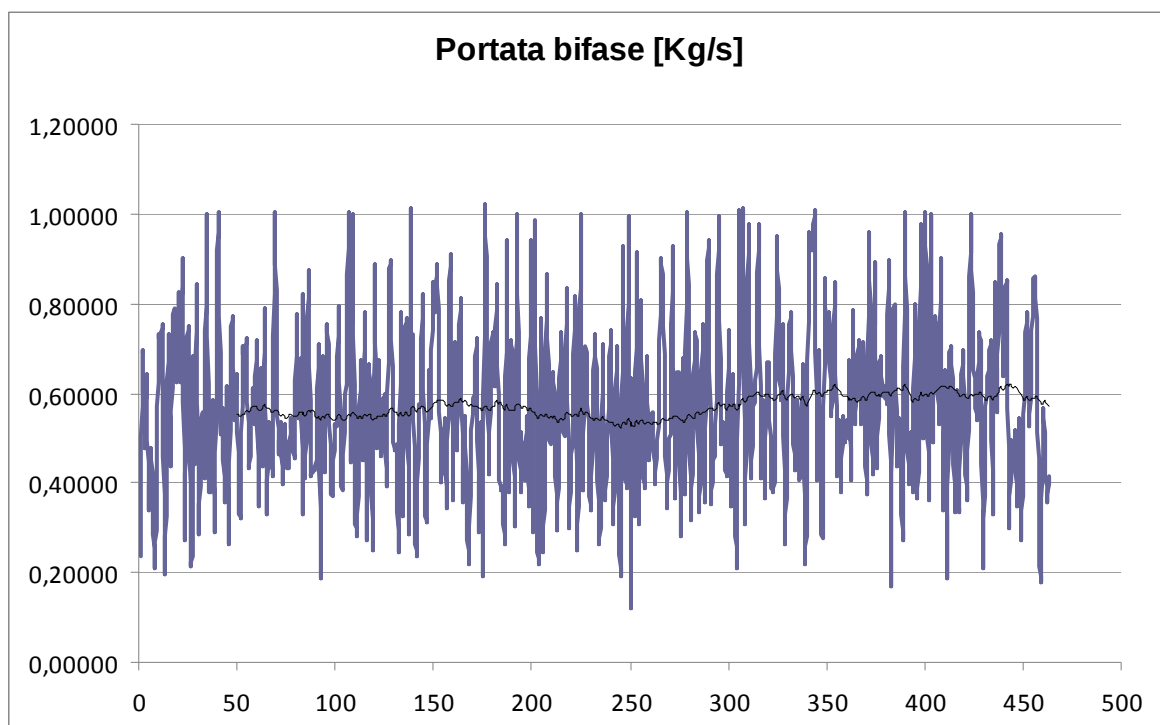


Figura 101: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

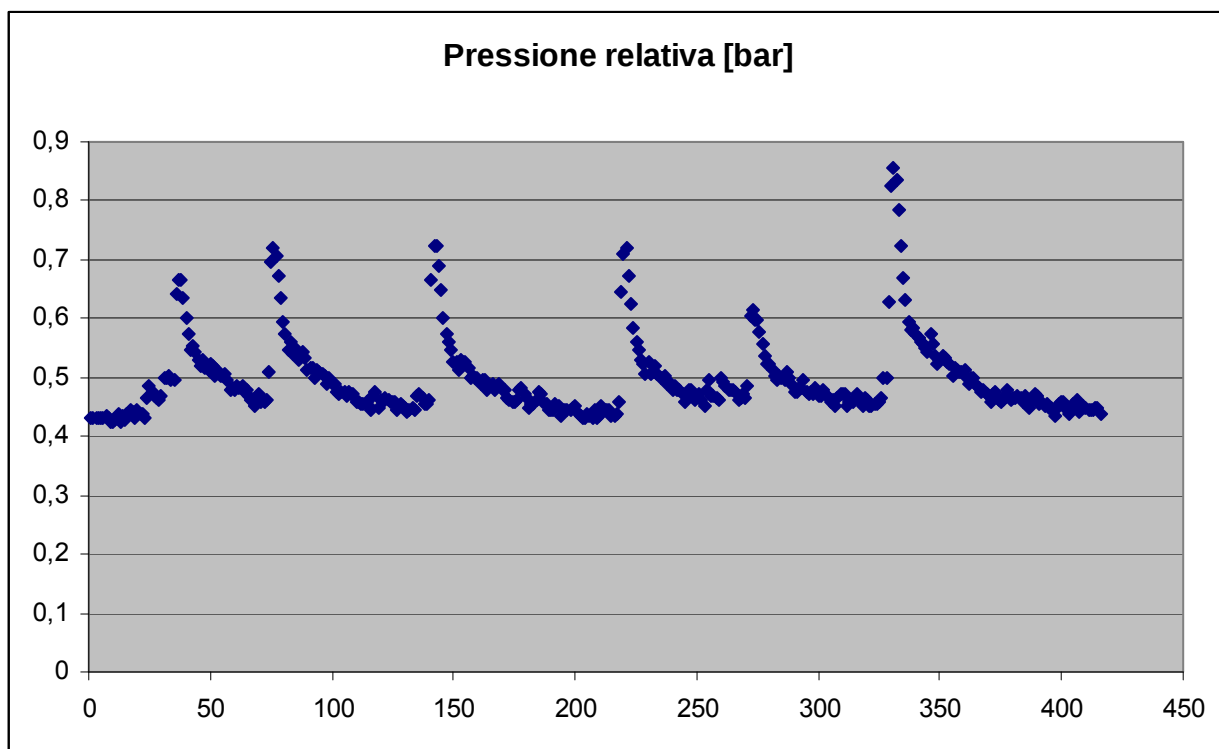


Figura 102: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

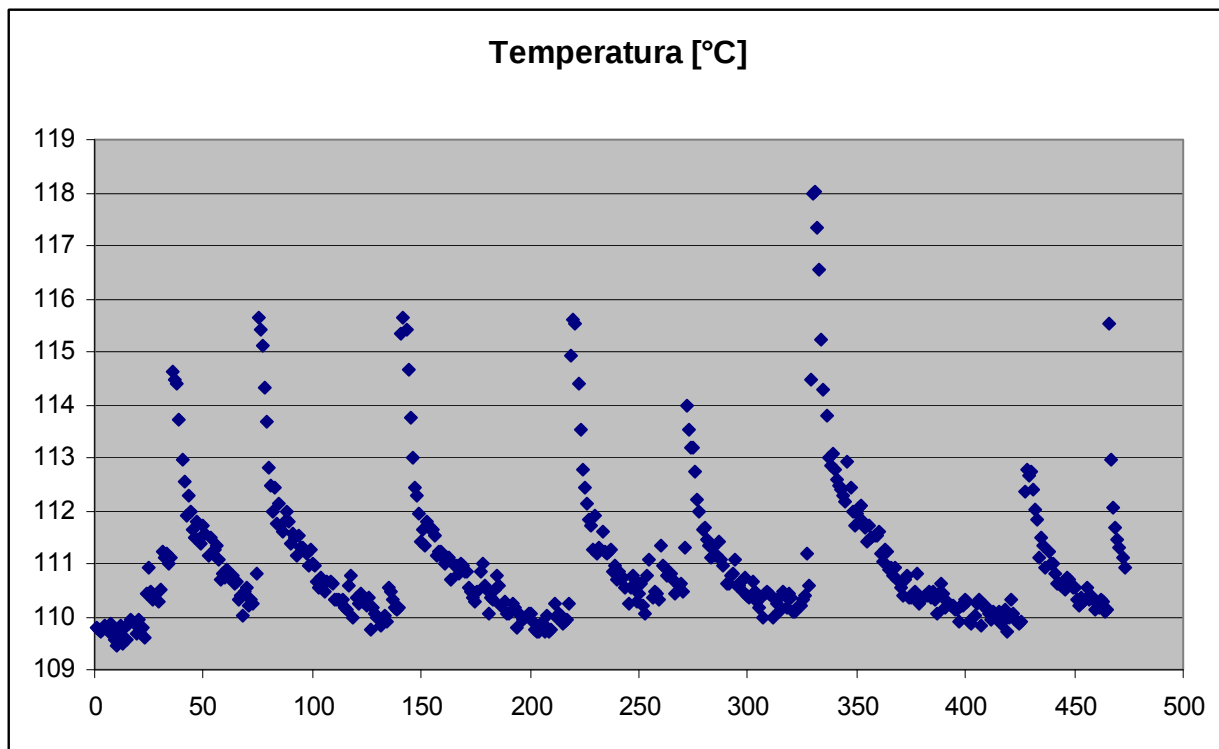


Figura 103: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
5	15	75	37,2	0,587

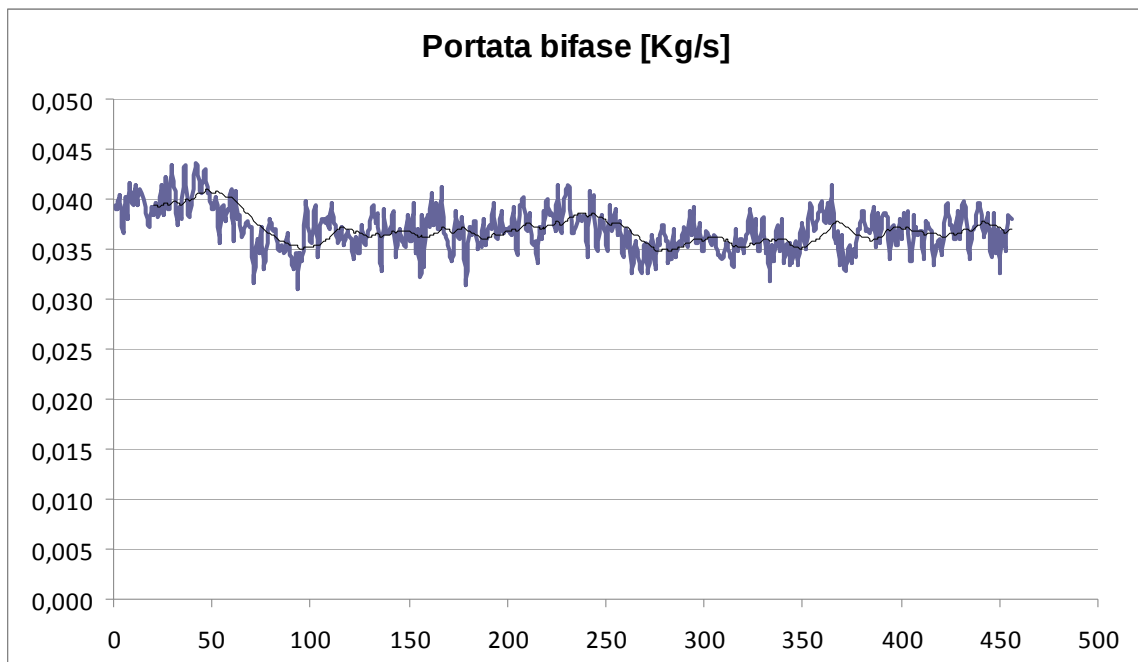


Figura 104: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

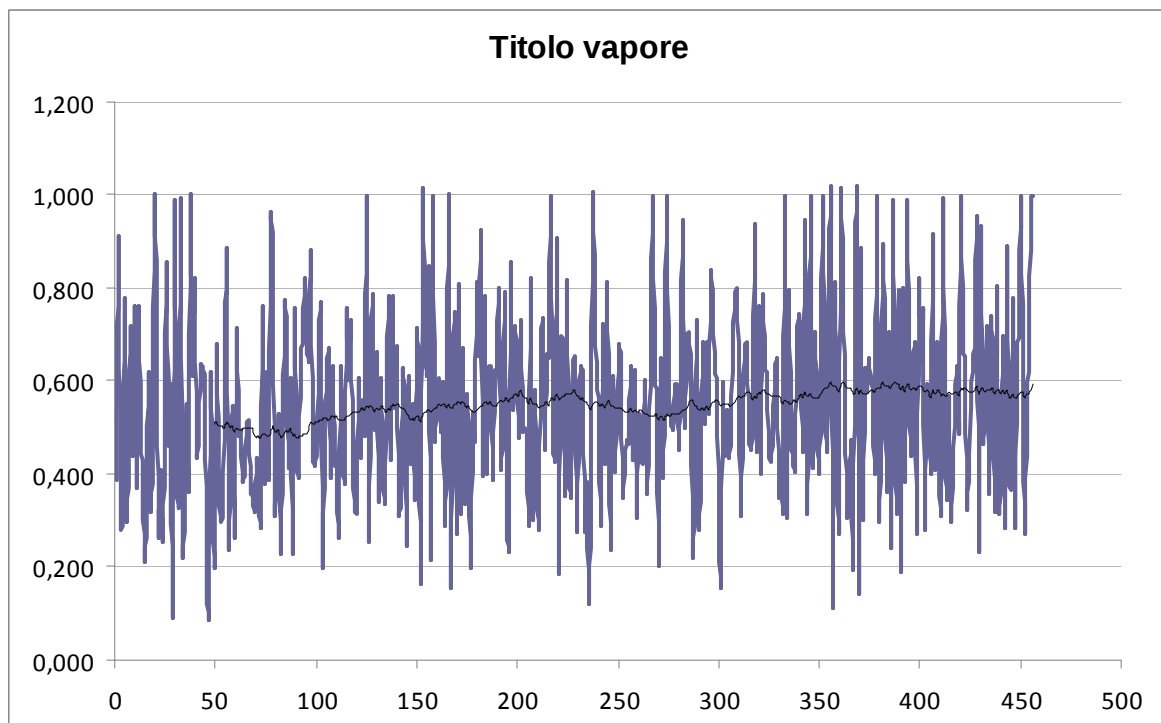


Figura 105: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

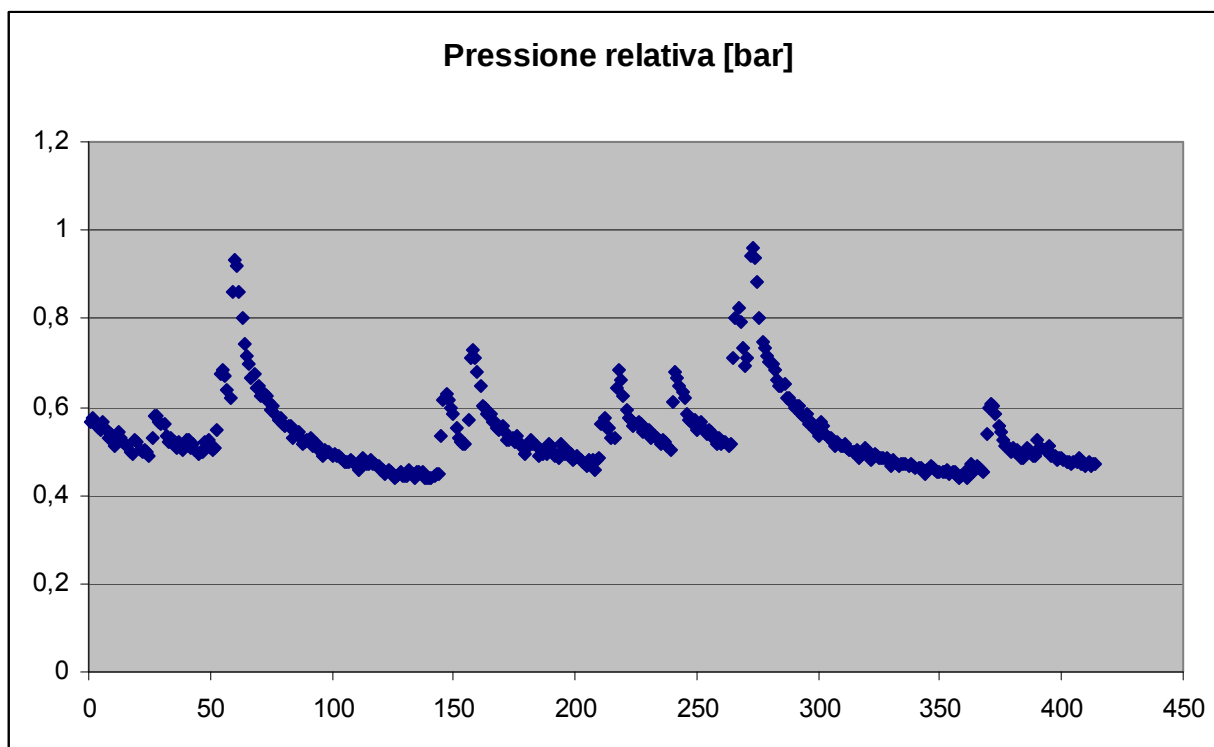


Figura 106: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

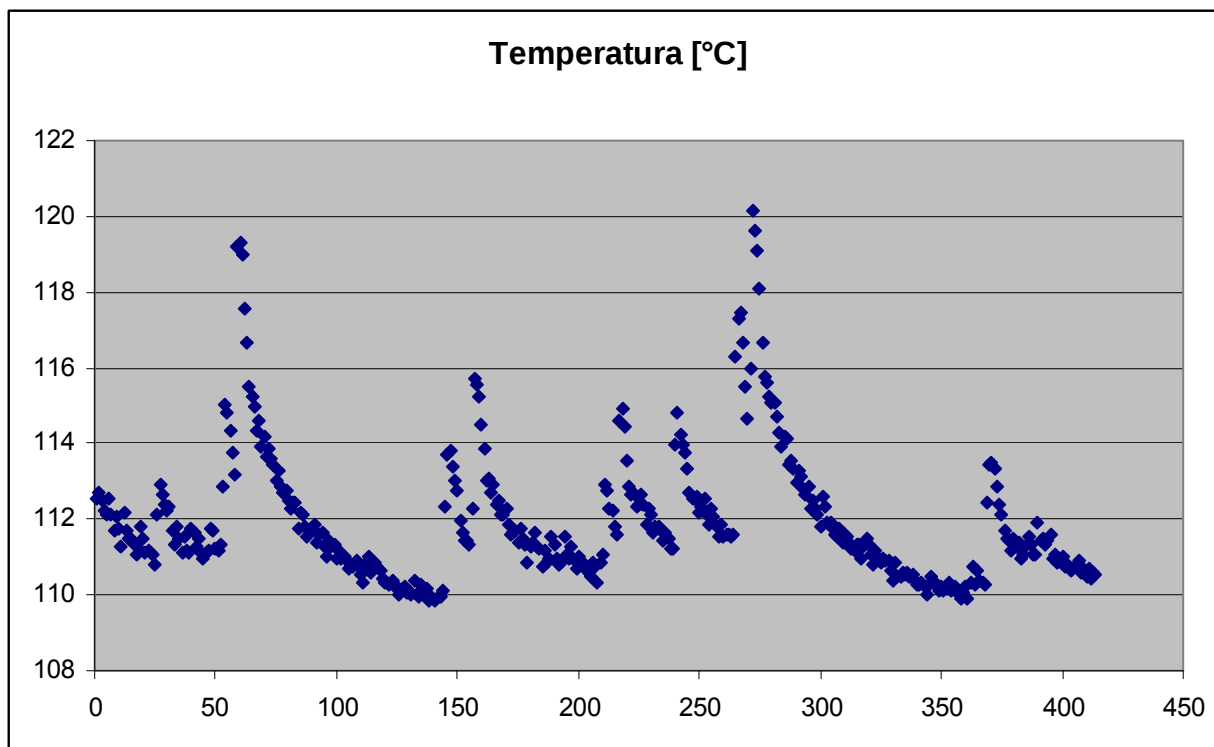


Figura 107: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
5	16	75	36,5	0,9591

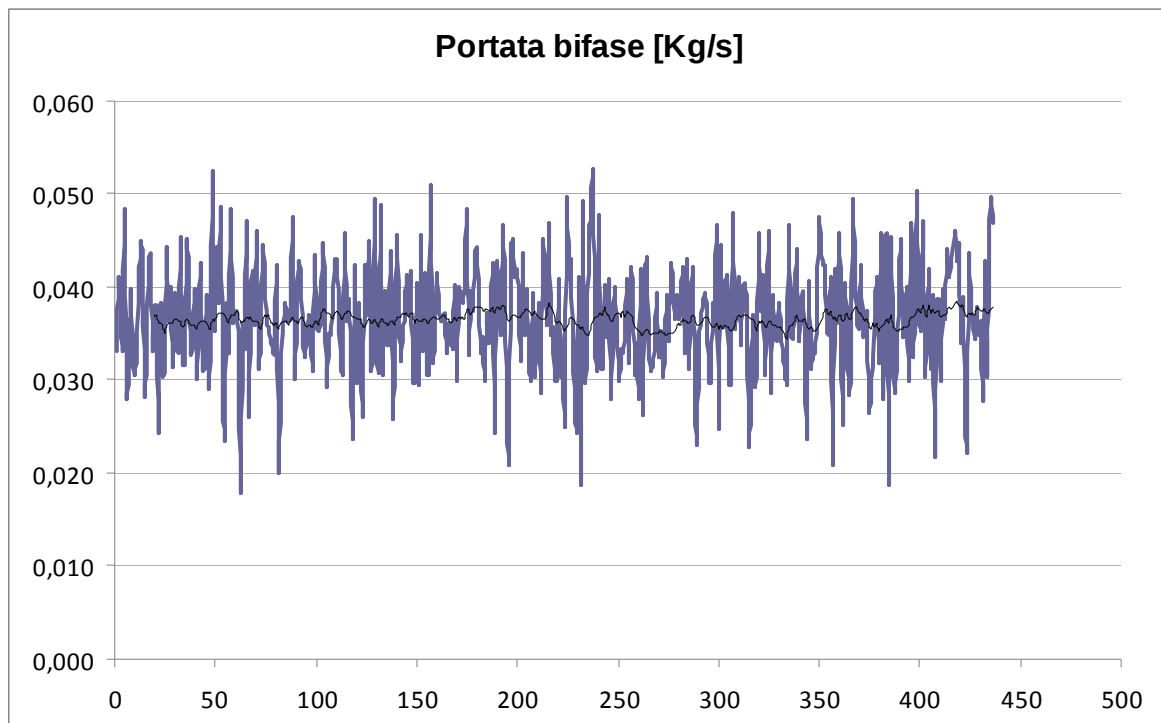


Figura 108: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

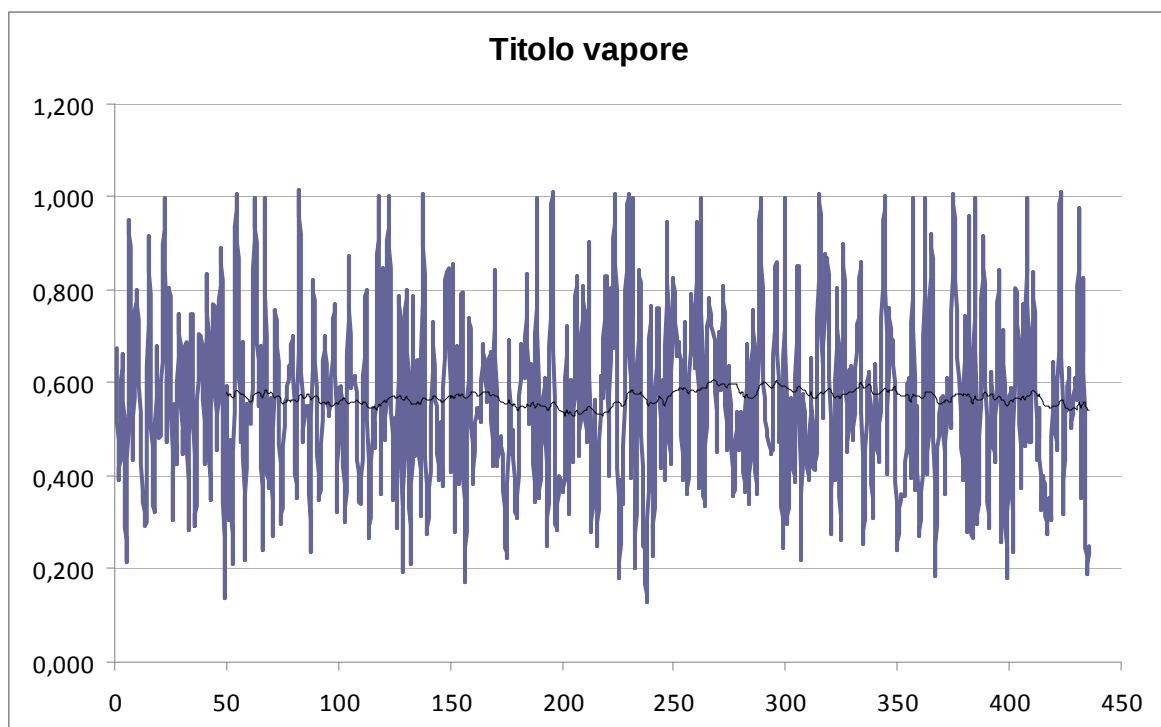


Figura 109: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

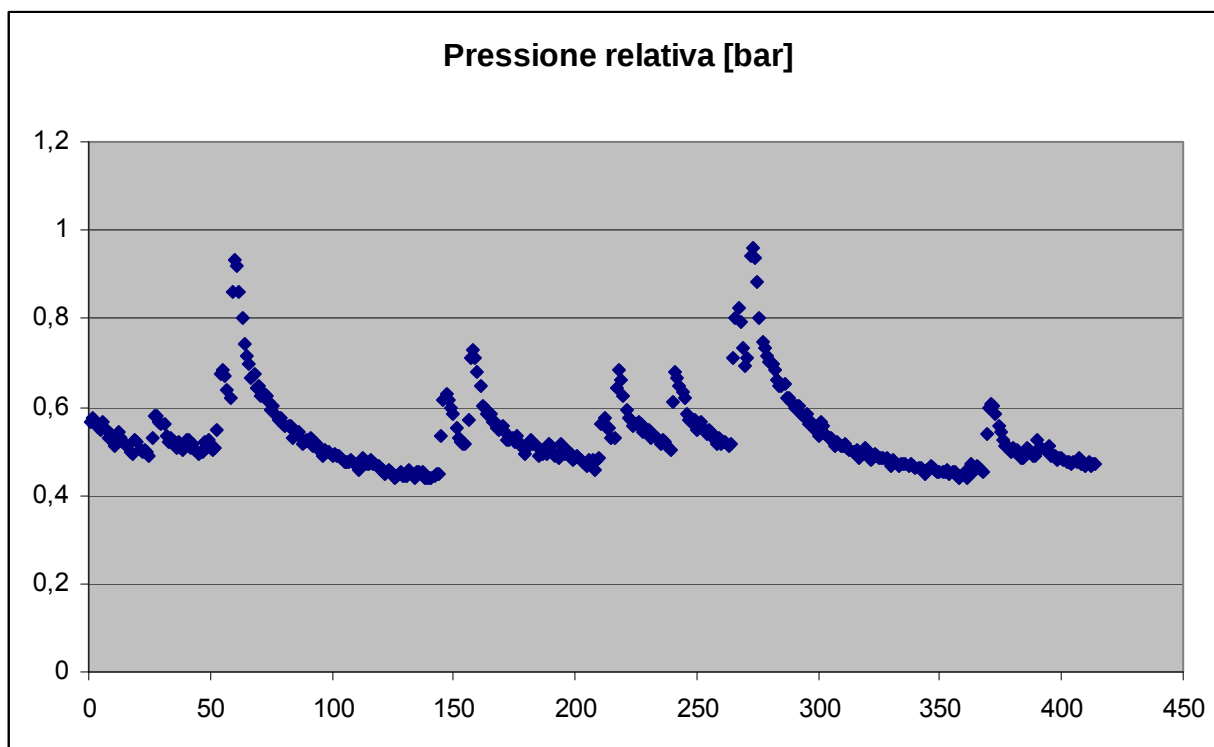


Figura 110: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

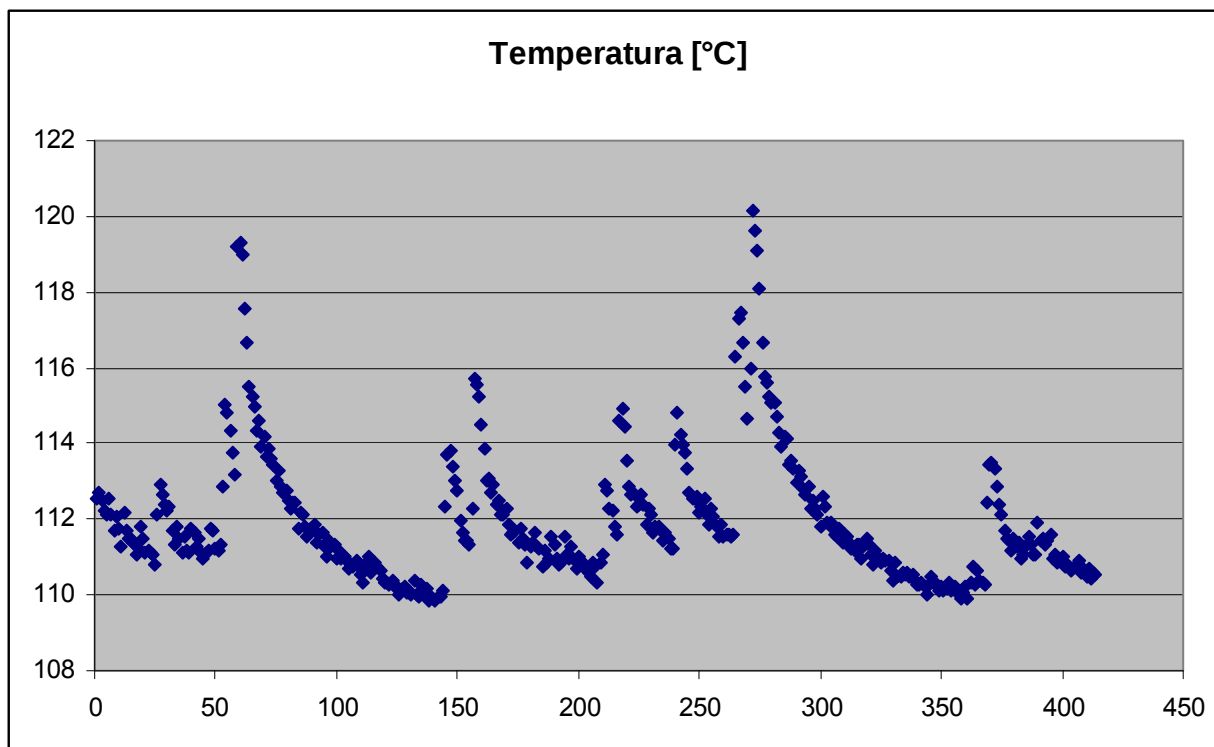


Figura 111: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
5	17	75	82,8	0,5794

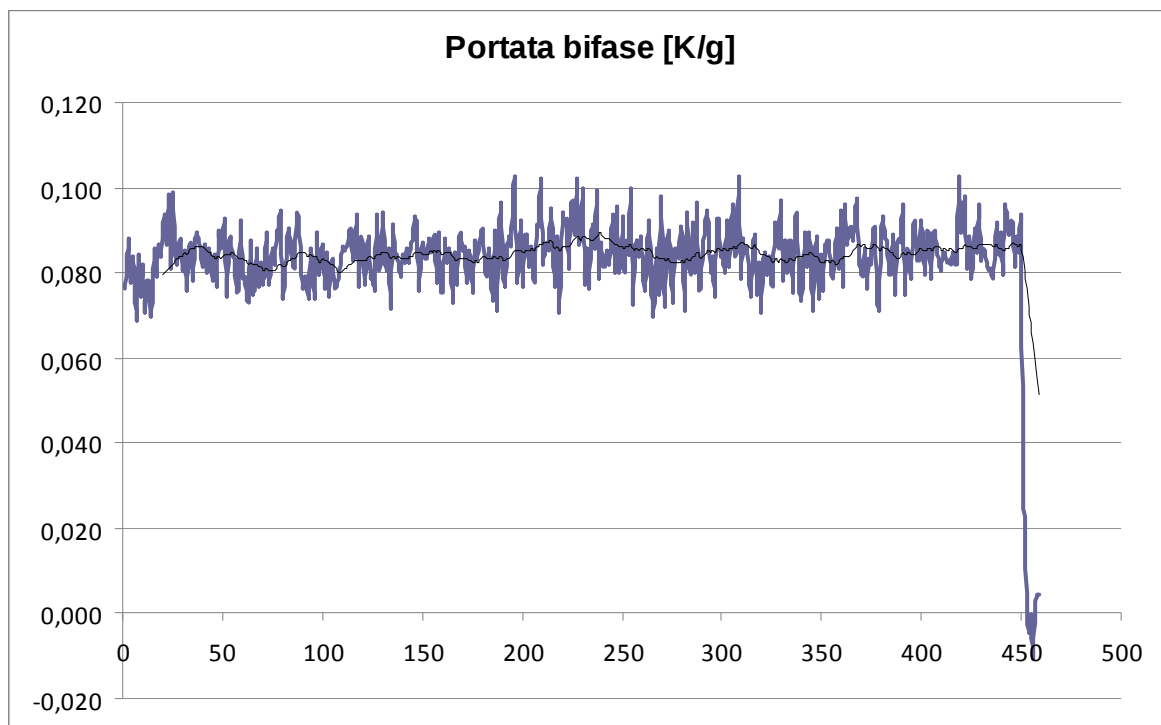


Figura 112: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

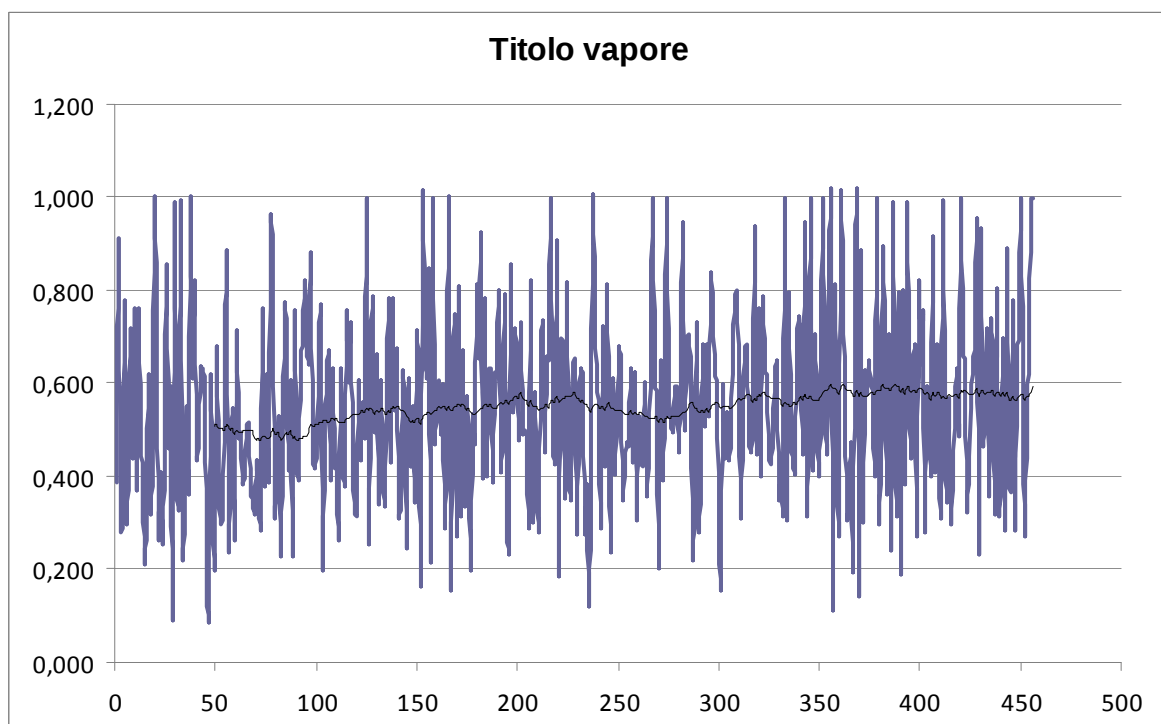


Figura 113: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

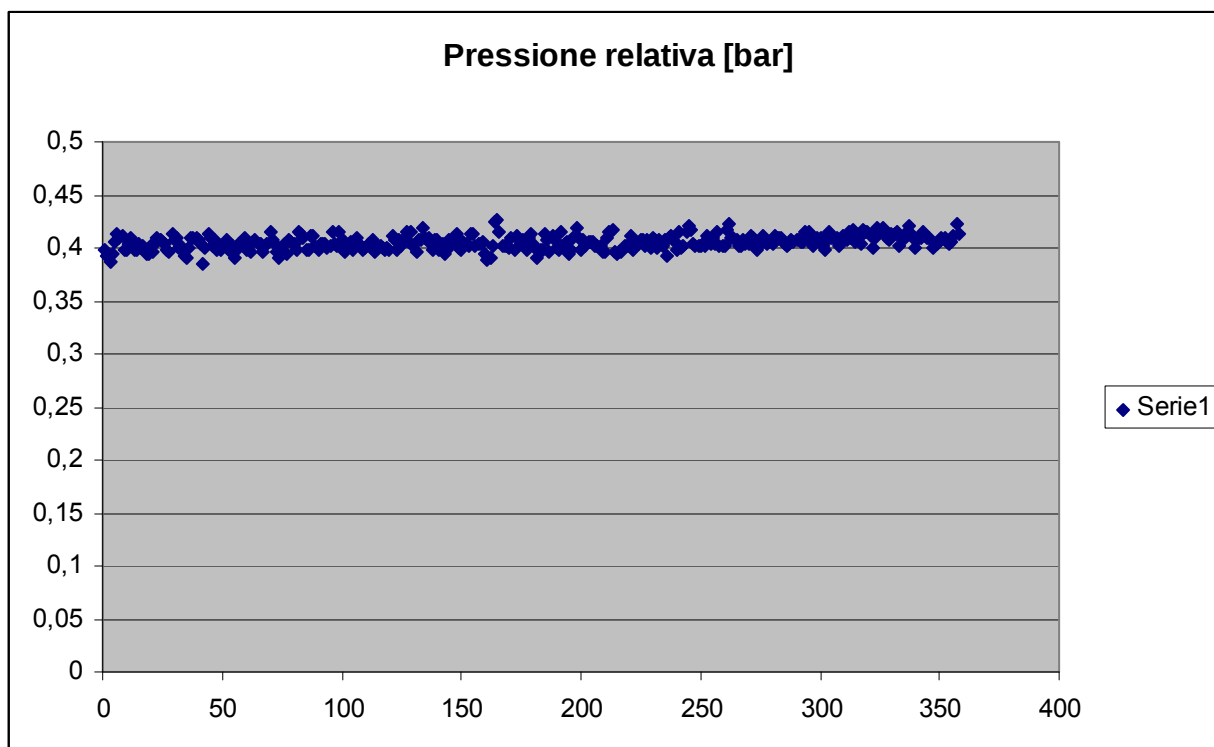


Figura 114: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

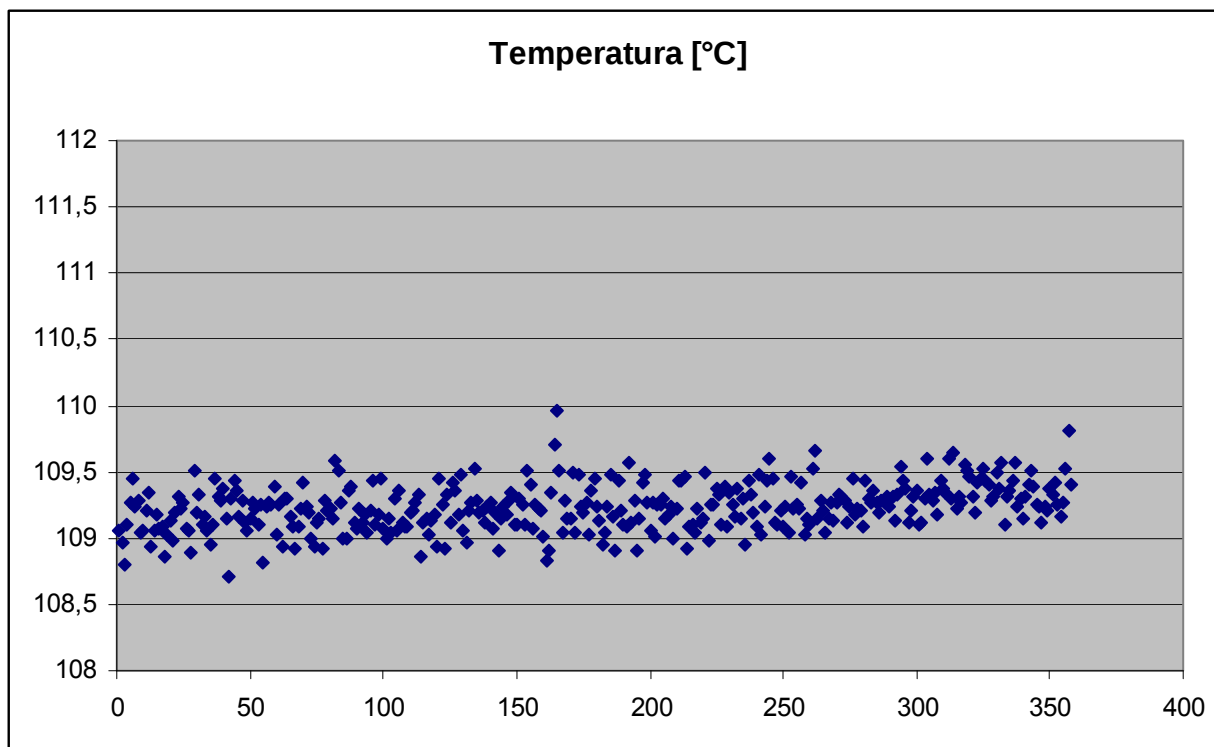


Figura 115: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

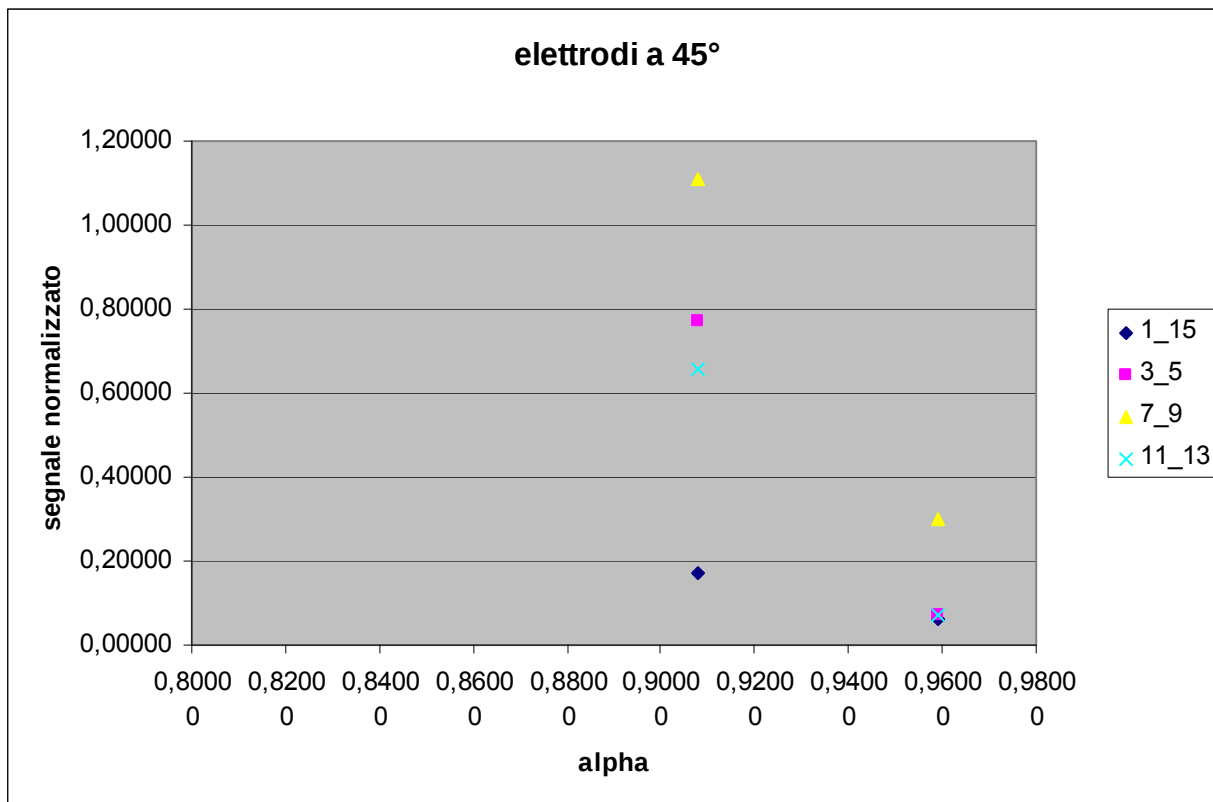


Figura 116: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°

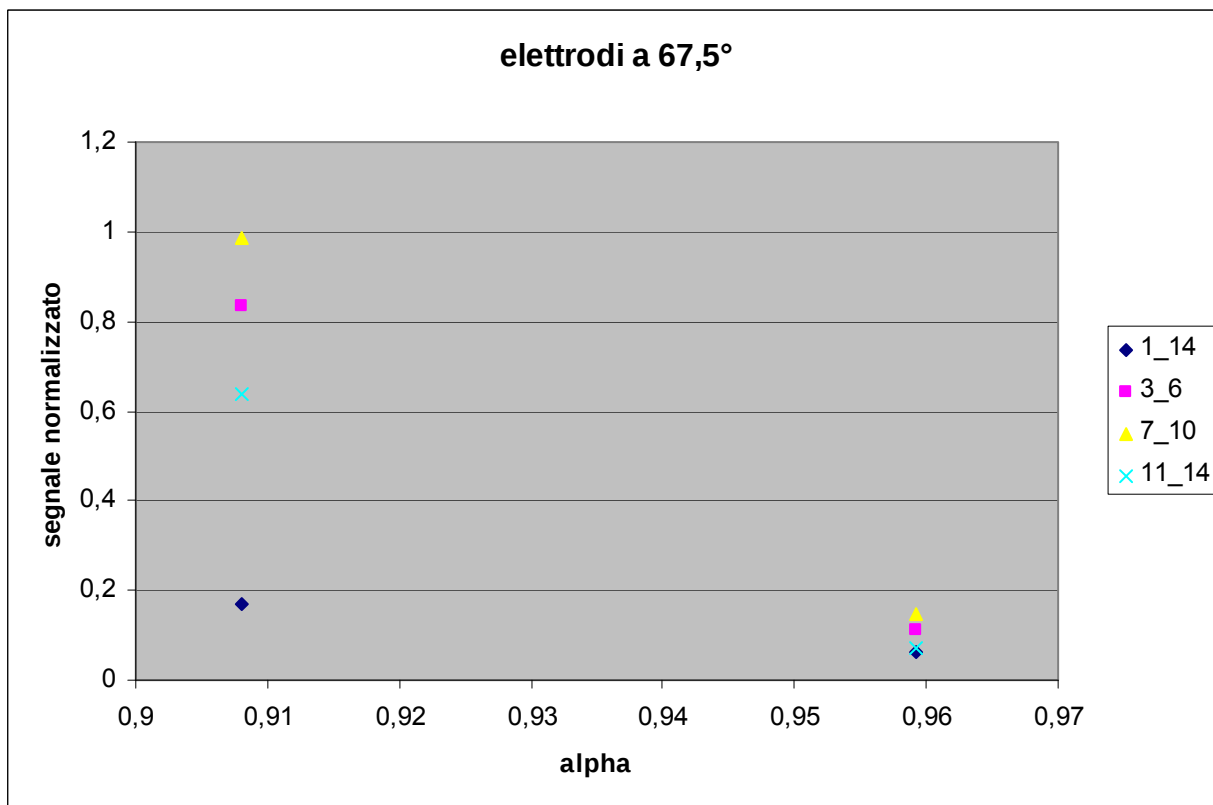


Figura 117: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°

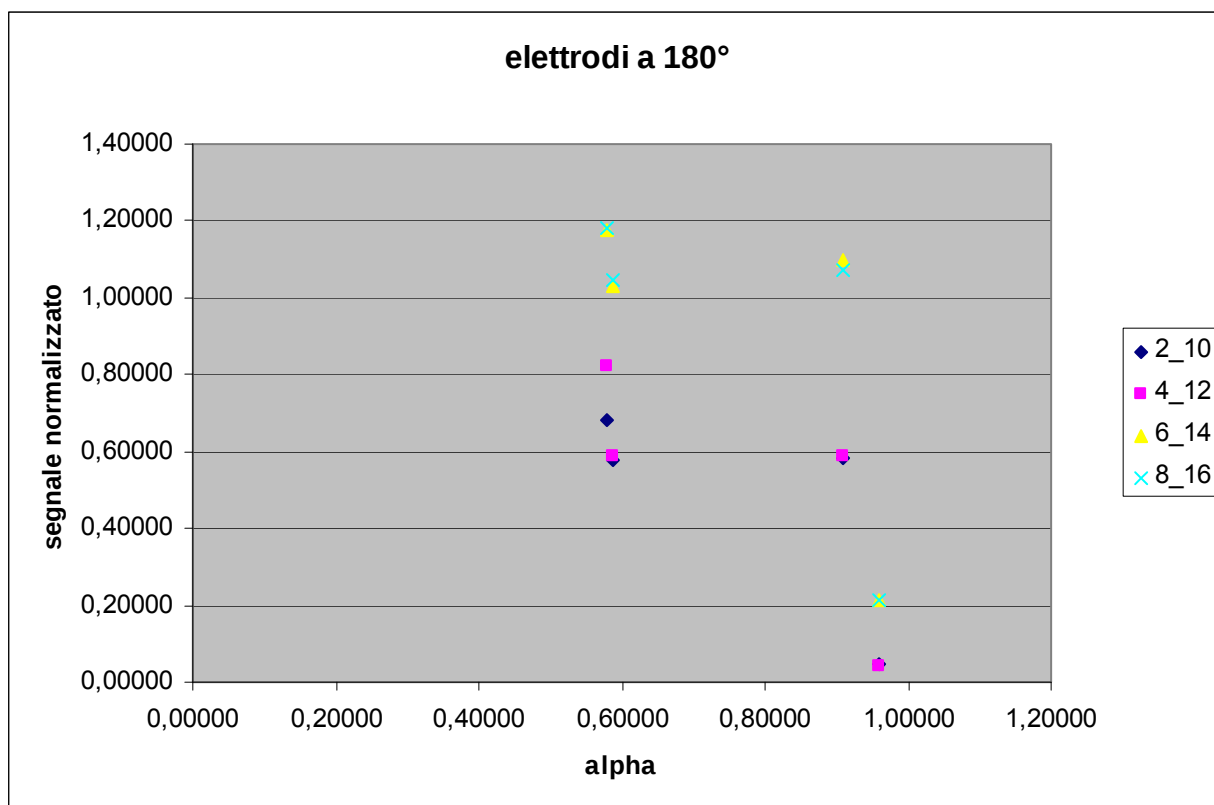


Figura 118: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°

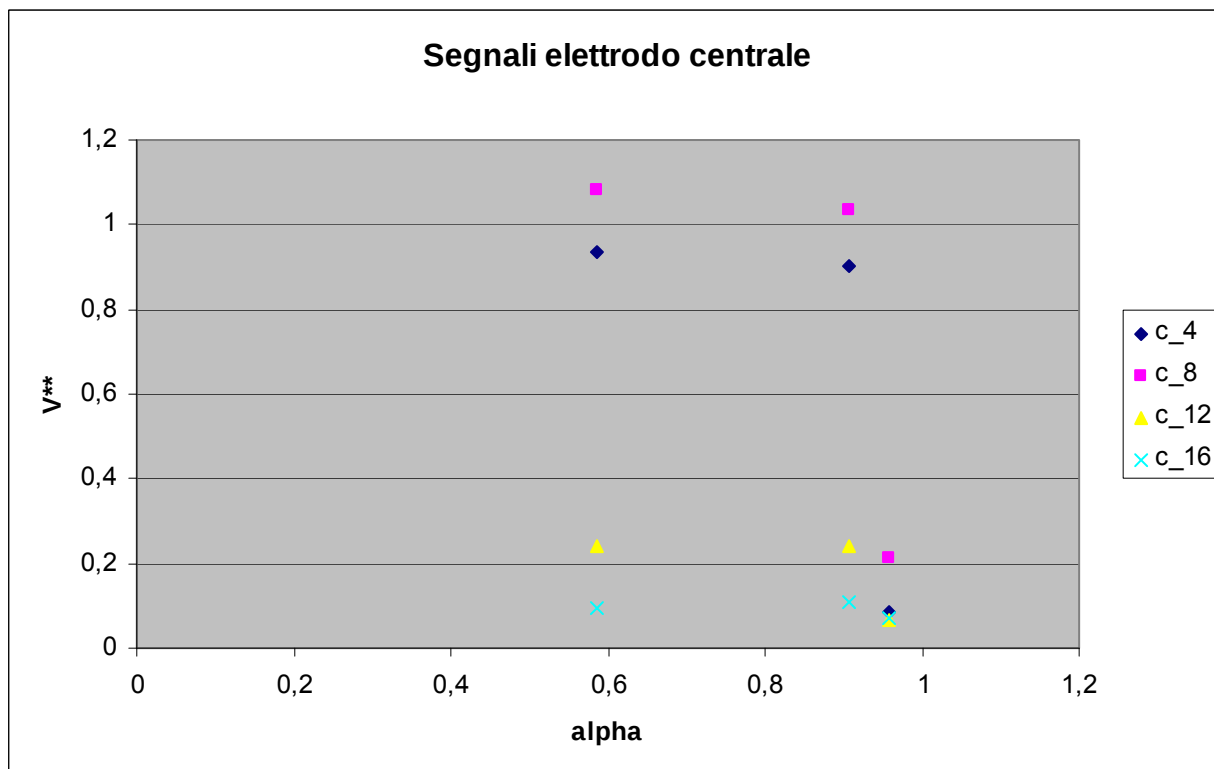


Figura 119: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato dall'elettrodo centrale

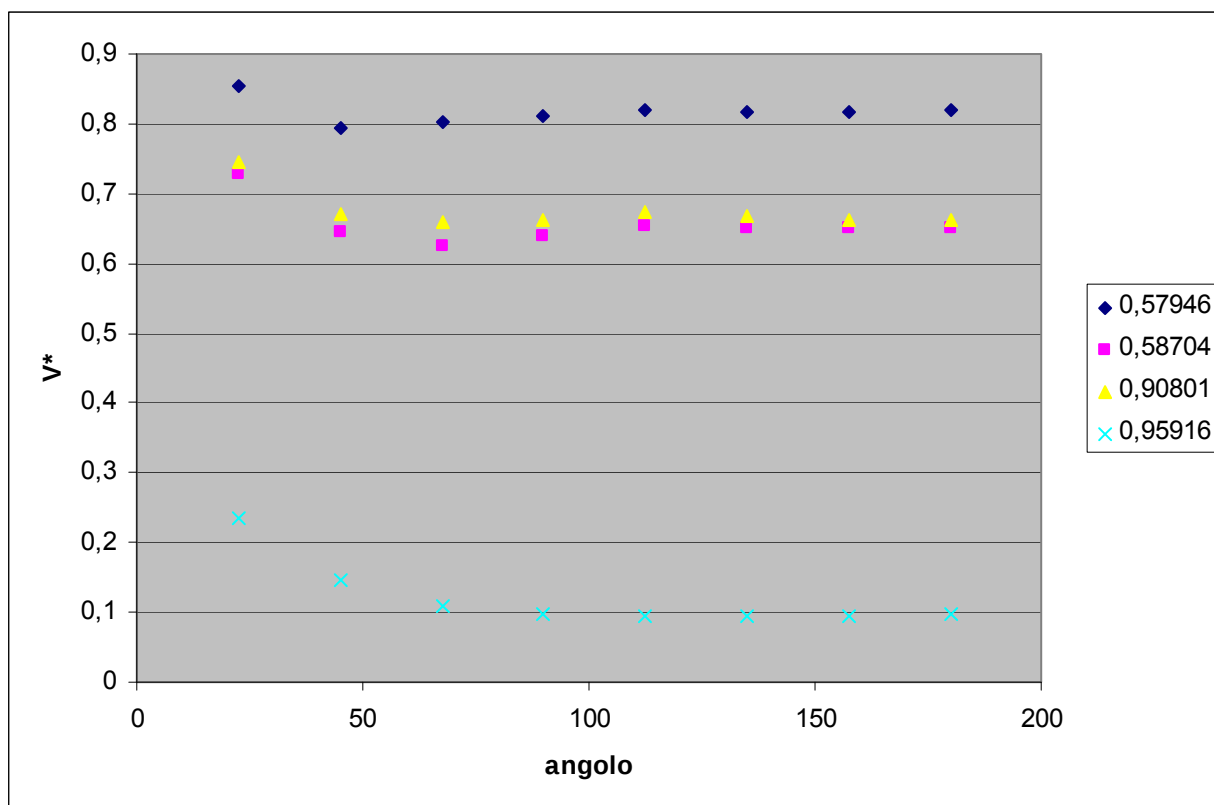


Figura 120: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha

Nelle prove relative al gruppo 5 l'andamento della pressione e della temperatura è fluttuante tranne che nella prova 17 in cui è costante.

Il segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per tutte le prove presenta un andamento monotono decrescente (Figure 116, 117, 118 e 119).

Le curve che rappresentano, per ciascuna prova, l'andamento del segnale normalizzato in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi interessati nella misura (Figura 120) sono ordinate in funzione del grado di vuoto a parte la curva relativa alla prova 15.

Risultati prove gruppo 6

prova	alpha	modalità di conduzione delle prove
18	0,5077	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi chiusi
19	0,987	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
20	0,9417	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi aperti
21	0,829	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido aperta (1/16 di giro), drenaggi aperti

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
6	18	80	135,2	0,5077

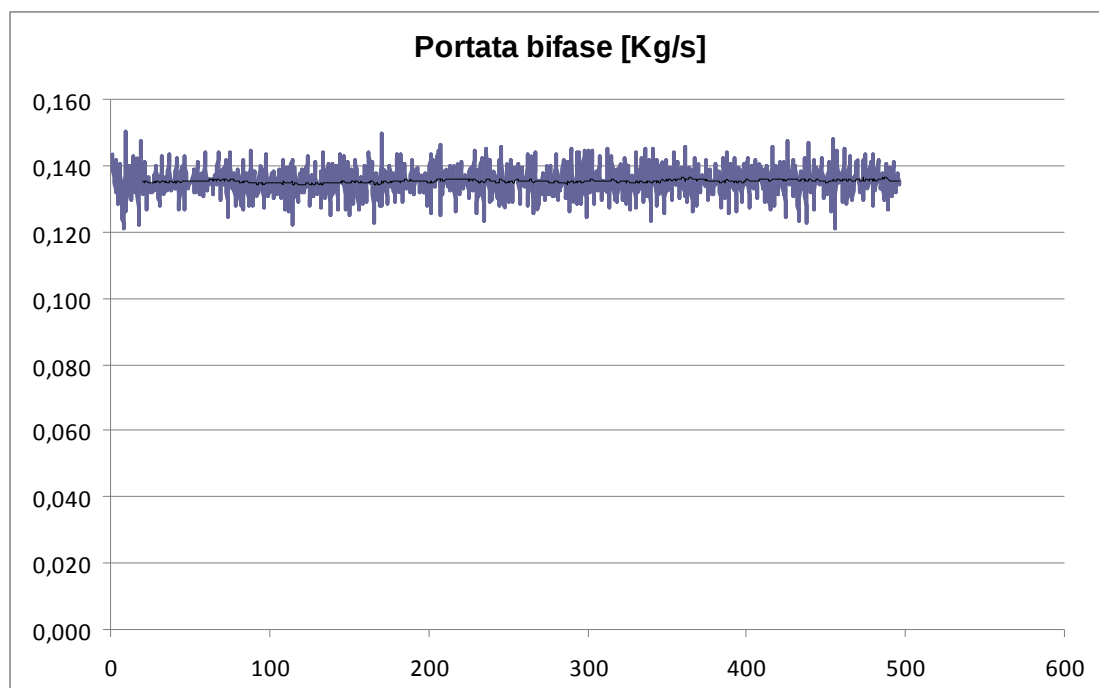


Figura 121: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

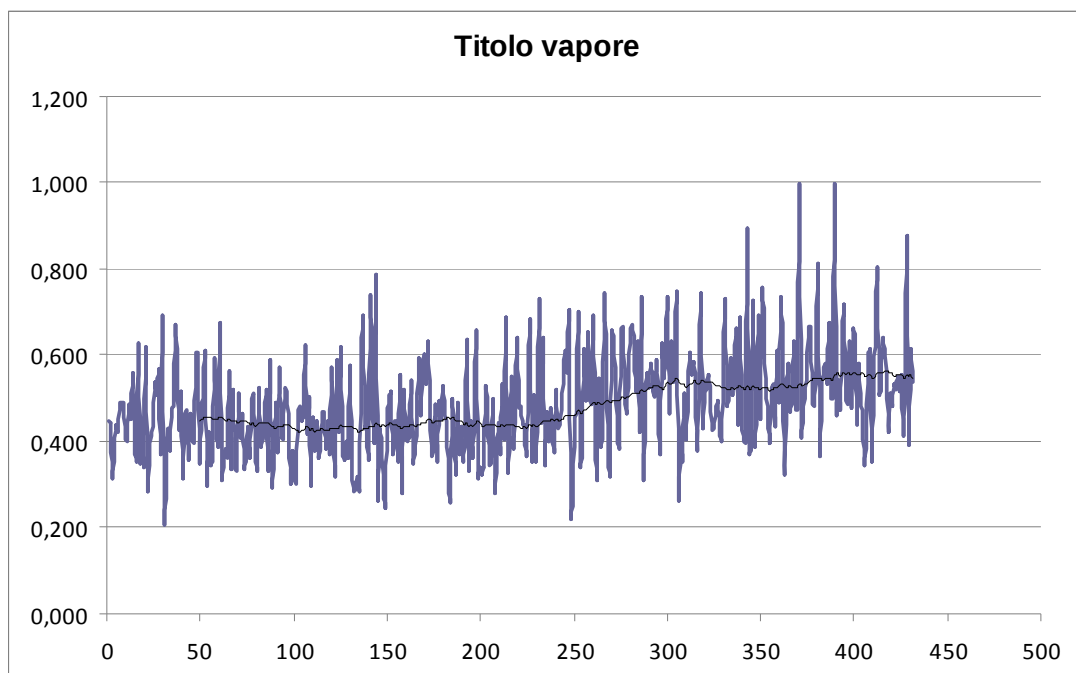


Figura 122: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

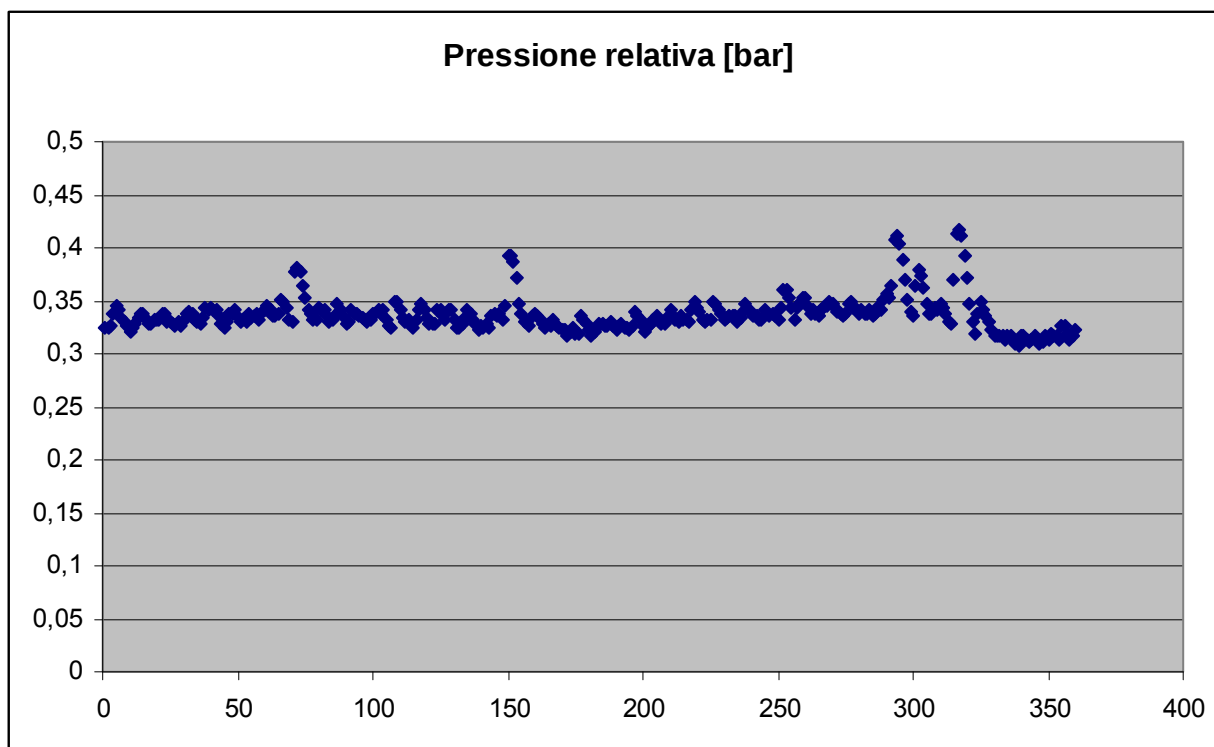


Figura 123: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

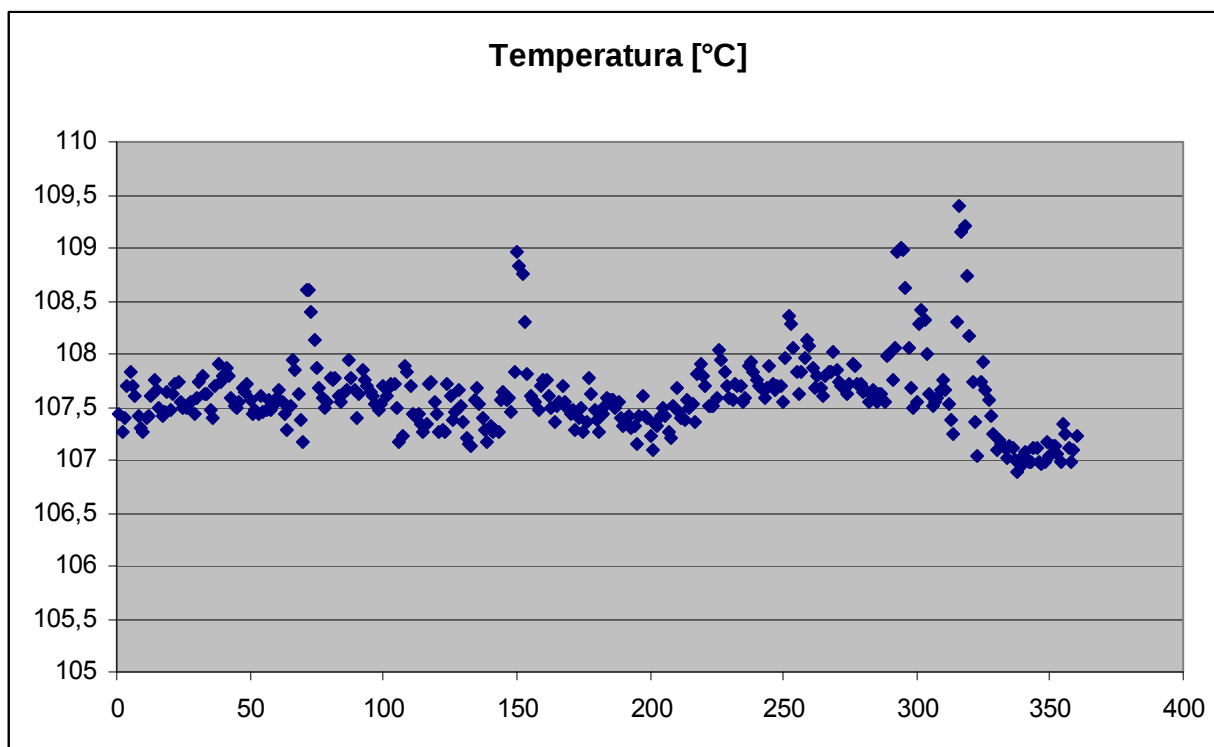


Figura 124: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
6	19	80	38	0,987

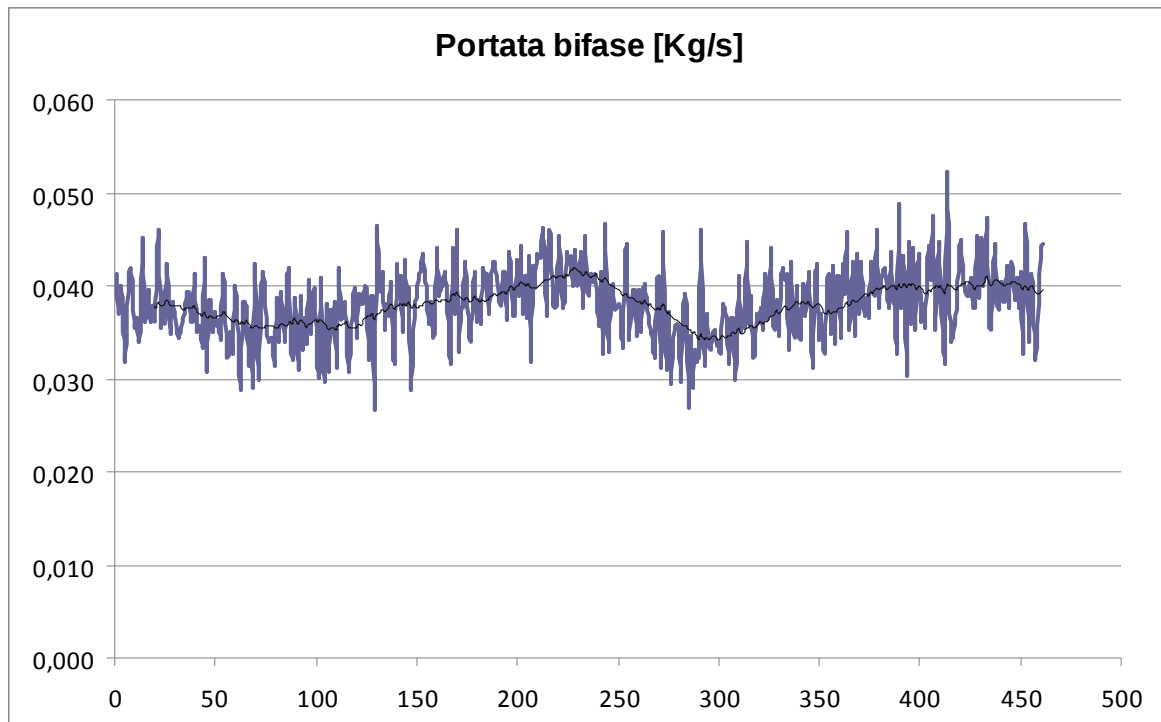


Figura 125: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

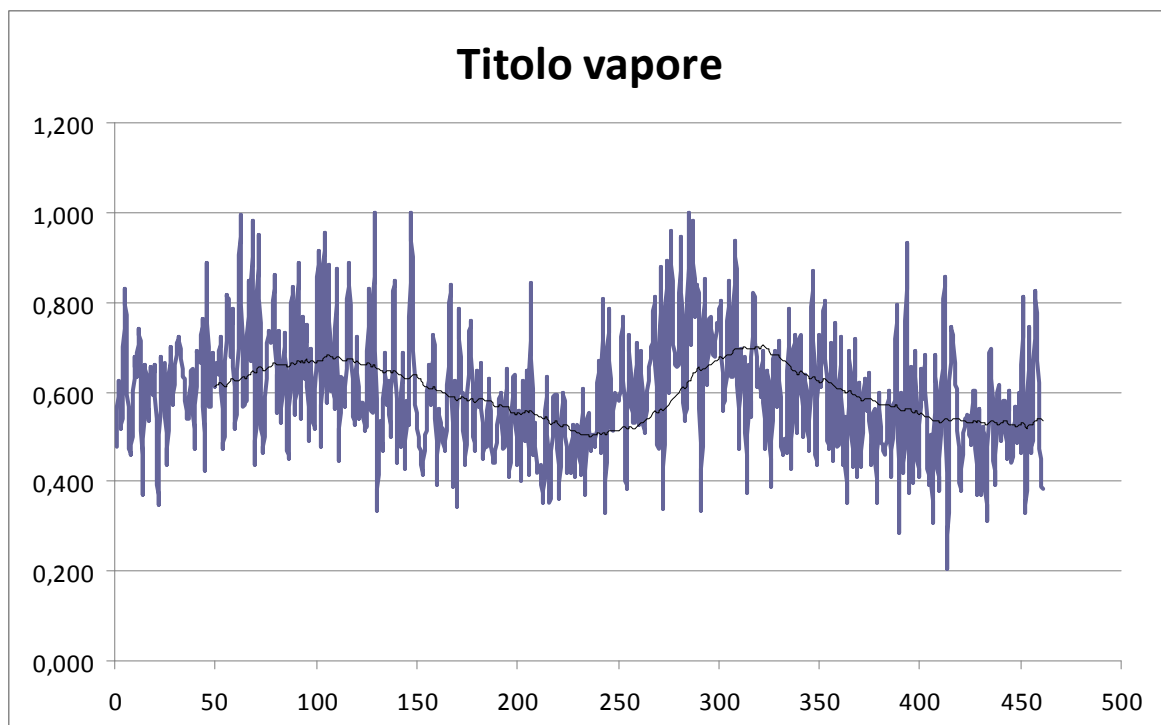


Figura 126: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

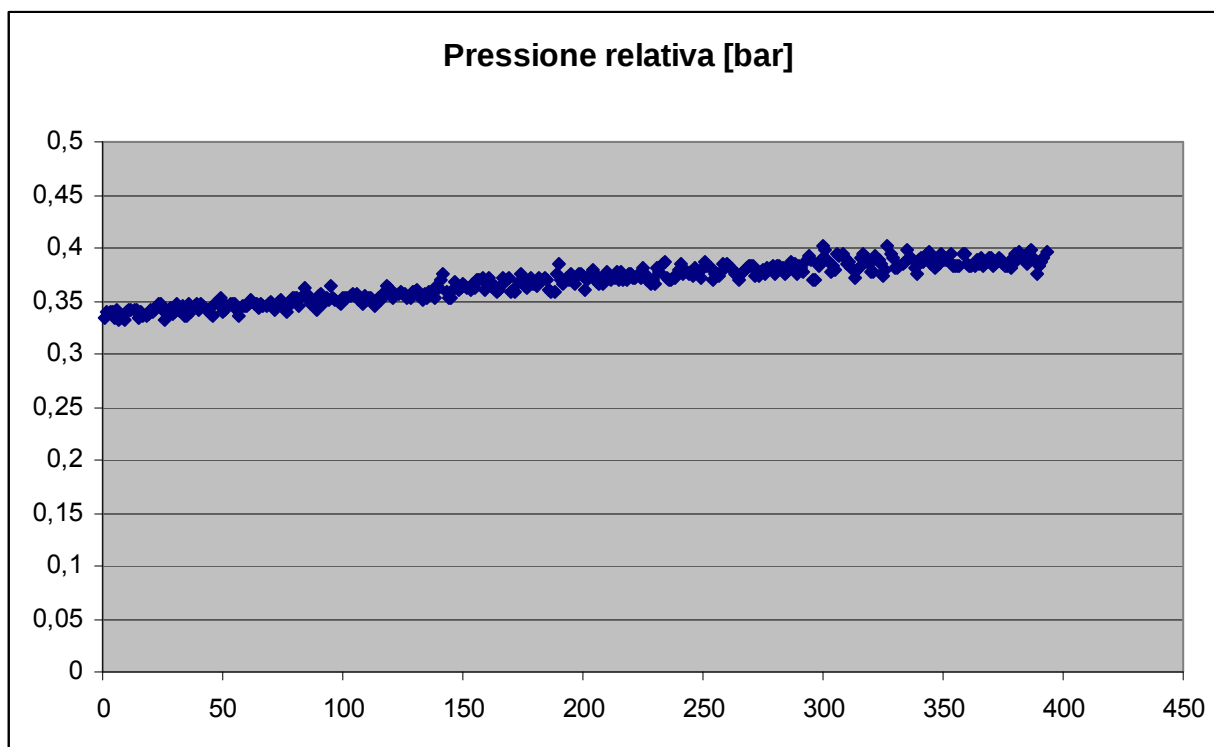


Figura 127: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

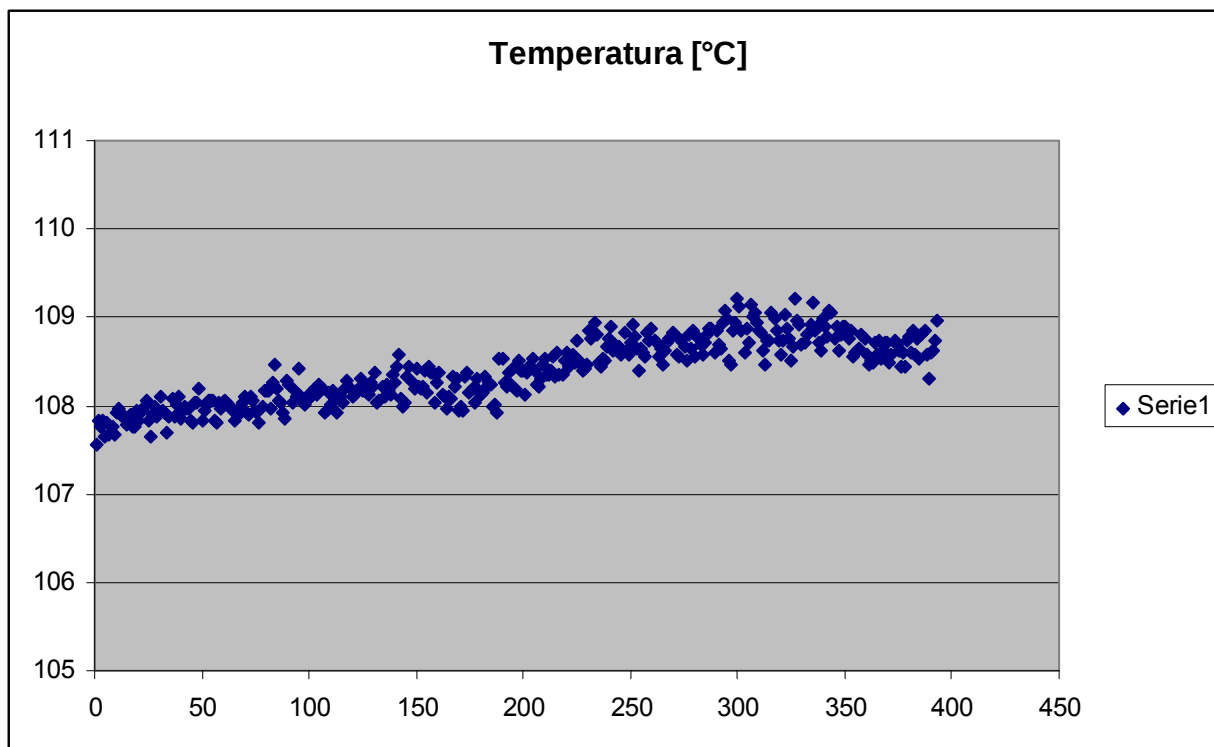


Figura 128: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
6	20	80	40,6	0,9417

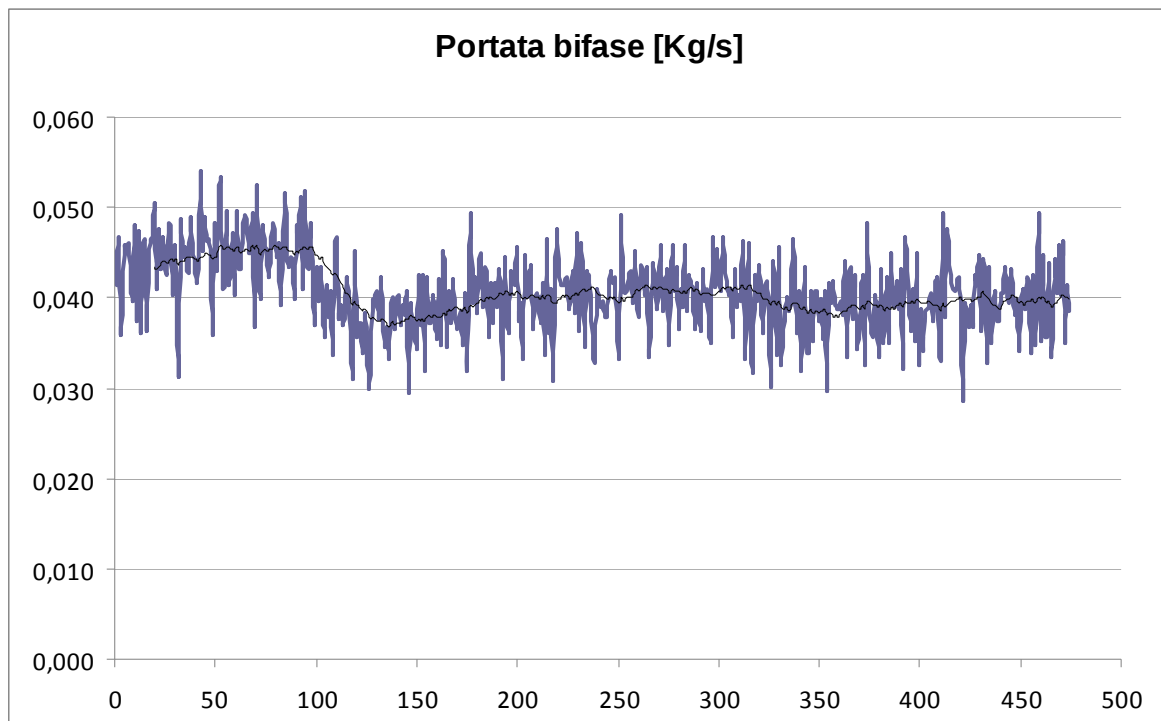


Figura 129: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

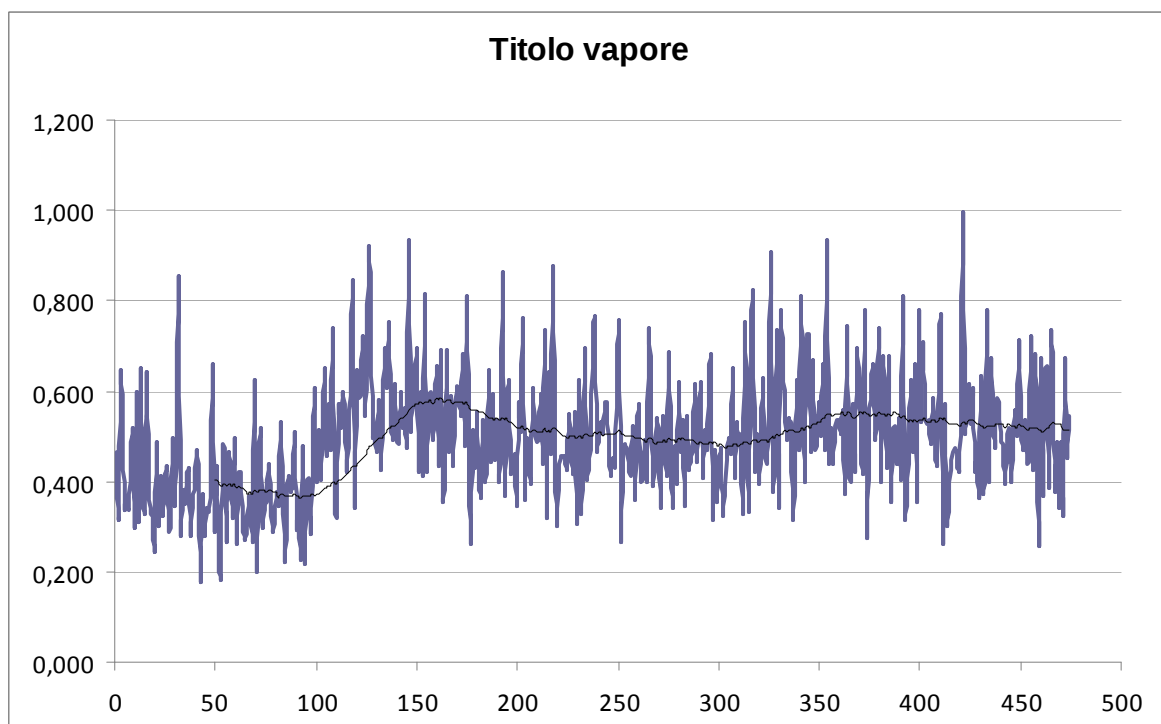


Figura 130: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

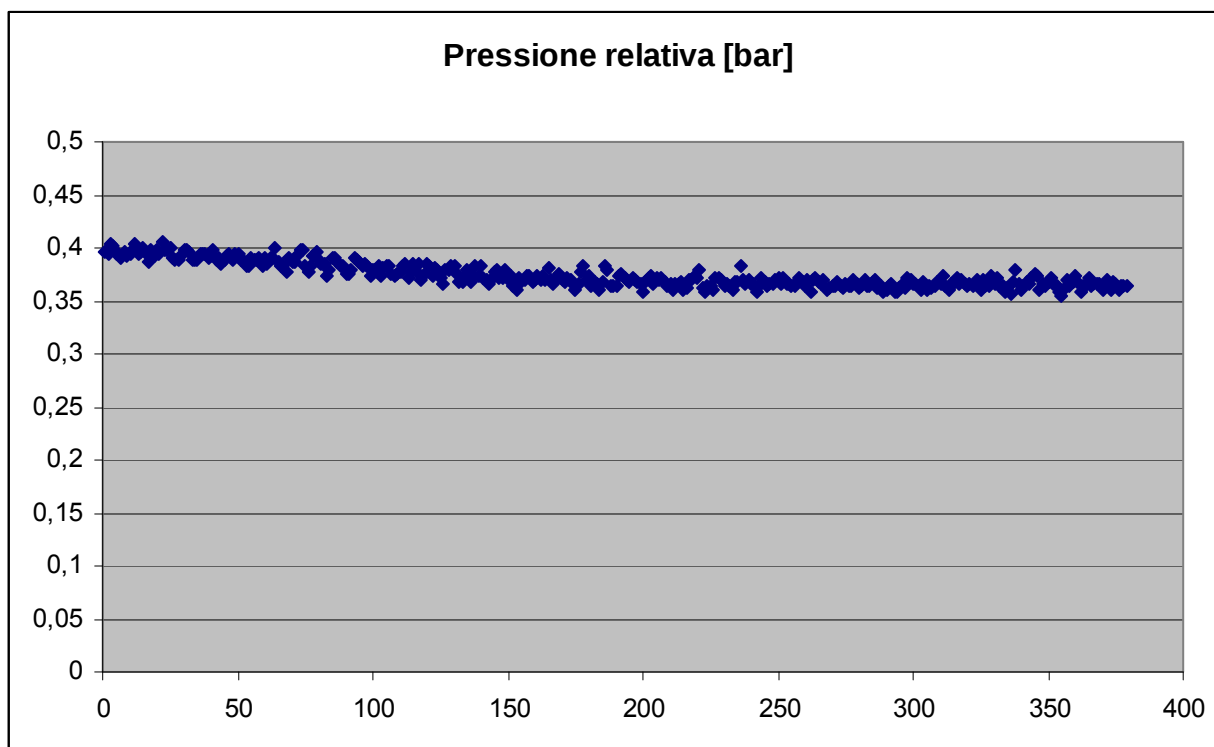


Figura 131: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

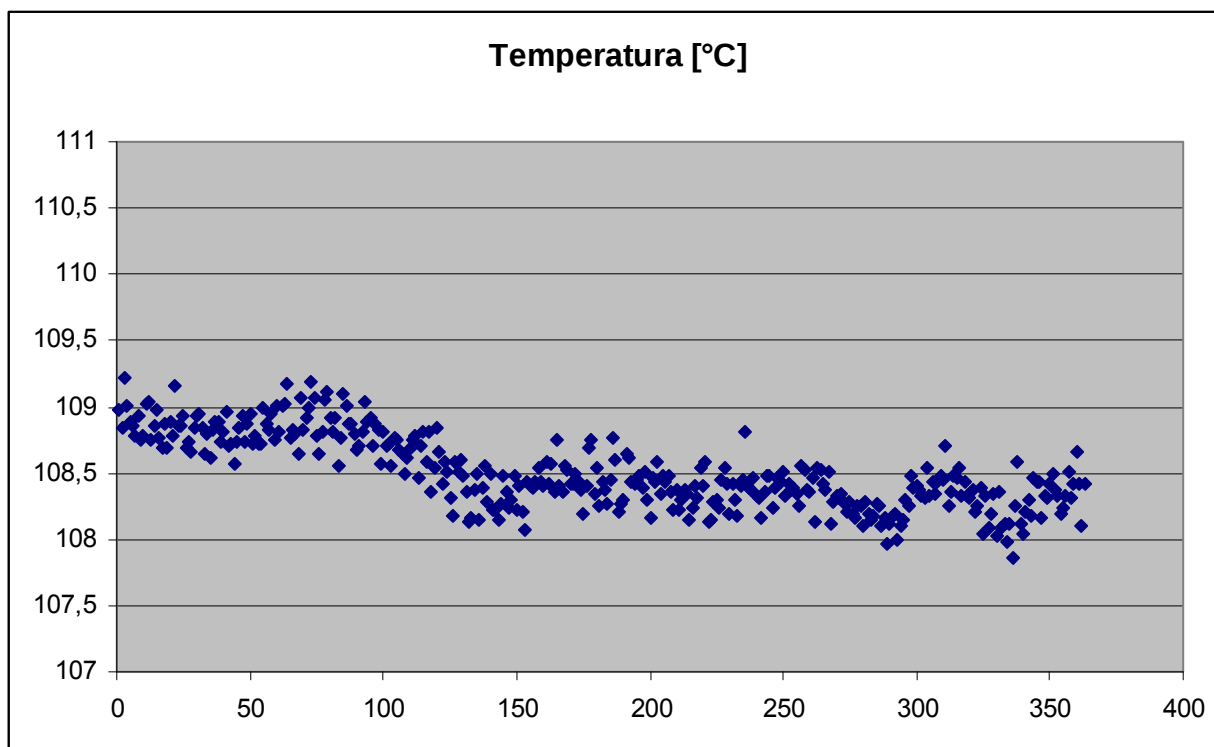


Figura 132: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
6	21	80	41,1	0,829

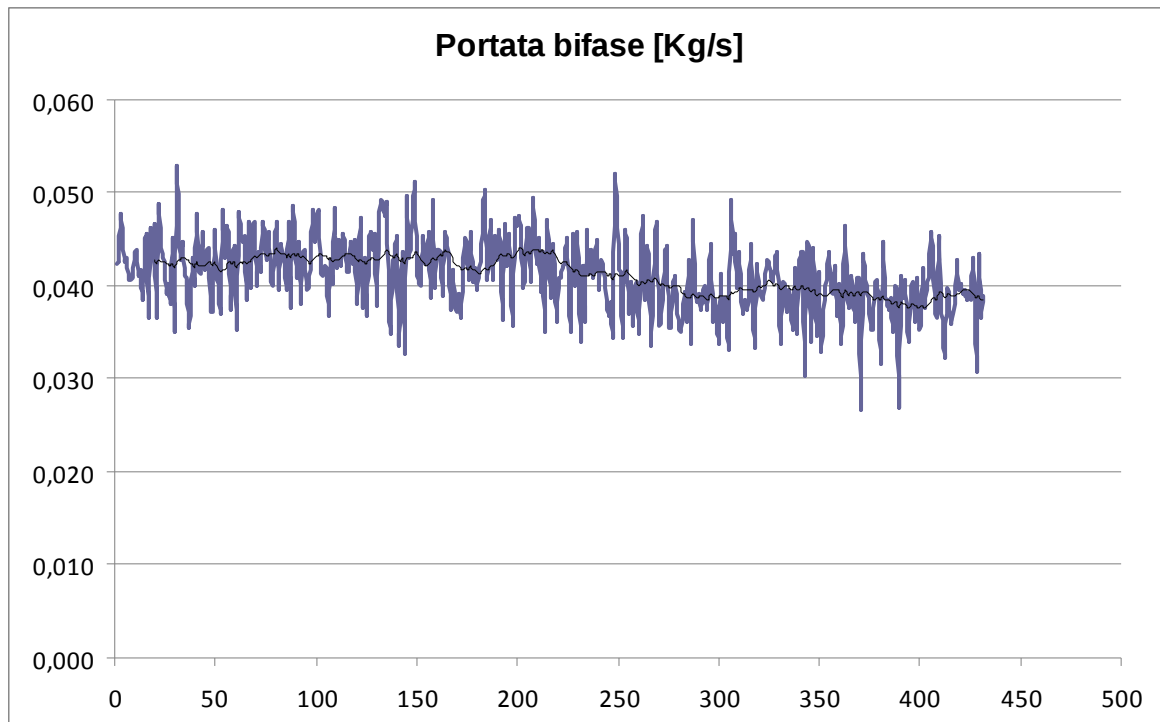


Figura 133: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

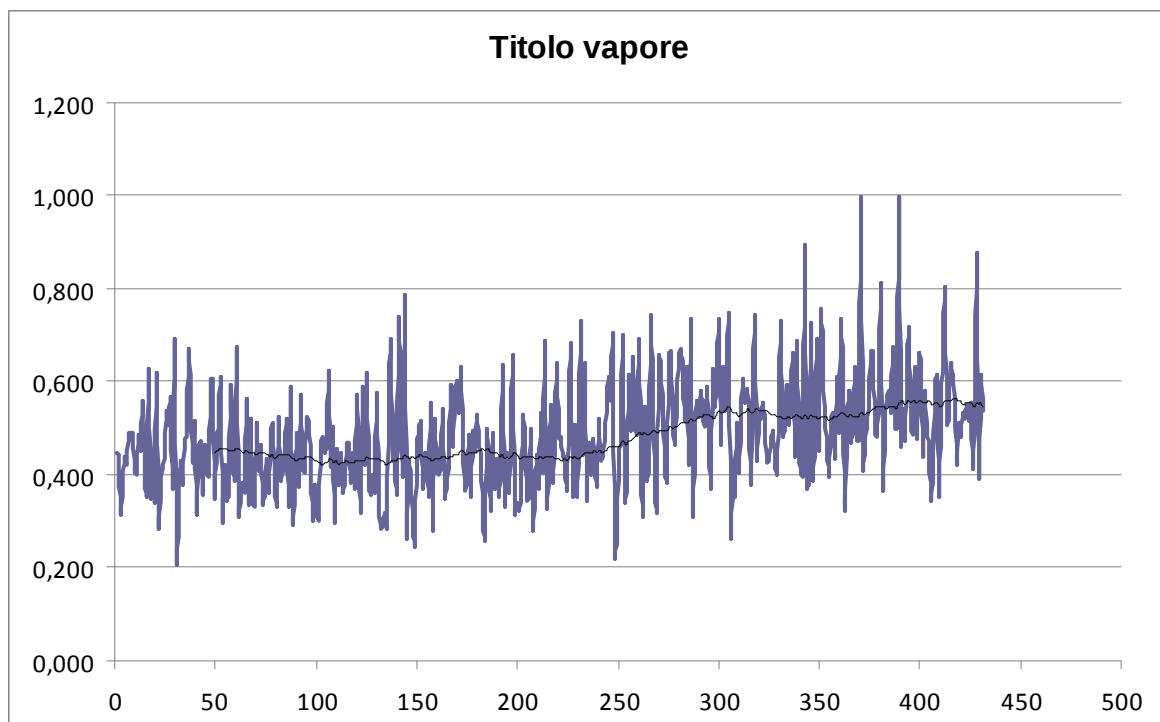


Figura 134: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

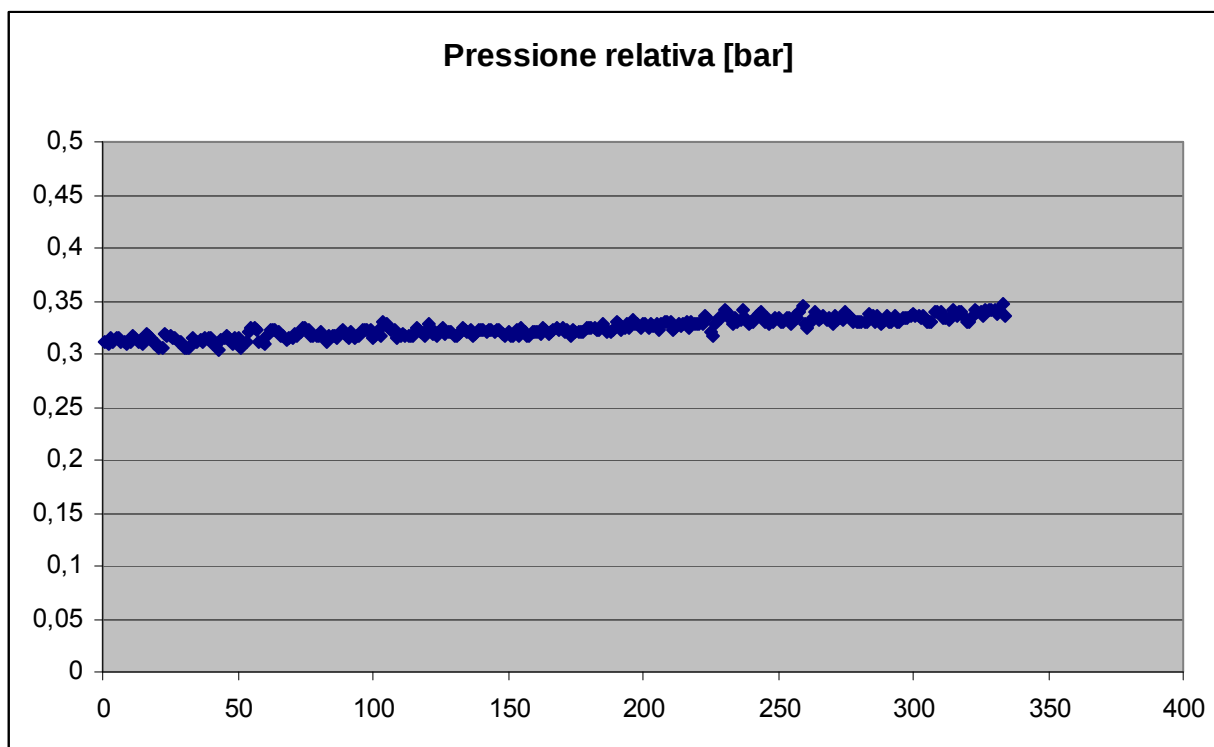


Figura 135: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

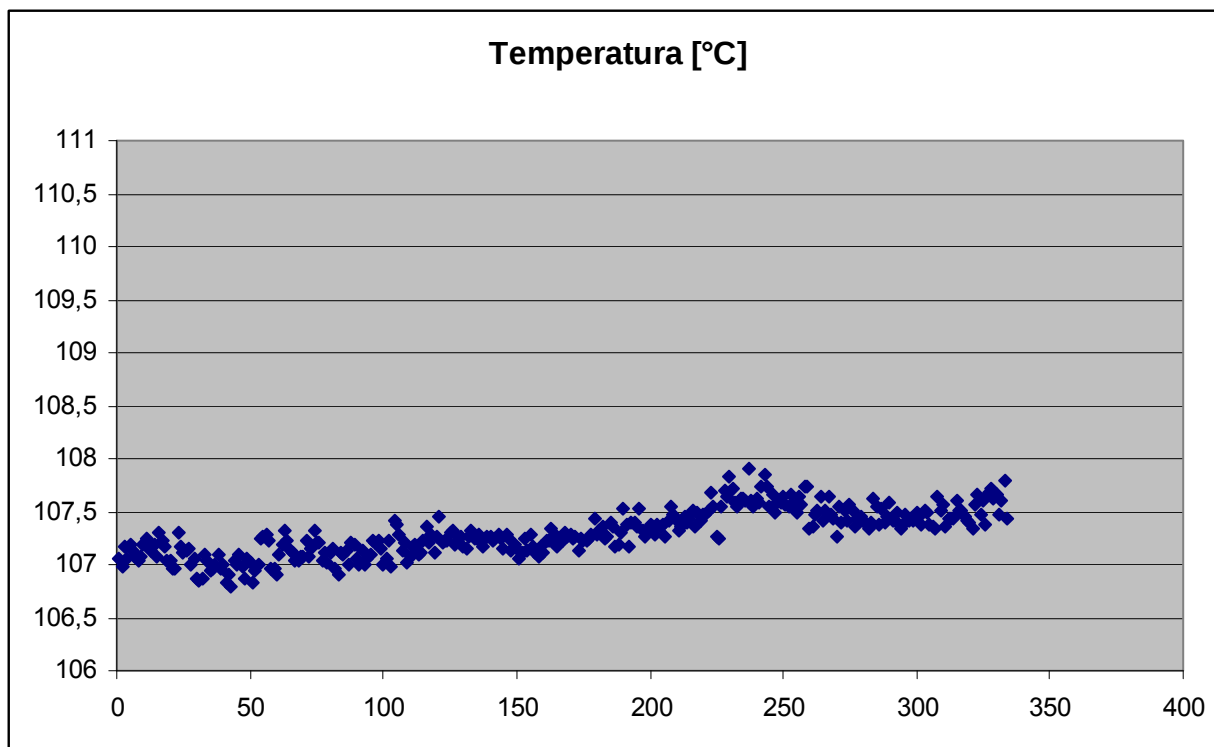


Figura 136: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

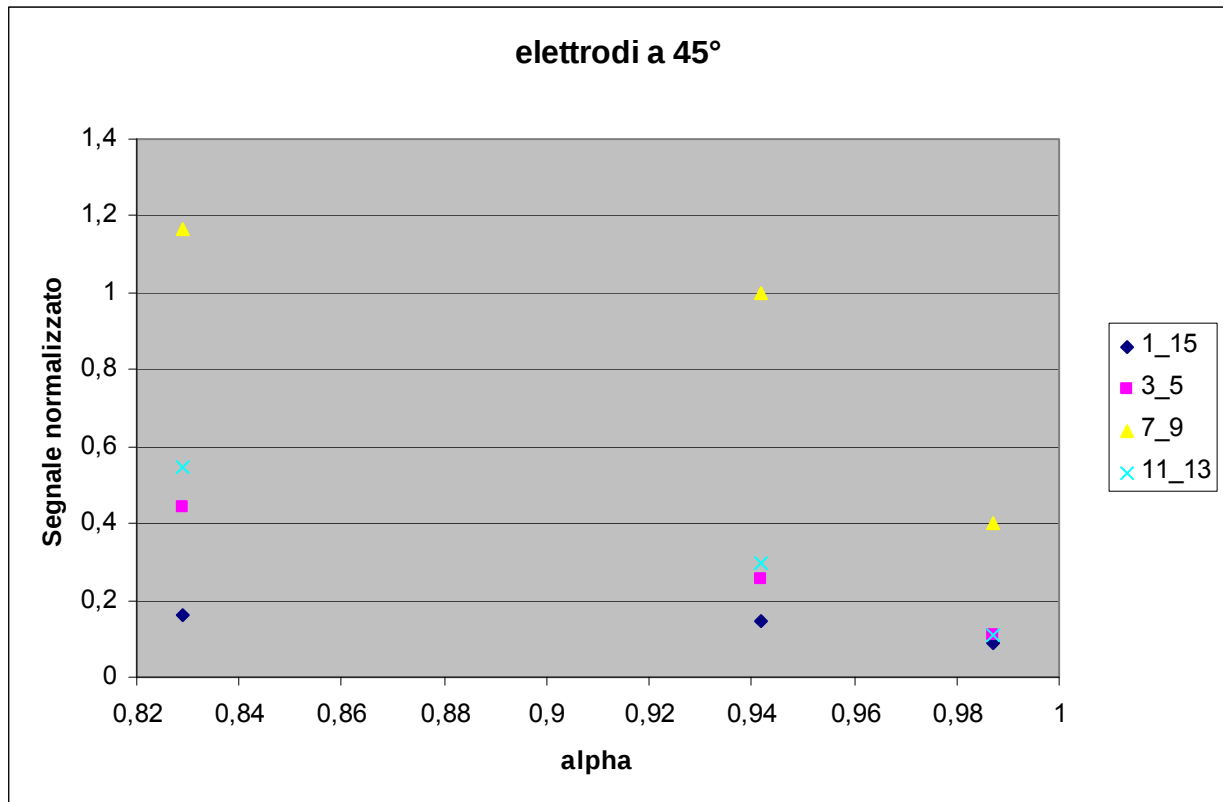


Figura 137: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°

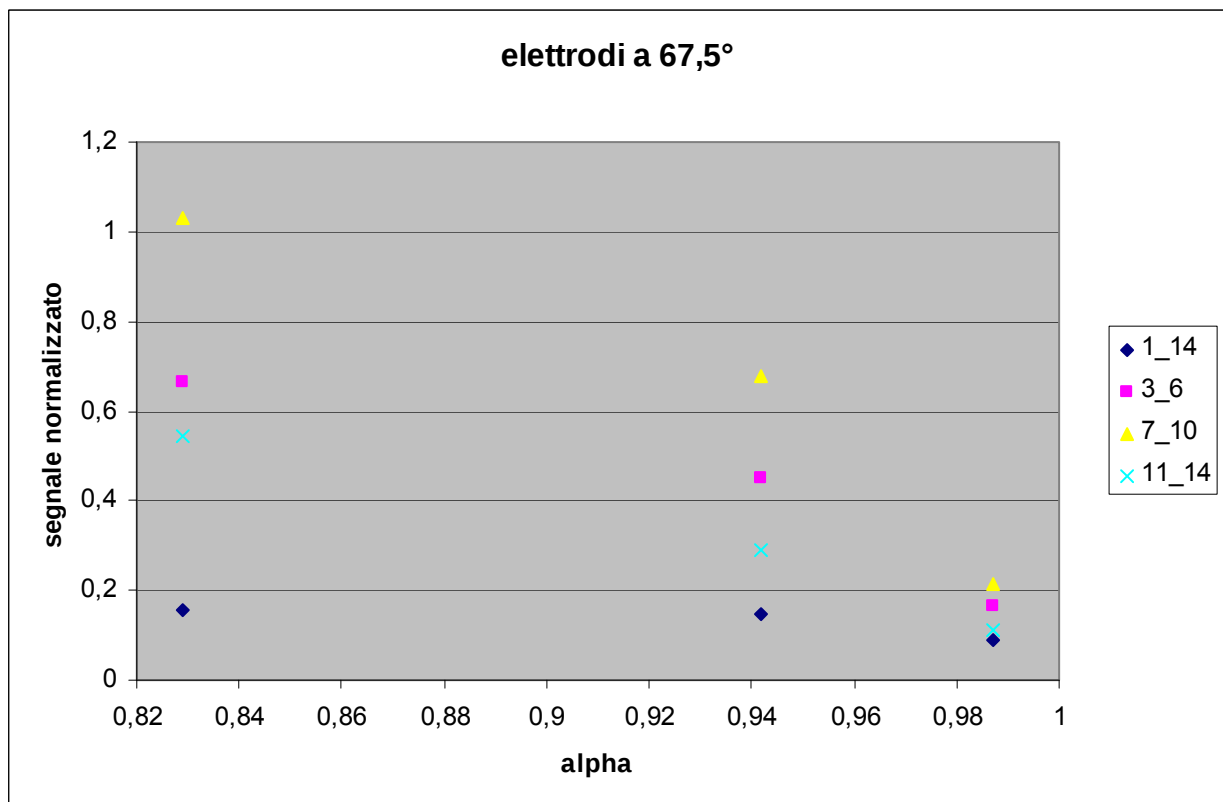


Figura 138: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°

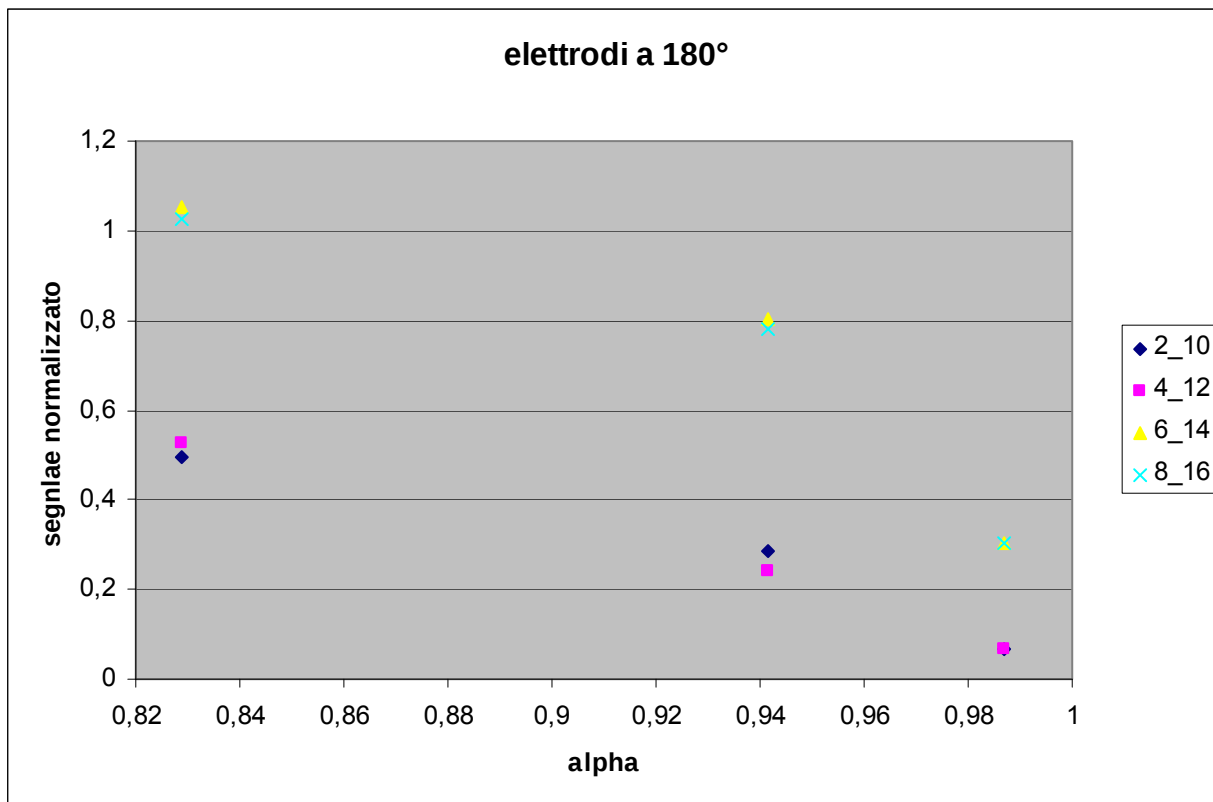


Figura 139: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°

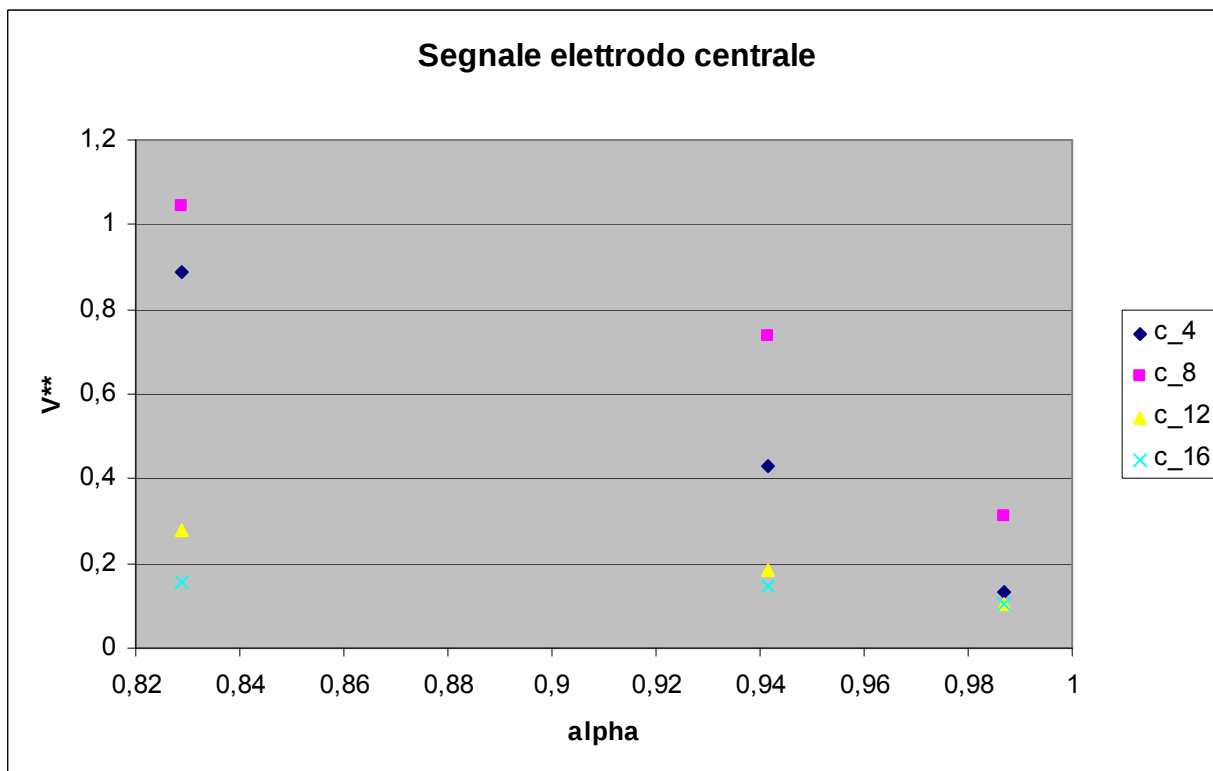


Figura 140: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato dall'elettrodo centrale

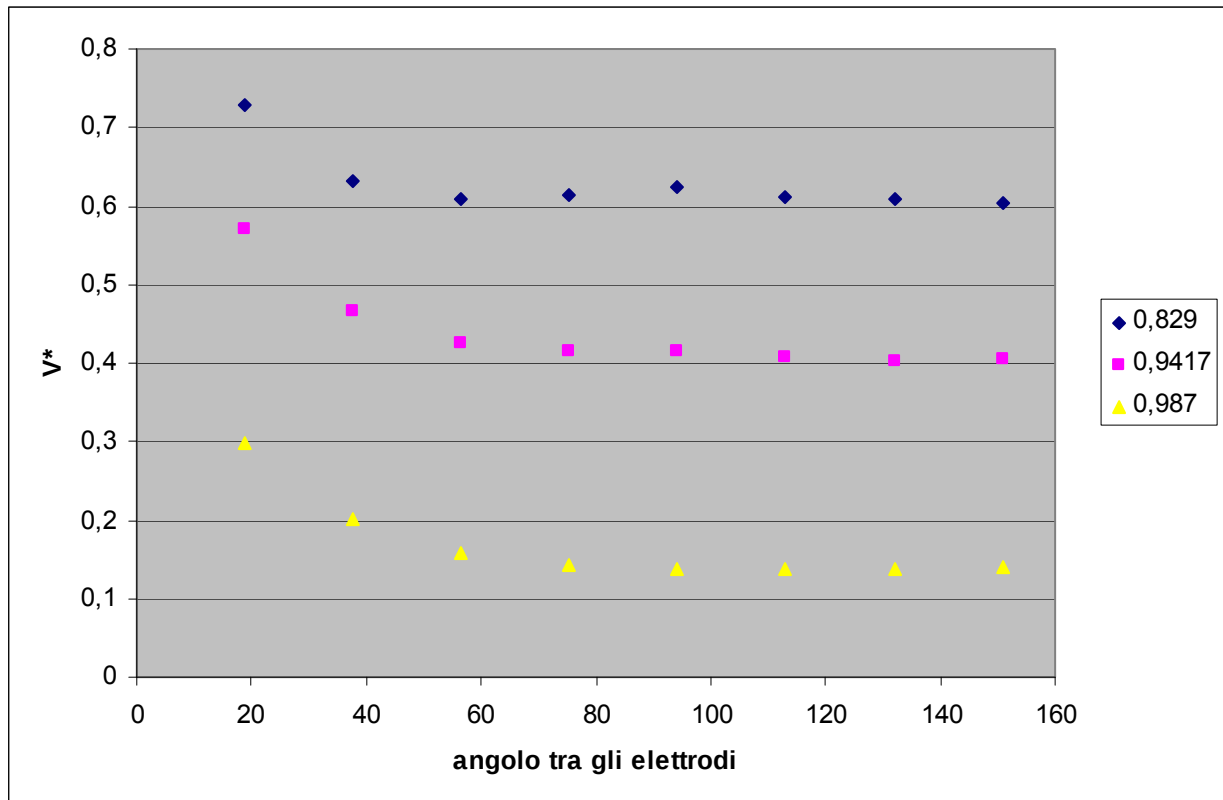


Figura 141: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha

L'andamento della temperatura e della pressione durante la fase di misura relativa alle prove 19, 20 e 21, caratterizzate da un alto valore di grado di vuoto, è pressoché costante. Viceversa, la temperatura e la pressione nella prova 18, caratterizzata da un basso grado di vuoto, presenta un andamento fluttuante (presenza di moto a slug)

Come nelle altre prove, il segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per le prove del gruppo 6, presenta un andamento monotono decrescente.

I segnali normalizzati più alti, sono quelli ottenuti con coppie di elettrodi poste in prossimità delle zone della sonda interessate da una maggior presenza di liquido e viceversa.

Le curve che rappresentano, per ciascuna prova, l'andamento del segnale normalizzato in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi interessati nella misura (Figura 141) sono ordinate in funzione del grado di vuoto.

Risultati prove gruppo 7

prova	alpha	modalità di conduzione delle prove
22	0,5077	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, drenaggi chiusi
23	0,987	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido chiusa, un drenaggio aperto
24	0,9417	valvola di adduzione del vapore aperta al 100%, valvola di adduzione del liquido aperta (1/4 di giro), drenaggi aperti

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
7	22	120	66,5	0,9213

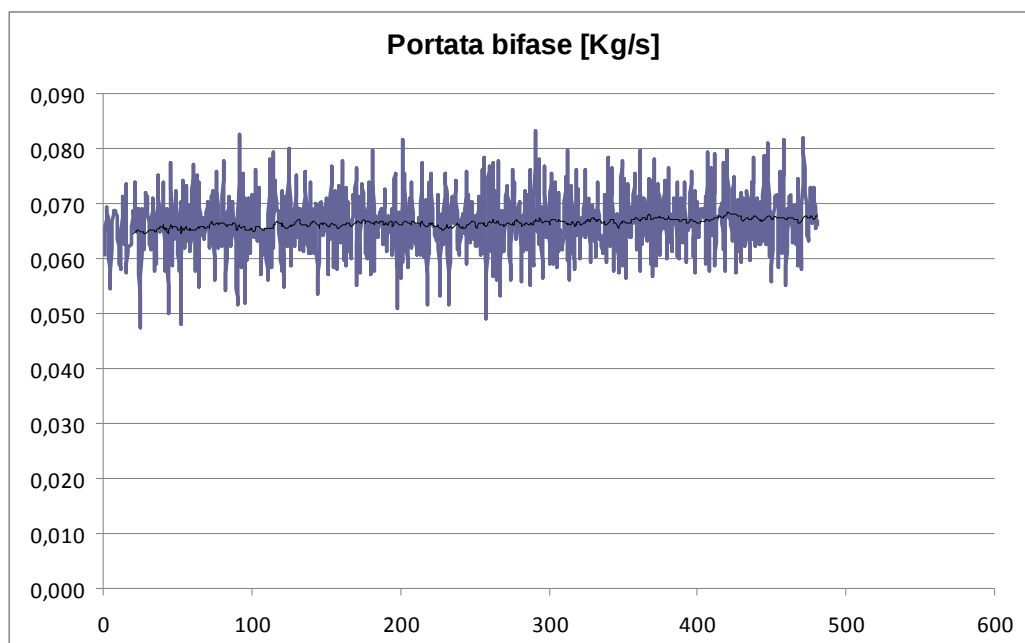


Figura 142: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

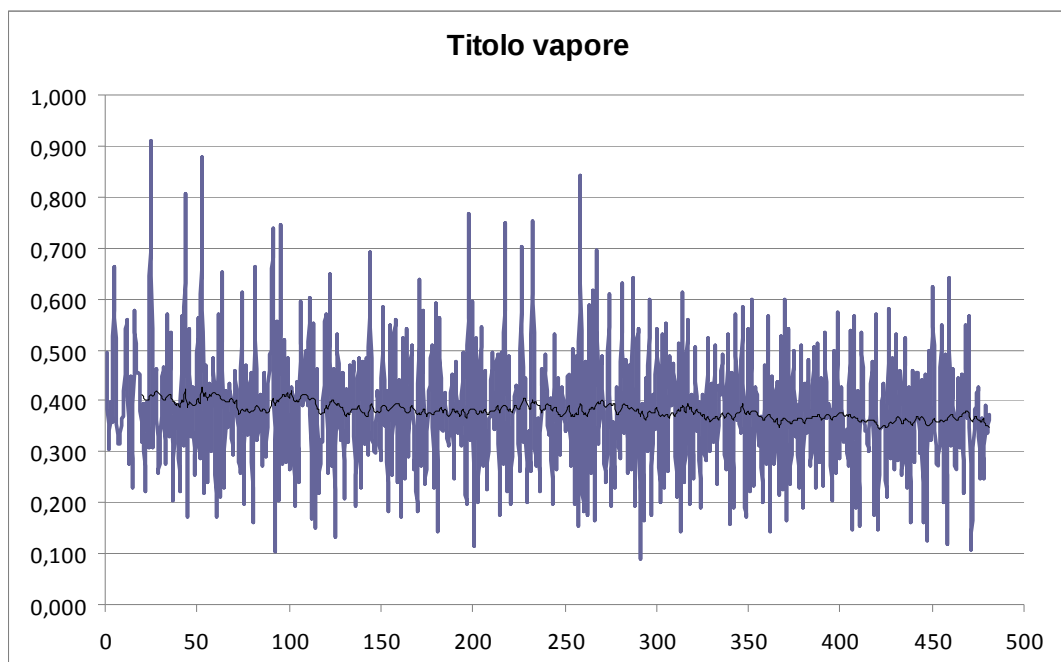


Figura 143: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

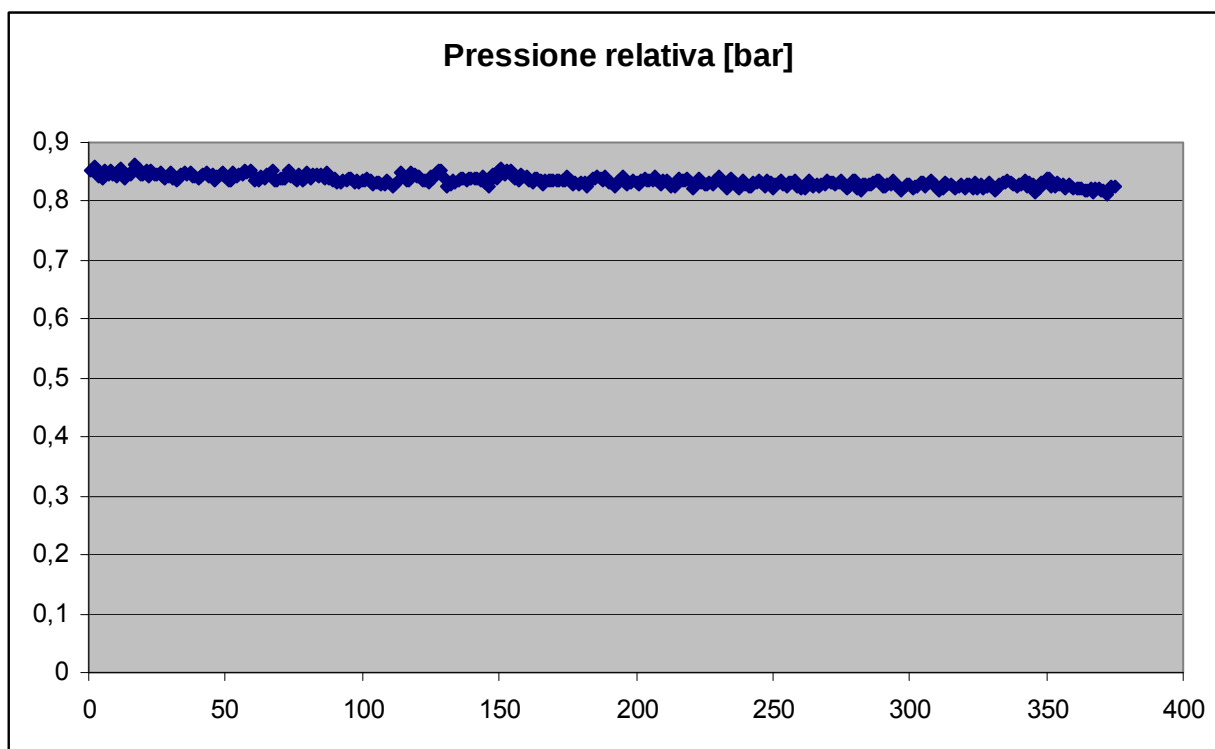


Figura 144: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

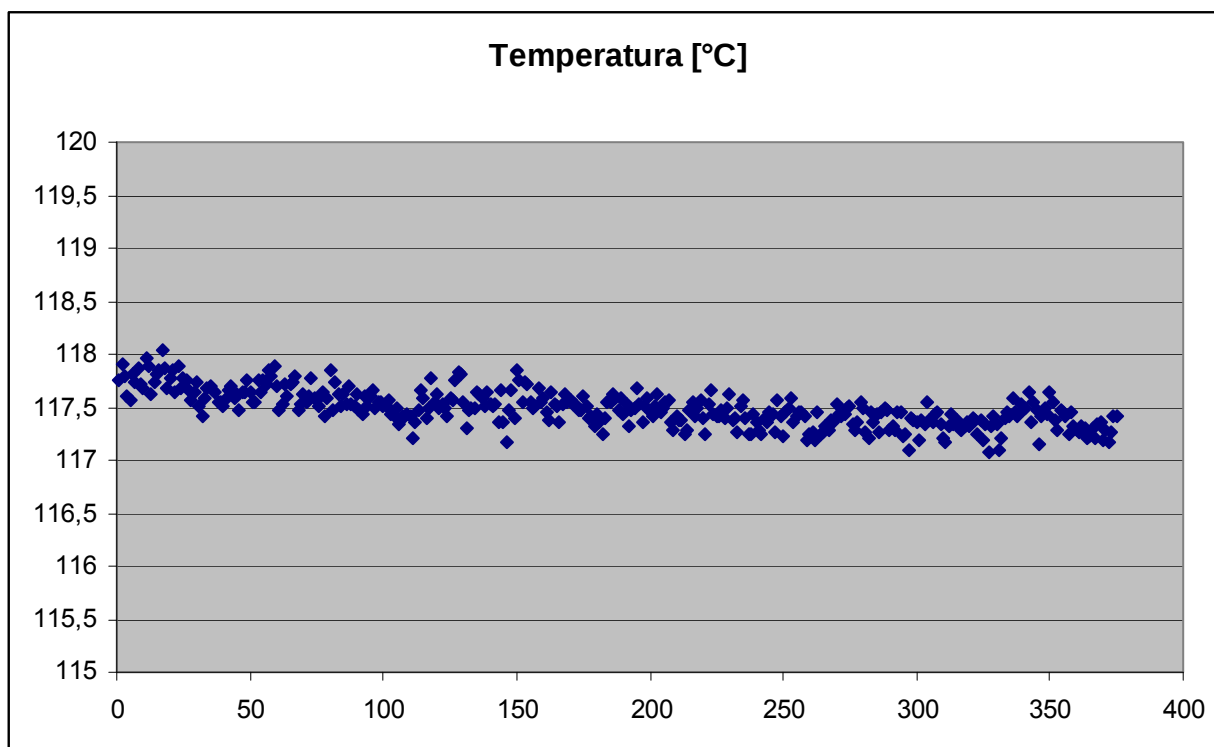


Figura 145: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
7	23	120	64,5	0,743

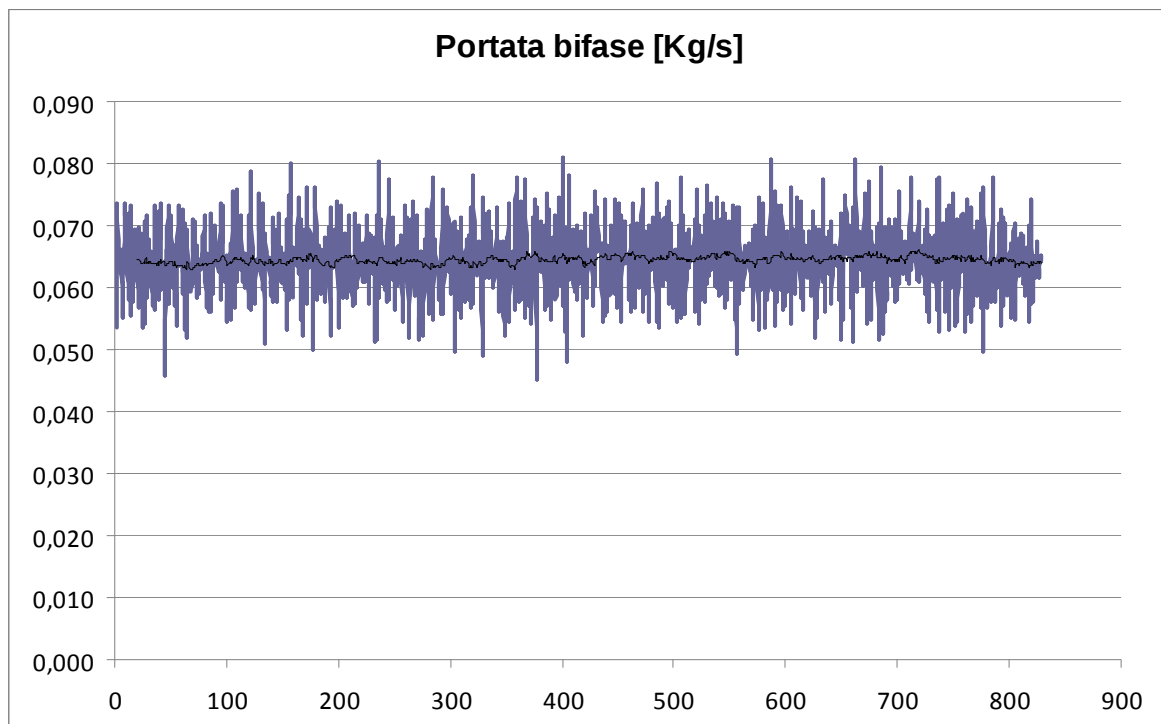


Figura 146: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

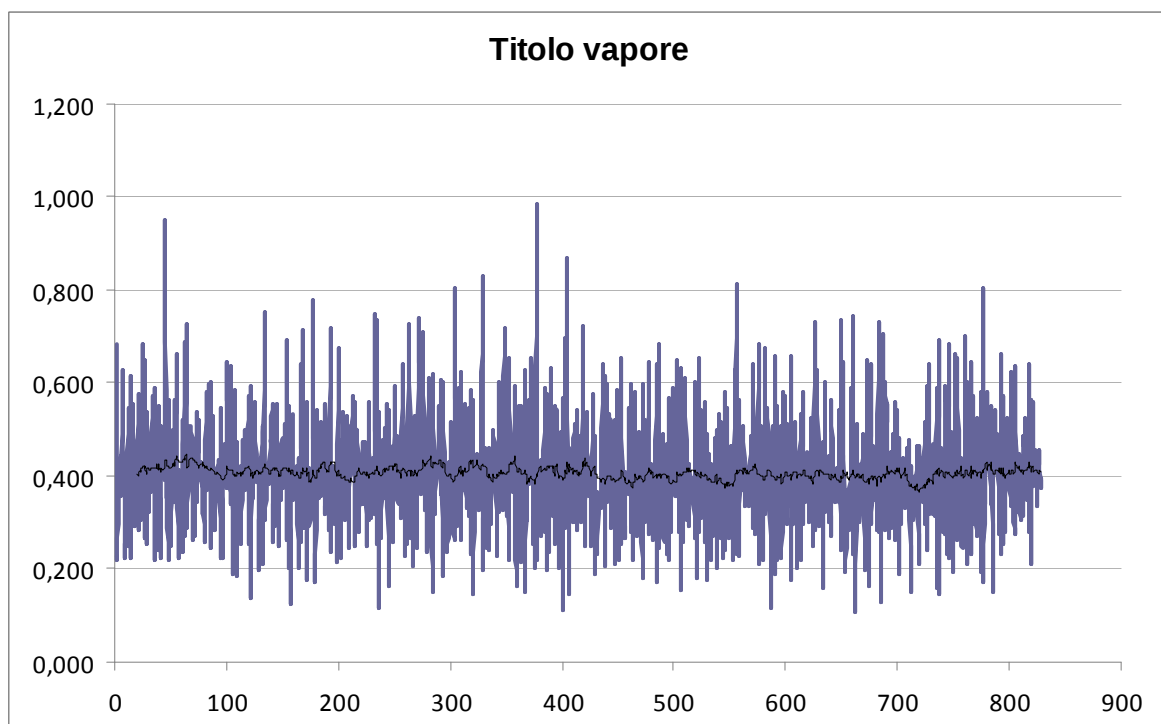


Figura 147: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

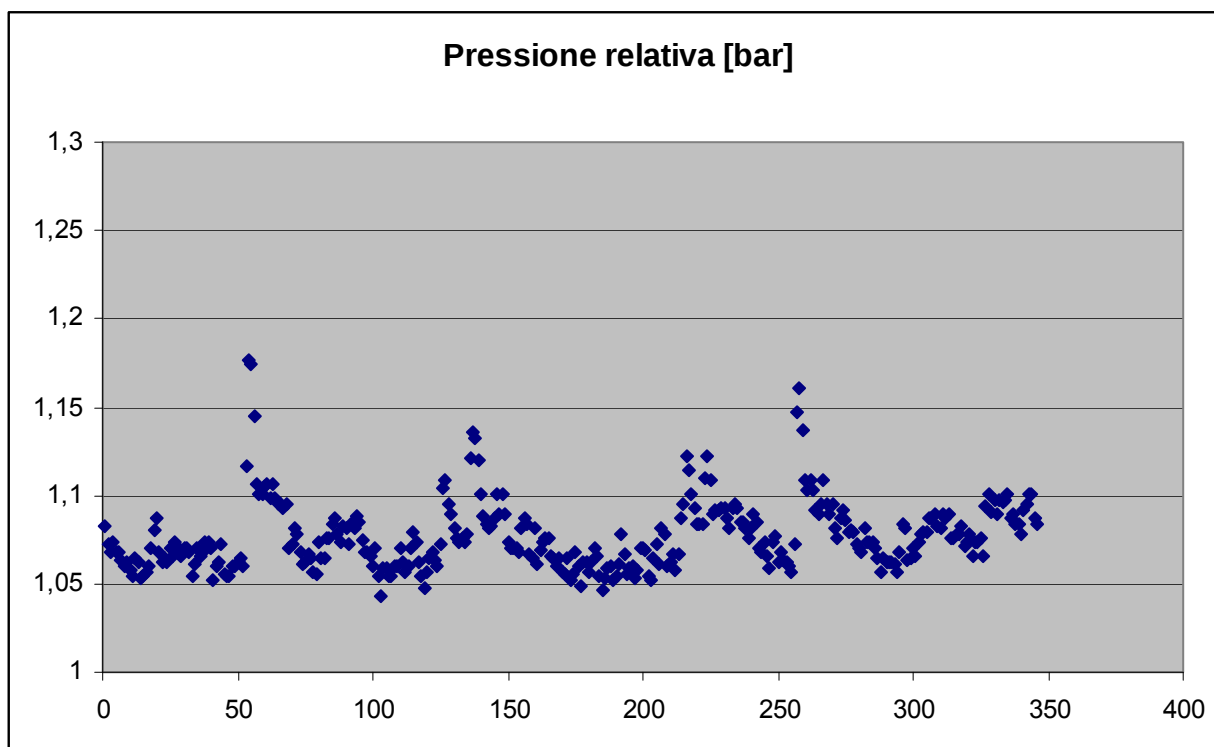


Figura 148: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

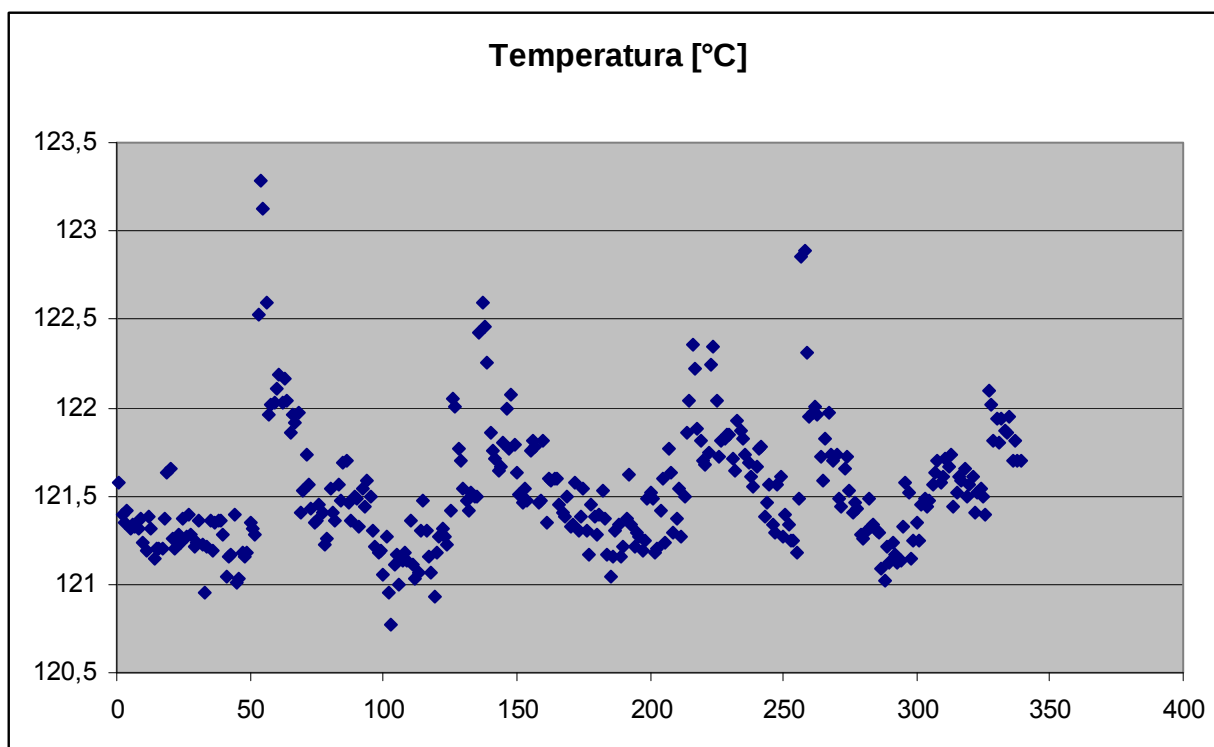


Figura 149: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

Gruppo	Prova	Potenza [kW]	Portata bifase [g/s]	alpha
7	24	120	67,5	0,748

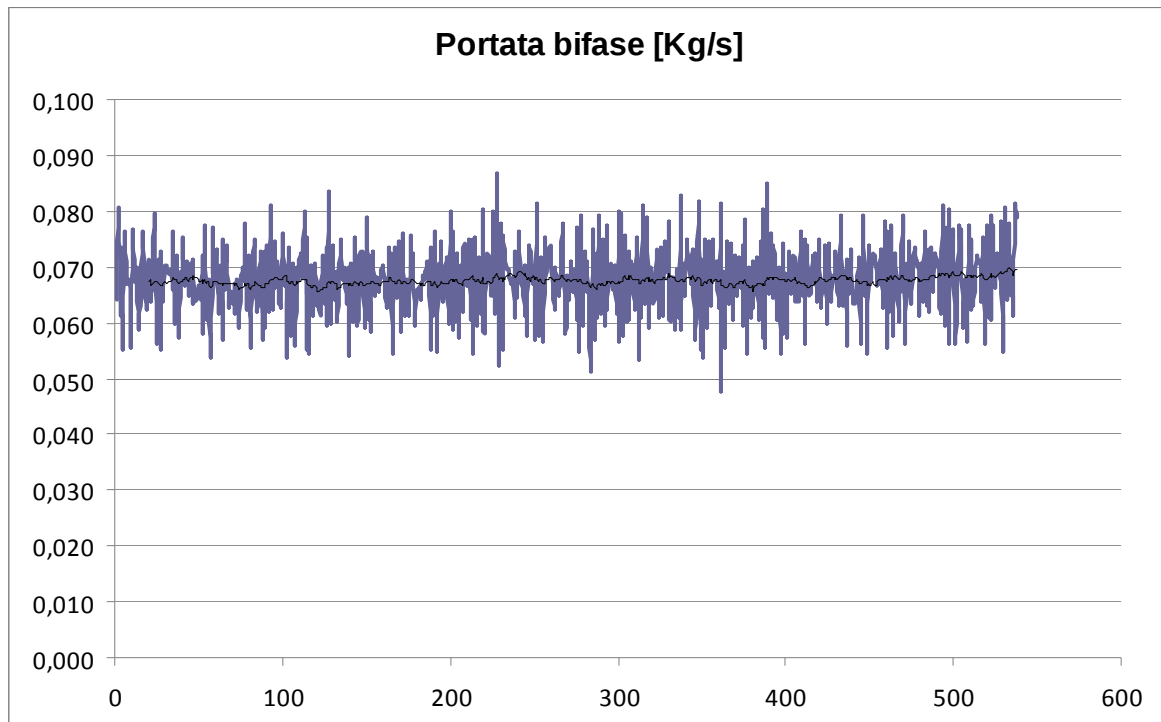


Figura 150: portata bifase in ingresso alla sonda capacitiva

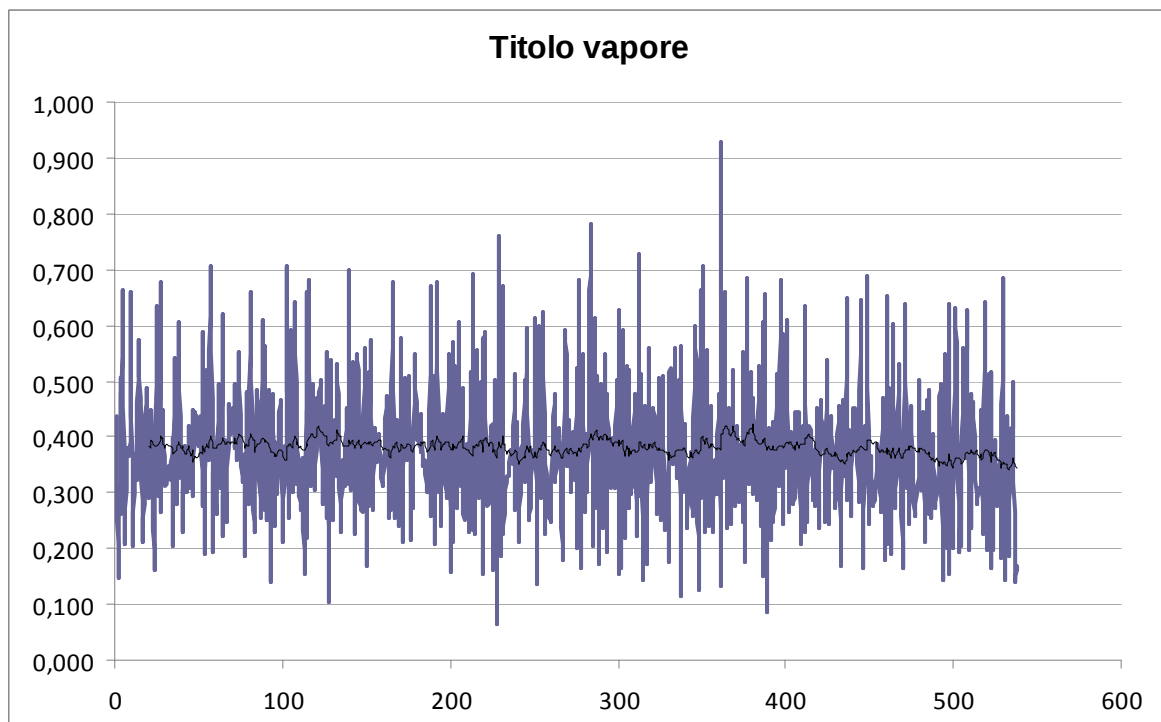


Figura 151: titolo del vapore in ingresso alla sonda capacitiva

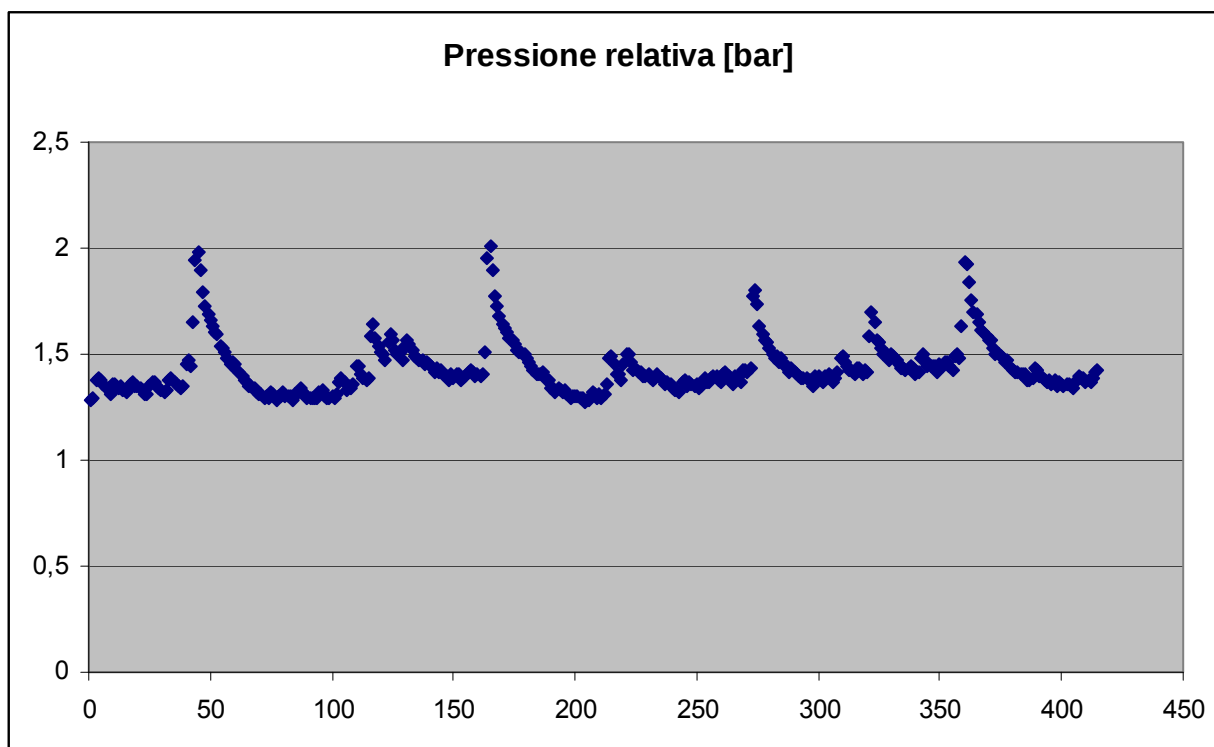


Figura 152: pressione del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

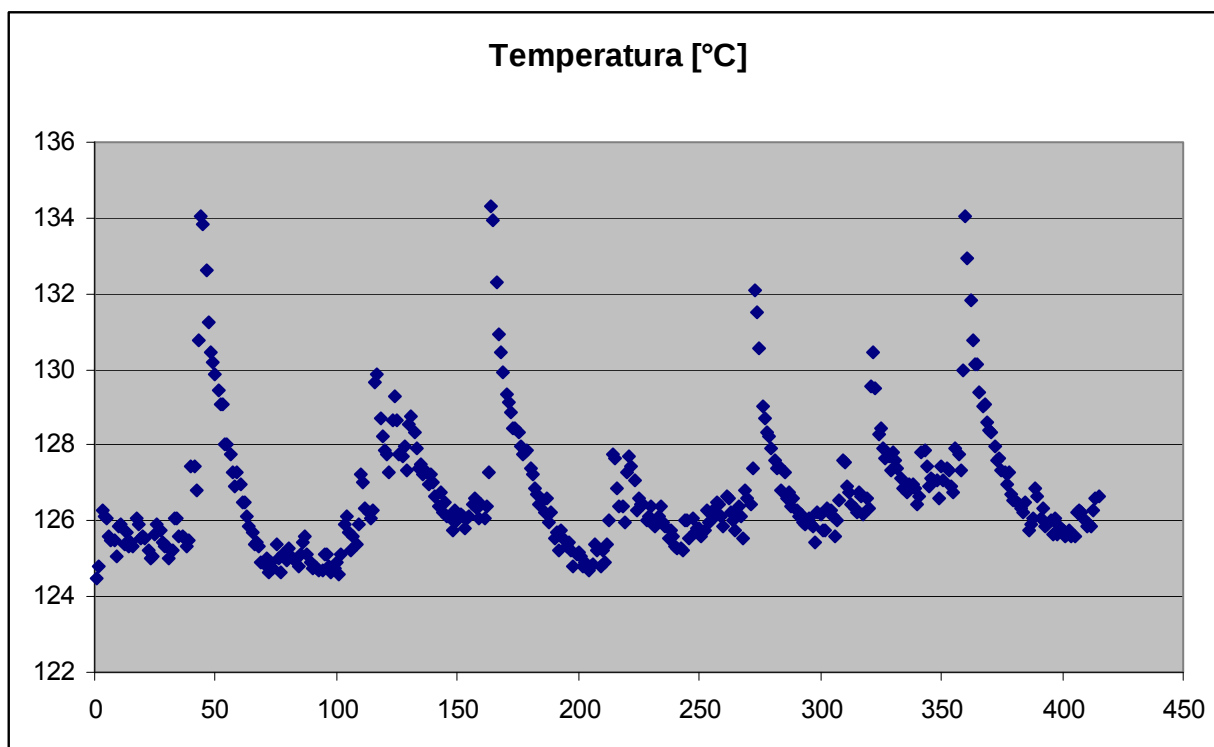


Figura 153: temperatura del fluido bifase all'interno della sonda capacitiva durante la fase di misura

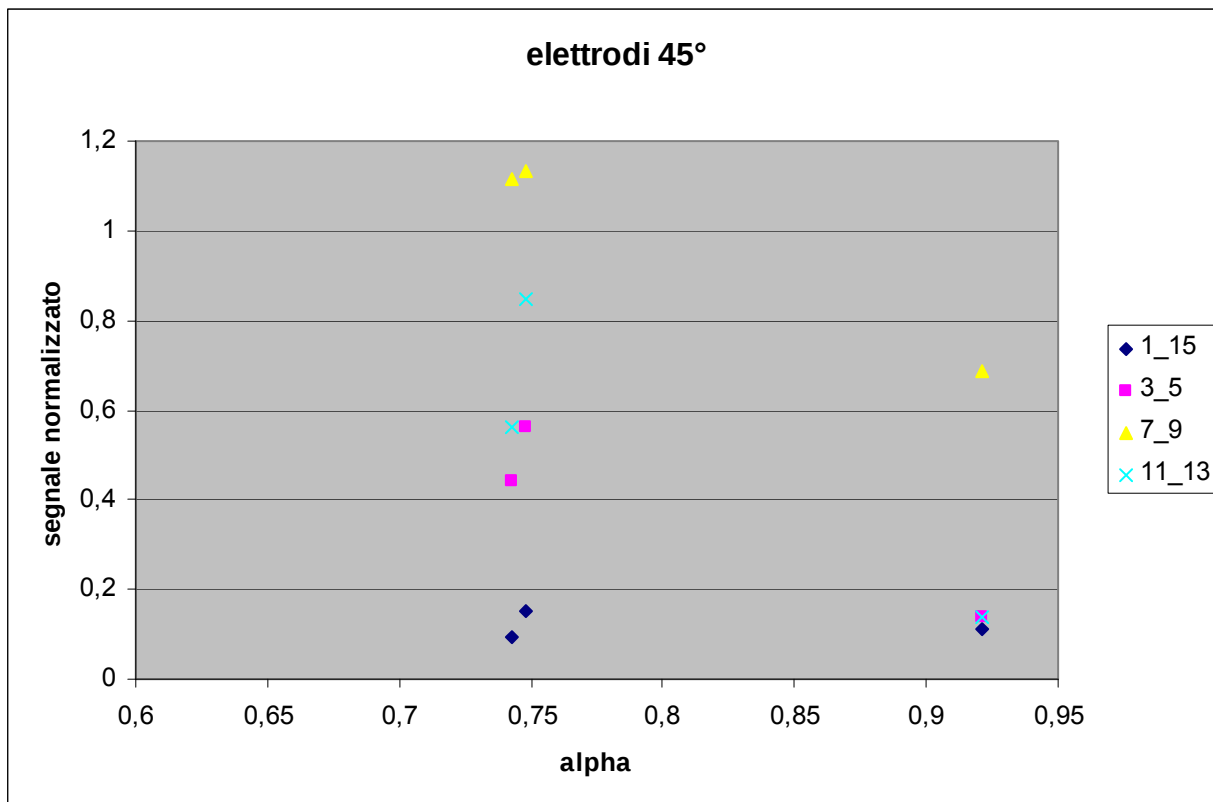


Figura 154: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 45°

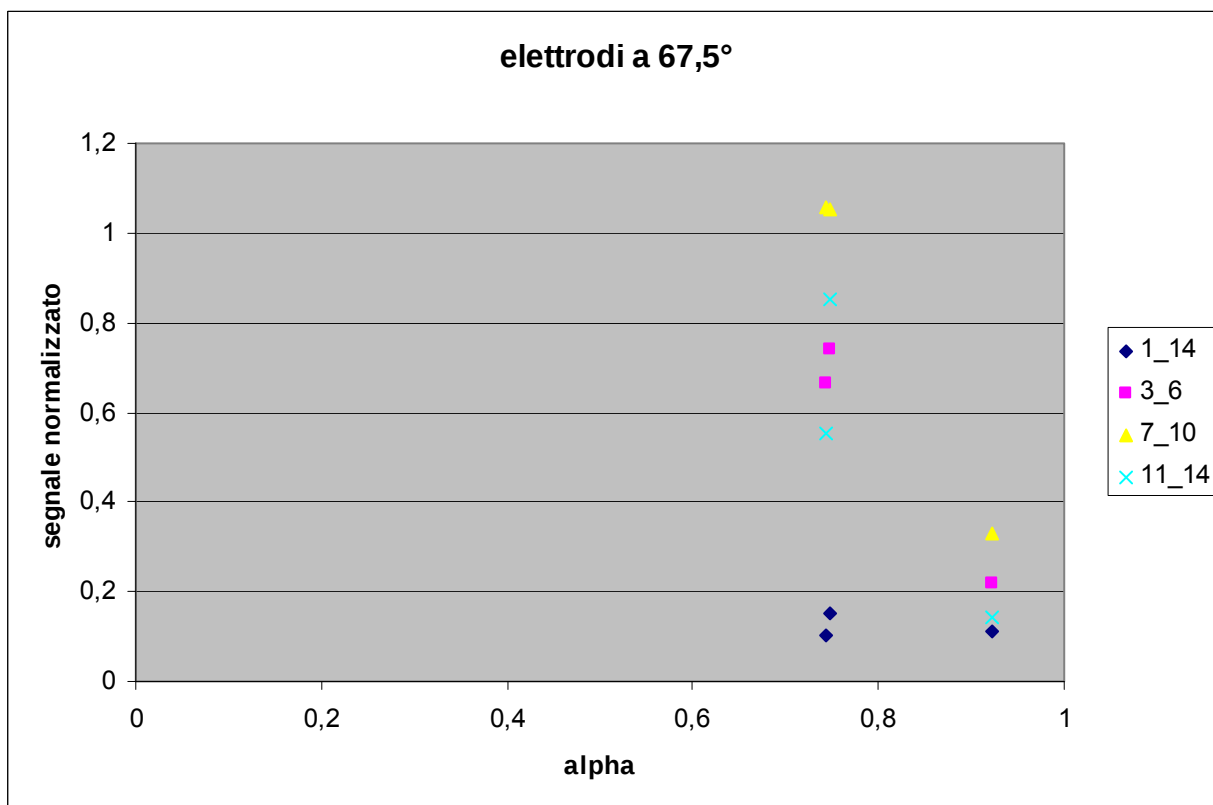


Figura 155: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 67,5°

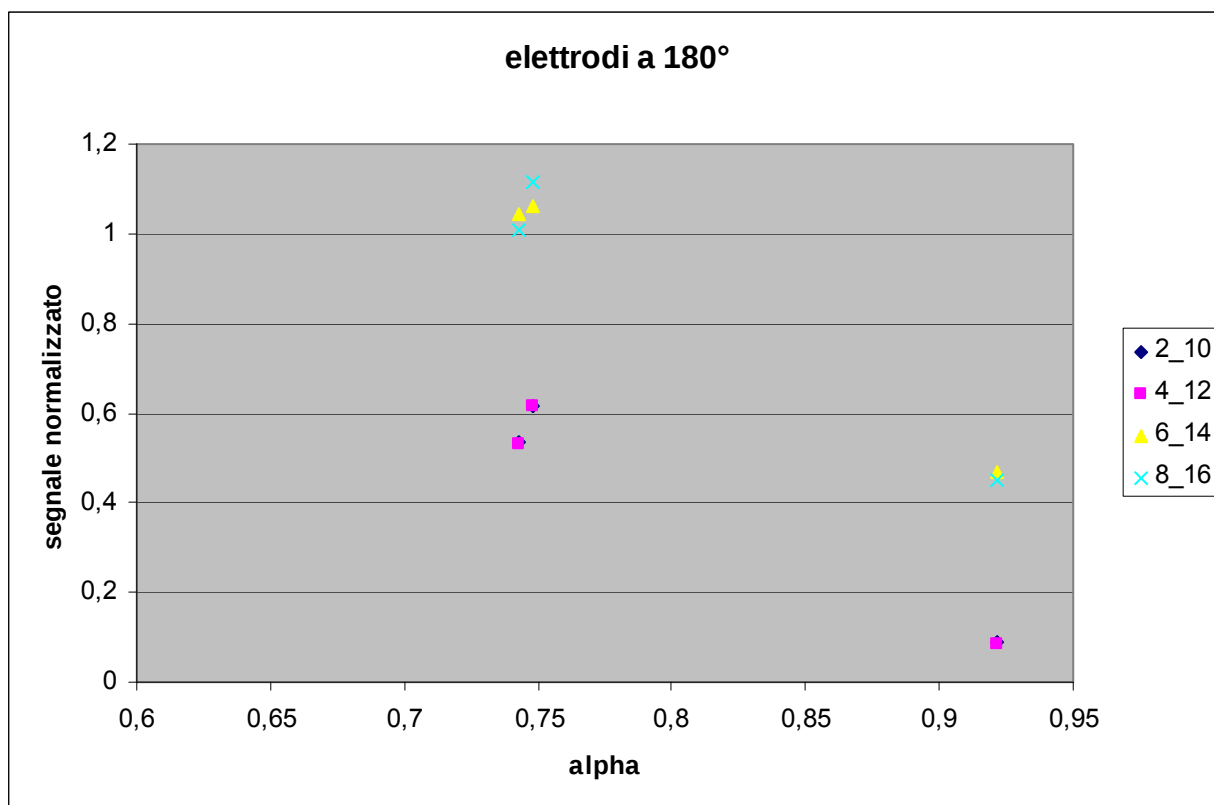


Figura 156: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con coppie di elettrodi angolati di 180°

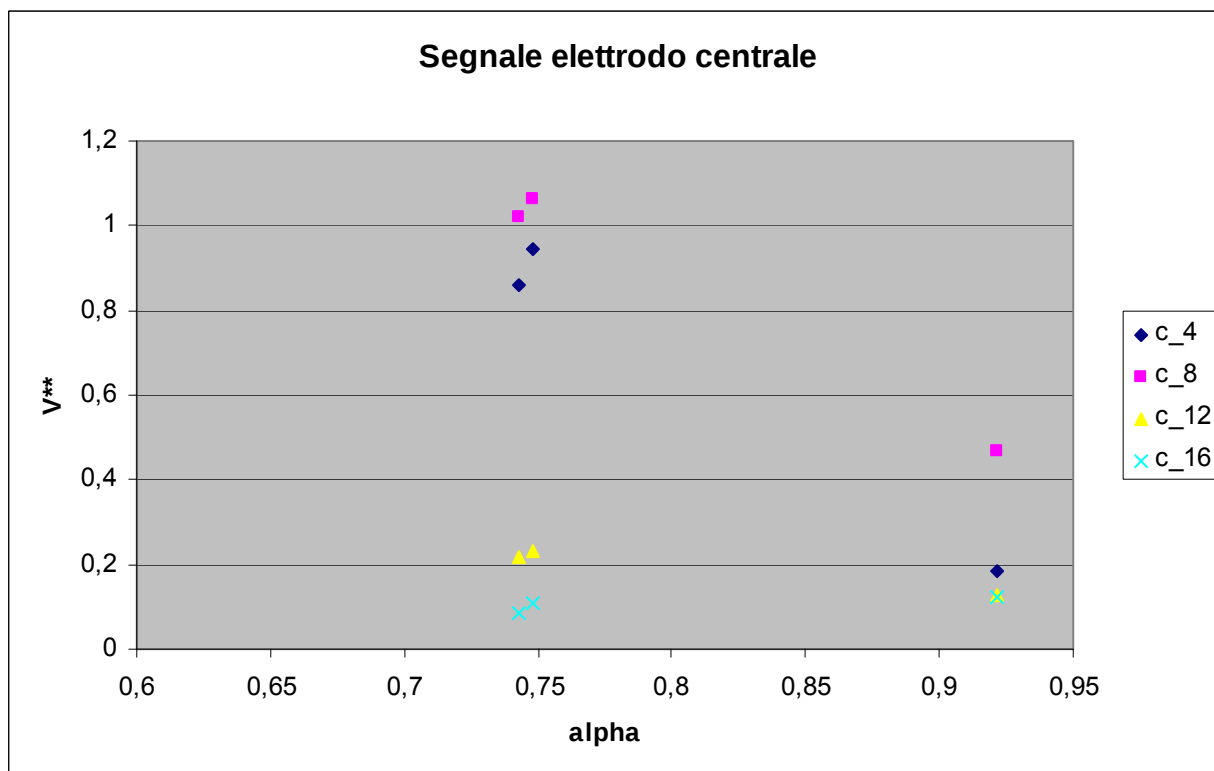


Figura 157: segnale normalizzato vs grado di vuoto misurato con l'elettrodo centrale

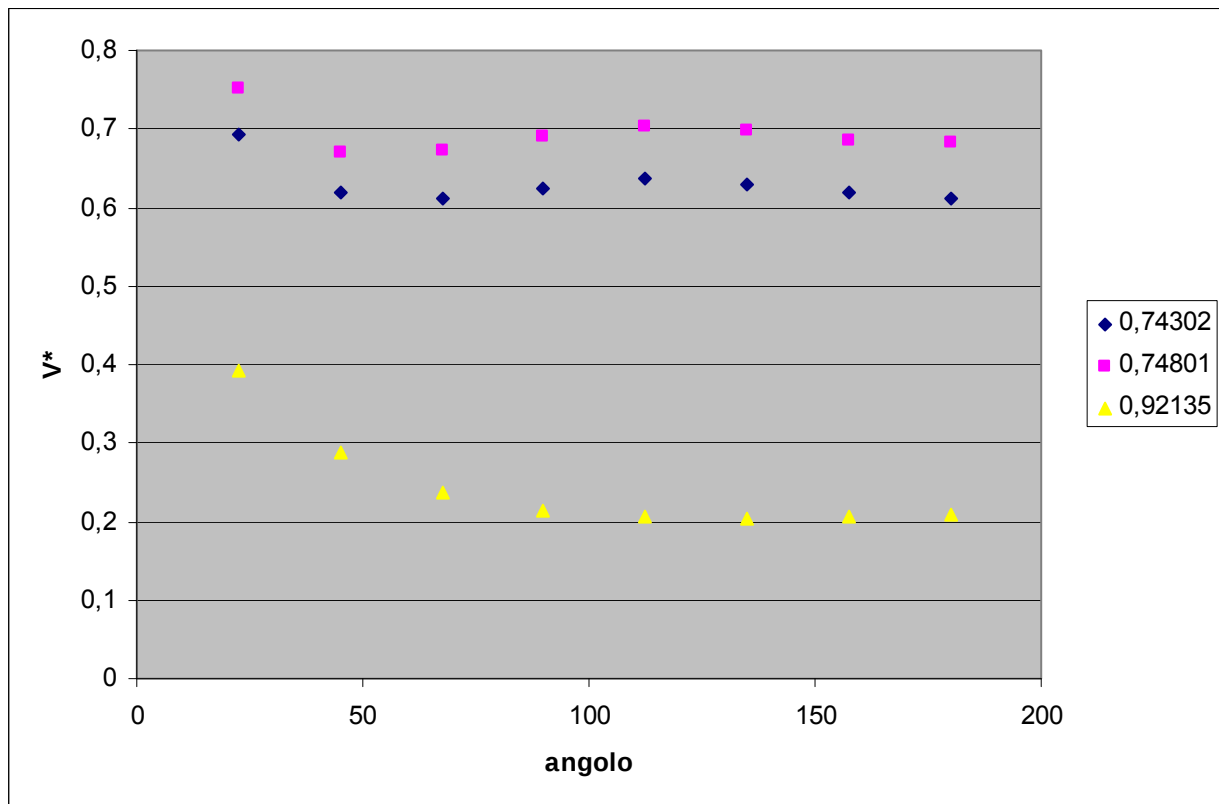


Figura 158: segnale normalizzato vs angolo tra gli elettrodi per miscele caratterizzate da diversi alpha

L'andamento della temperatura e della pressione durante la fase di misura relativa alla prova 22, caratterizzata da un alto valore di grado di vuoto, è pressoché costante. Viceversa, la temperatura e la pressione nelle prove 23 e 24, caratterizzate da un basso grado di vuoto, presentano un andamento fluttuante (presenza di moto a slug).

Come nelle altre prove, Il segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per le prove del gruppo 7, presenta un andamento monotono decrescente.

I segnali normalizzati più alti, sono quelli ottenuti con coppie di elettrodi poste in prossimità delle zone della sonda interessate da una maggior presenza di liquido e viceversa.

Le curve che rappresentano, per ciascuna prova, l'andamento del segnale normalizzato in funzione dell'angolo compreso tra gli elettrodi interessati nella misura (Figura 158) sono ordinate in funzione del grado di vuoto.

5.4 Caratterizzazione della sonda capacitiva

La campagna sperimentale svolta ha come obiettivo la caratterizzazione della sonda capacitiva nelle reali condizioni di funzionamento. La caratterizzazione è completa se si riescono a correlare i segnali provenienti dalla sonda al grado di vuoto volumetrico medio del fluido, su cui viene effettuata l'indagine tomografica.

Nel seguito vengono proposti due differenti approcci, uno di tipo matematico, sviluppato solo dal punto di vista teorico, e uno sperimentale basato su alcune ipotesi di tipo qualitativo e sui dati raccolti durante la campagna sperimentale.

5.4.1 Modello matematico per l'analisi tomografica EIT (Electrical impedance tomography)

Dal punto di vista matematico l'algoritmo di ricostruzione dell'immagine tomografica (ovvero la ricostruzione della mappa di resistività) è noto e si basa sulla soluzione del "problema di inversione".

I problemi di inversione sono problemi in cui, a partire dalle note caratteristiche geometriche e fisiche f dello strumento utilizzato nell'acquisizione (nel nostro caso il sistema tomografico), dal rumore additivo k e dall'immagine degradata z , con:

$$z = f(u) + k,$$

dove:

- z : immagine degradata;
- f : caratteristiche strumento tomografico;
- u : mappa di resistività;
- k : rumore;

si vuole costruire una'approssimazione $\bar{u}$ della soluzione ideale:

$$u = f^{-1}(z - k)$$

In modo tale che:

$$\| \bar{u} - z \| \leq \xi$$

La ricostruzione della mappa di resistività all'interno di un volume di controllo Ω è basata sulla possibilità di calcolare il campo elettrico al suo interno, quando una corrente nota viene iniettata dagli elettrodi posti sul contorno del dominio $\partial\Omega$.

L'obiettivo è quello di stimare la distribuzione di potenziale all'interno del volume di controllo attraverso un set di misure di potenziale effettuate sul contorno. Tale distribuzione è proporzionale a quella delle fasi all'interno del volume di controllo.

Il volume di controllo Ω è caratterizzato da una conduttività variabile $\sigma(x, y)$ in funzione della fase considerata. Appliciamo le equazioni di Maxwell al volume di controllo:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

La legge di Gauss ci dice che il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è pari alla somma delle cariche contenute nella superficie divisa per la costante dielettrica nel vuoto.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

La legge di Faraday afferma che la variazione nel tempo del flusso del campo magnetico concatenato a un circuito genera una forza elettromotrice che si oppone alla variazione del flusso.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

ovvero il flusso del campo magnetico attraverso una superficie chiusa è nullo.

$$\nabla \times B = \frac{j}{\varepsilon_o} + \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

Un campo elettrico variabile è sorgente di un campo magnetico.

Siccome le misure sono acquisite quasi istantaneamente, possono essere applicate le condizioni stazionarie:

$$\frac{\partial B}{\partial t} \approx 0; \quad \frac{\partial E}{\partial t} \approx 0$$

Perciò l'equazione 2 diventa:

$$\nabla \times E = 0$$

Dalla teoria del calcolo vettoriale sappiamo che, quando il rotore di un vettore è uguale a zero, esiste sempre uno scalare, il cui gradiente è uguale a quel vettore, in particolare:

$$E = -\nabla u$$

L'equazione 4, sotto l'ipotesi di stazionarietà, diventa:

$$\nabla \times B = \frac{j}{\varepsilon_o}$$

cioè la densità di corrente può essere assunta costante nel tempo.

Se chiamiamo I_n l'n-esima corrente iniettata all'interno del volume di controllo dalla superficie S dell'elettrodo, si può scrivere:

$$I_n = \int_s j \cdot \nu \cdot ds$$

Dal teorema di conservazione della carica elettrica, si ottiene:

$$\int_s j \cdot dS = -\frac{d}{dt}(Q_\Omega)$$

in cui la carica complessiva all'interno del volume di controllo è esprimibile come : $Q_\Omega = \int_\Omega \rho \cdot dV$

Combinando le tre equazioni precedenti, otteniamo:

$$\nabla \cdot j = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Siccome non sono presenti sorgenti di corrente all'interno del volume di controllo, l'equazione diventa:

$$\nabla \cdot j = 0$$

con:

$$j \approx \gamma \cdot E \approx (\sigma + i\omega\epsilon)E$$

in cui σ rappresenta la conduttività, ϵ la permittività e γ l'ammettenza del mezzo.
Sostituendo nell'equazione precedente, otteniamo l'equazione alle derivate parziali ellittica:

$$\nabla \cdot \gamma \cdot (-\nabla u) = 0$$

Se chiamiamo Γ_1 la superficie del contorno $\partial\Omega$ coperta dagli elettrodi e Γ_2 la superficie non coperta dagli elettrodi, le densità di corrente associate a tali superfici sono:

$$\gamma \frac{\partial u}{\partial \nu} = j \quad \text{su } \Gamma_1$$

$$\gamma \frac{\partial u}{\partial \nu} = 0 \quad \text{su } \Gamma_2$$

Per ogni elettrodo l'integrale della densità di corrente sulla propria superficie S è uguale alla corrente I_l che fluisce da o verso quell'elettrodo,

$$\int_{E_l} \gamma \frac{\partial u}{\partial \nu} \cdot ds = I_l \quad l = 1, \dots, L$$

in cui L è il numero totale di elettrodi del sistema.

Se indichiamo con V_l il valore di potenziale misurato sull'elettrodo l -esimo, con u il valore di potenziale elettrostatico all'interno del conduttore e con z_l l'impedenza di superficie:

$$u + z_l \gamma \frac{\partial u}{\partial \nu} = V_l \quad l = 1, \dots, L$$

il problema alle derivate parziali con le condizioni al contorno miste di Dirichlet e di Neumann è noto come CEM (complete electrode model).

Noto il modello matematico, il suo effettivo utilizzo in applicazioni concrete necessita la messa a punto di metodi numerici per la realizzazione del corrispondente problema discreto e di algoritmi che permettano di ottenere la soluzione in tempo reale.

5.4.2 Correlazione sperimentale tra segnale degli elettrodi e grado di vuoto

Come già detto, il segnale RMS per ciascuna coppia di elettrodi è stato normalizzato all'interno del loro intervallo di funzionamento per rendere confrontabili misure ottenute con elettrodi posti a distanze diverse.

Il segnale ottenuto per ciascuna combinazione è proporzionale al valore della costante dielettrica media della porzione di fluido attraversata dalle linee di flusso del campo elettrico.

Le linee di flusso generate da elettrodi vicini coprono una piccola porzione del fluido bifase che fluisce all'interno della sonda. Quelle generate da elettrodi posti a distanze maggiori, interessando una porzione di fluido maggiore, danno una idea più realistica dell'effettivo grado di vuoto della miscela bifase.

Per tener conto di questo fatto, si associa a ciascun segnale normalizzato un coefficiente, che tiene conto del peso che ciascuna misura ha sulla stima del grado di vuoto complessivo della miscela.

Il coefficiente viene calcolato come l'area percentuale coperta dalle linee di flusso per ciascuna coppia di elettrodi. Tale area è valutata come l'area sottesa dalla congiungente tra le diverse coppie di elettrodi, fatta 100 l'area coperta dalle linee di flusso generate dagli elettrodi posti a 180°.

La Tabella 3 mostra l'angolo compreso tra gli elettrodi, la loro distanza espressa in millimetri e il peso da associare a ciascuna misura a seconda dell'angolo compreso tra gli elettrodi.

Teta		22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180
distanza		18.85	37.7	56.55	75.4	94.25	113.1	131.95	150.8
A %		0.033762	0.124089	0.238686	0.379554	0.53483	0.684486	0.842927	1

Tabella 3: parametri elettrodi periferici

I grafici seguenti riportano l'andamento del segnale normalizzato e pesato tenendo conto dell'area percentuale coperta dalle linee di flusso per ogni coppia di elettrodi in funzione della distanza tra gli elettrodi. Per ciascuna prova si è considerata la media tra i segnali ottenuti tra coppie di elettrodi posti alla stessa distanza.

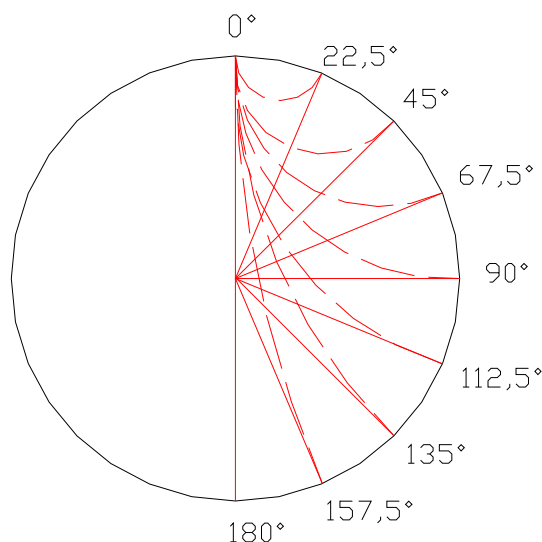


Figura 159: area associata a ciascuna coppia di elettrodi

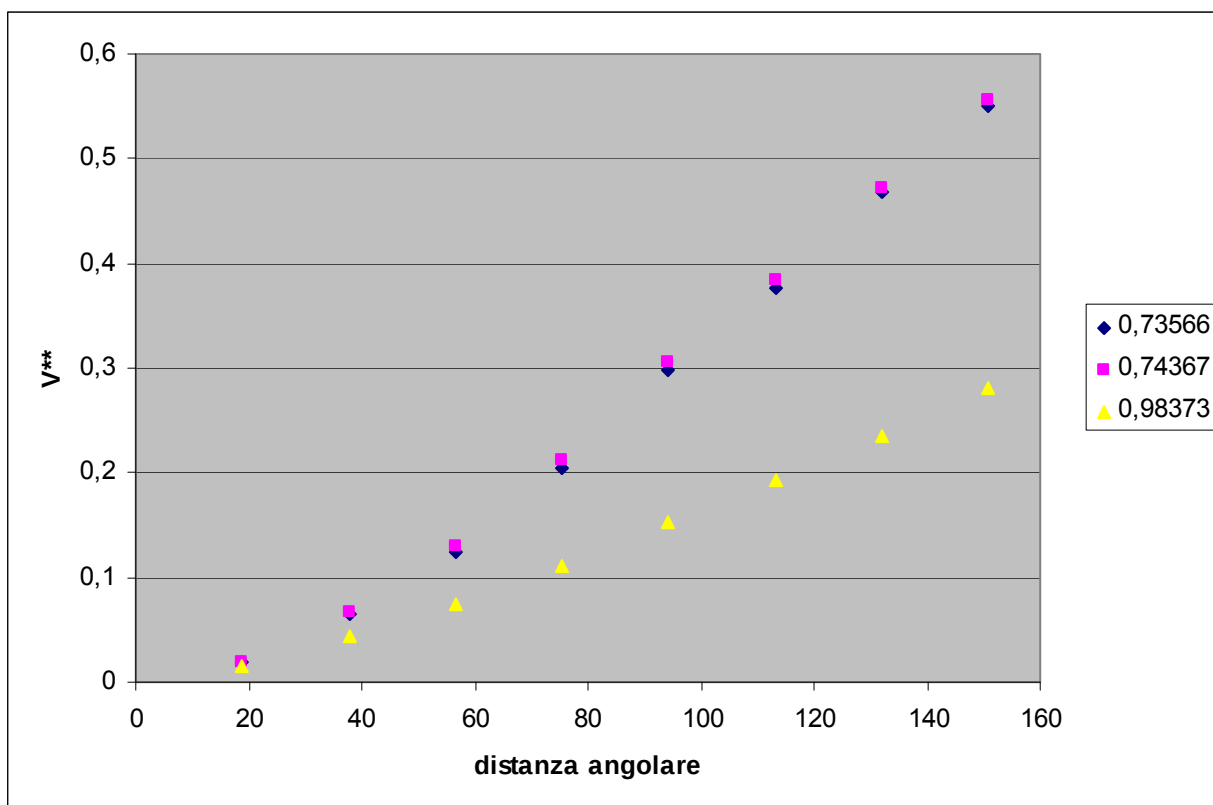


Figura 160: Segnale normalizzato e pesato per le prove gruppo 1

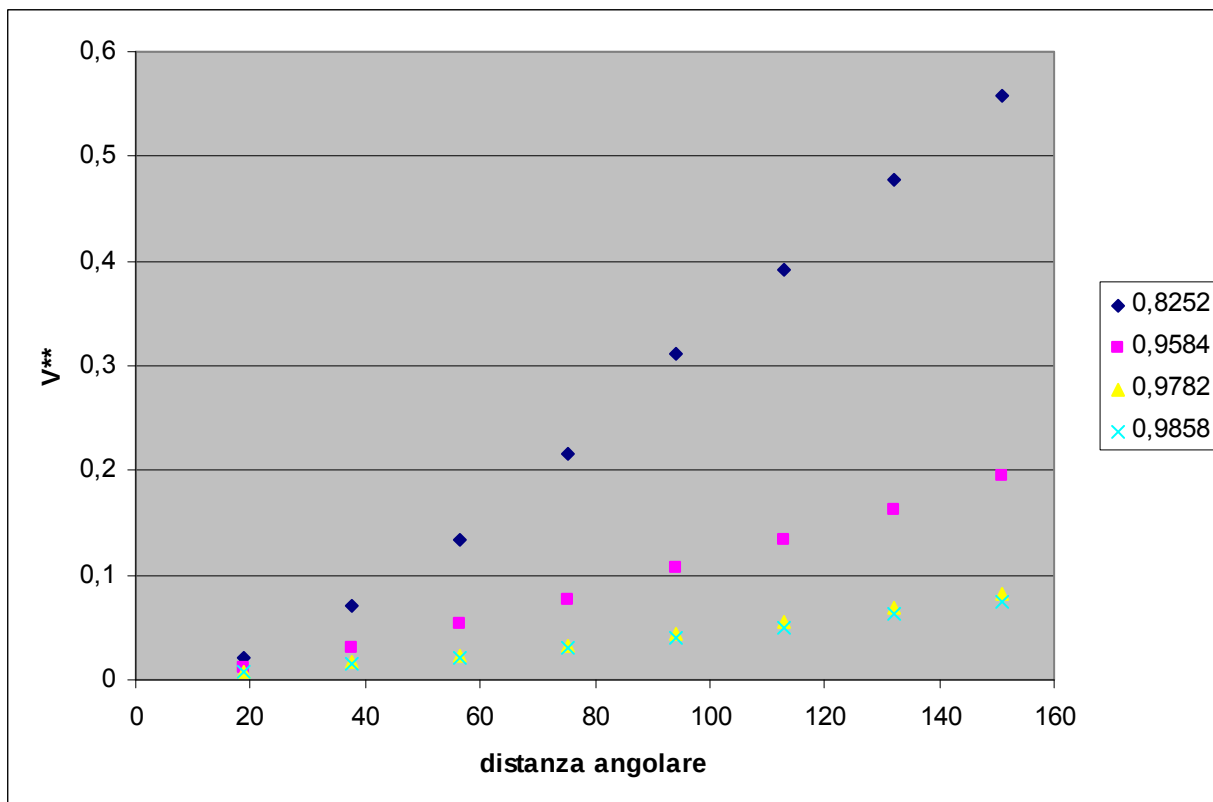


Figura 161: Segnale normalizzato e pesato per le prove gruppo 2

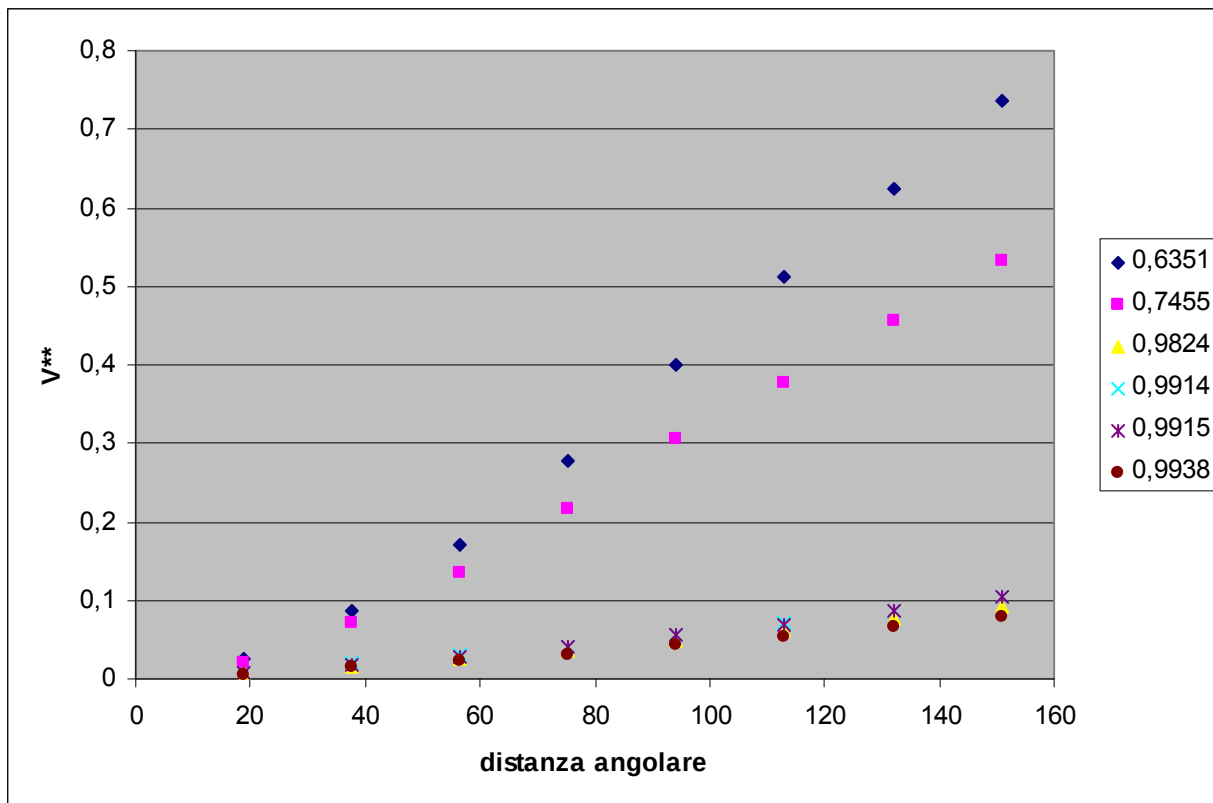


Figura 162: Segnale normalizzato e pesato per le prove gruppi 3-4

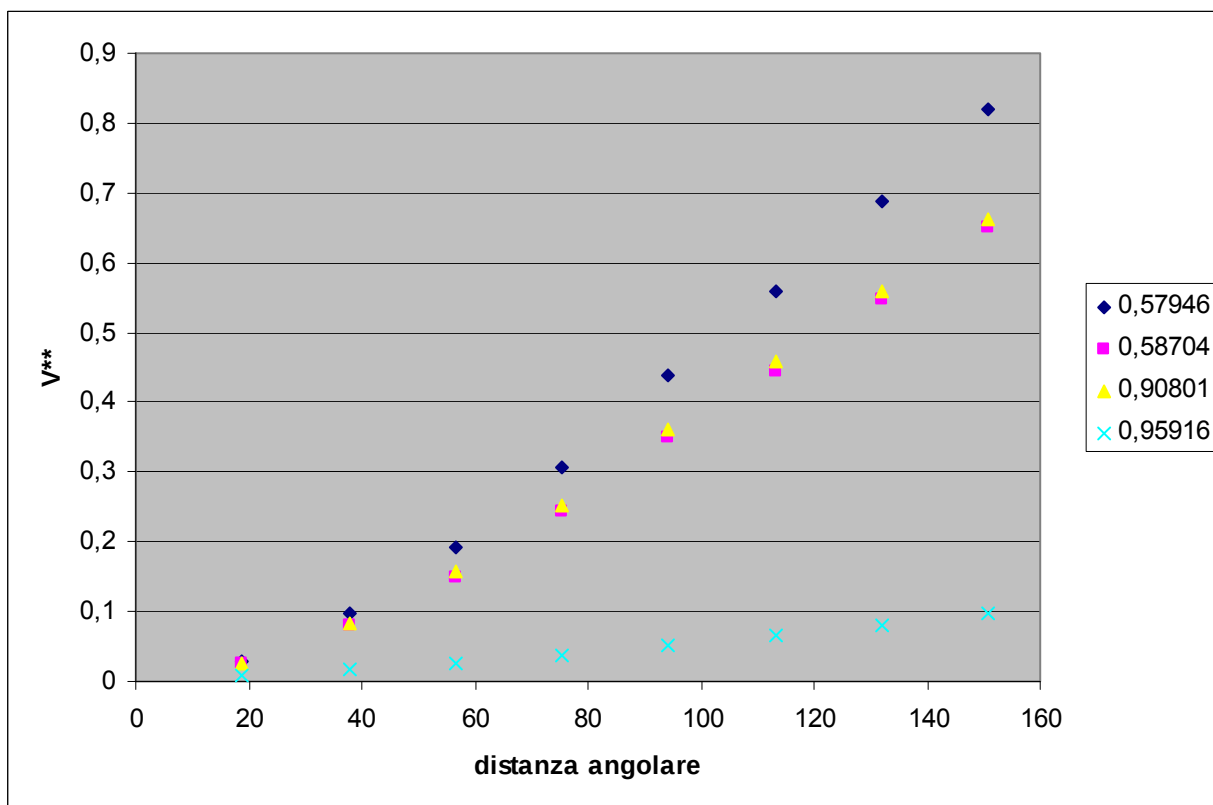


Figura 163: Segnale normalizzato e pesato per le prove gruppo 5

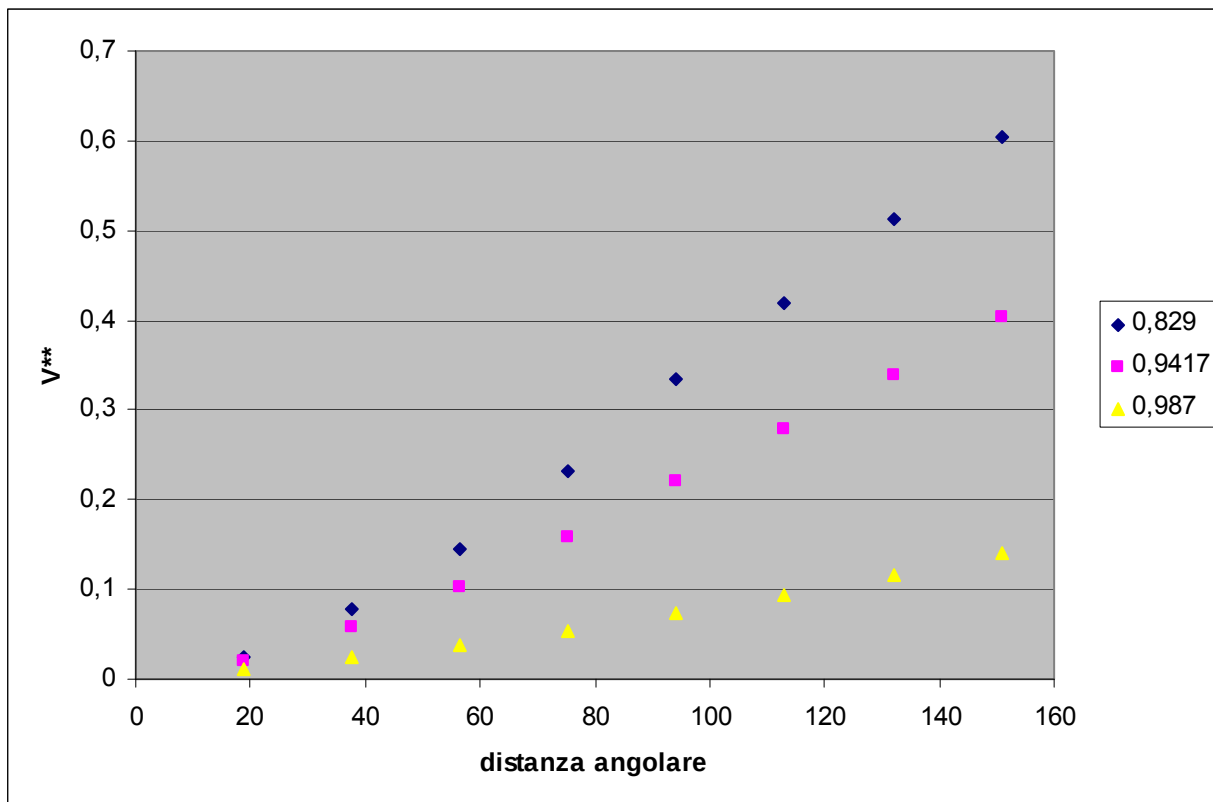


Figura 164: Segnale normalizzato e pesato per le prove gruppo 6

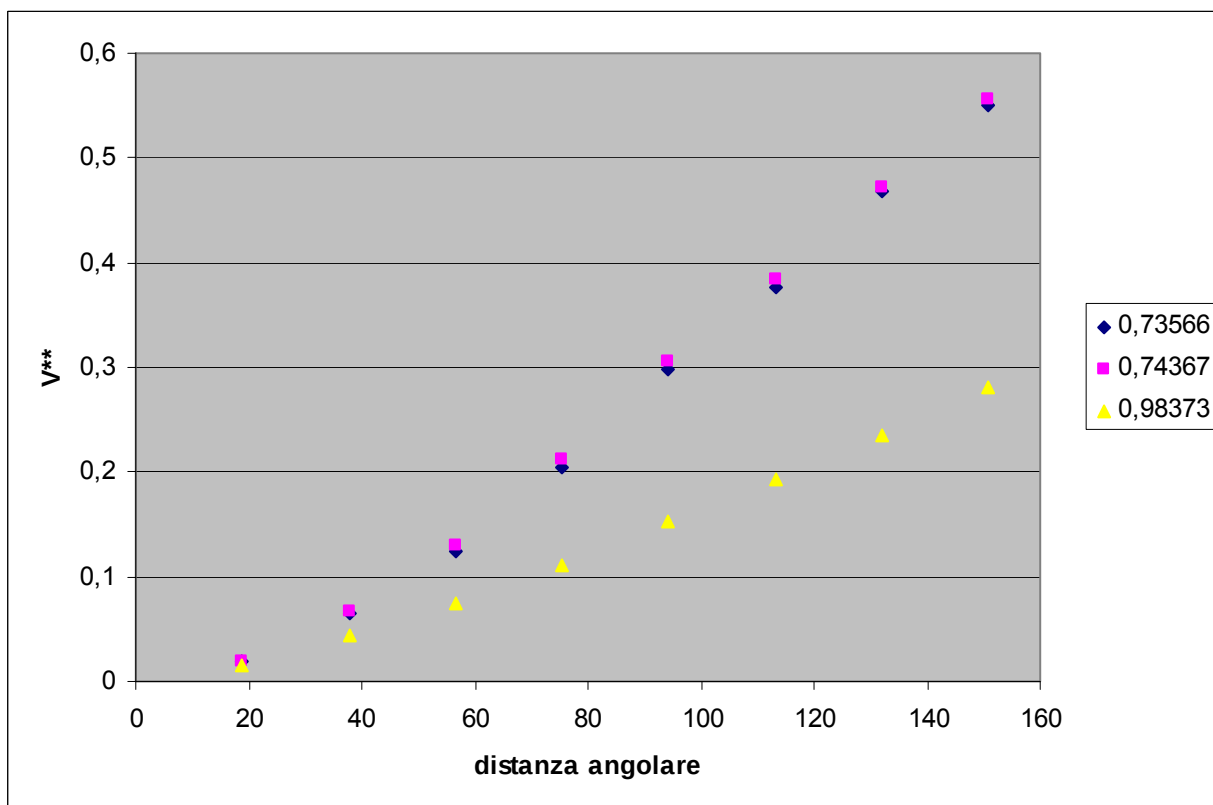


Figura 165: Segnale normalizzato e pesato per le prove gruppo 7

I segnali normalizzati e pesati, in funzione della distanza tra gli elettrodi, hanno un andamento lineare. Per ciascuna prova, le regressioni lineari dei dati sperimentali hanno un coefficiente di correlazione dell'ordine del 99%.

La famiglia di curve così ottenuta, rappresenta un fascio di rette di centro proprio in corrispondenza del segnale ottenuto con elettrodi posti a 22,5° e con pendenza variabile (m) in funzione del grado di vuoto della miscela bifase considerata. In particolare la pendenza delle rette interpolanti i segnali normalizzati aumenta al diminuire del grado di vuoto.

Pertanto è possibile trovare una correlazione sperimentale che lega, per un generico deflusso bifase, i segnali ottenuti dalle varie combinazioni di elettrodi al grado di vuoto volumetrico medio ottenuto utilizzando le valvole rapide.

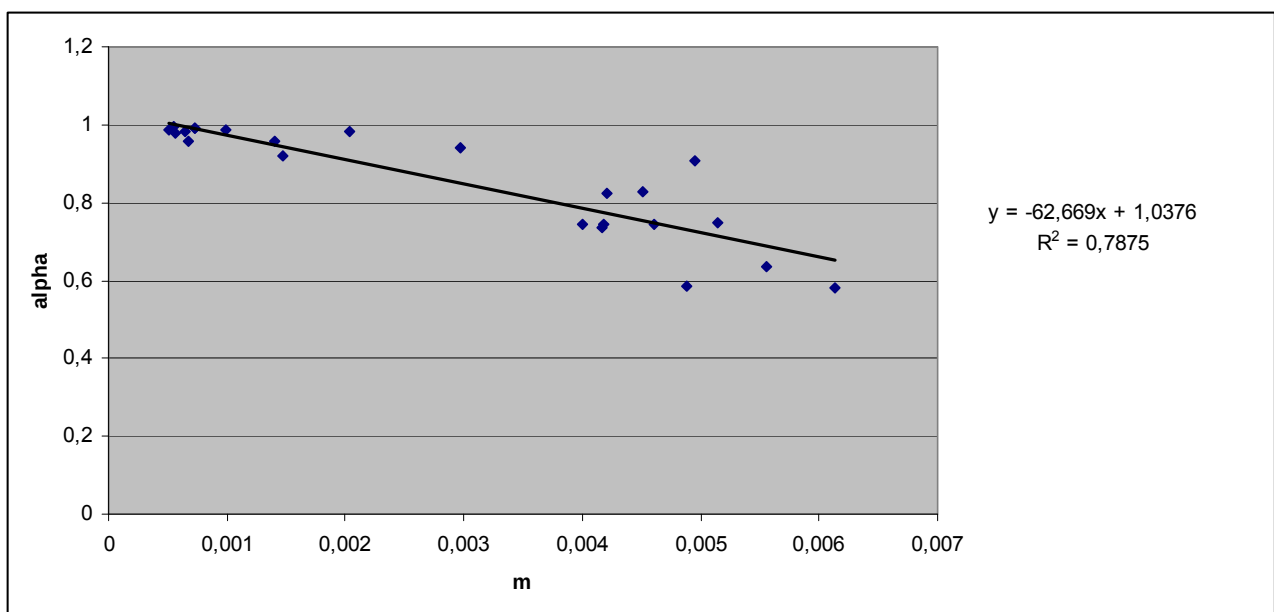


Figura 166: correlazione sperimentale tra grado di vuoto e segnali

I dati sperimentali possono essere interpolati tramite regressione polinomiale con un coefficiente di correlazione di circa 0.79.

Al diminuire del grado di vuoto i segnali presentano una deviazione standard maggiore probabilmente perché, in presenza di un maggior tenore di liquido, si creano dei percorsi preferenziali per le linee di flusso che generano rumore nei segnali.

Un'altra possibile causa di errore potrebbe essere rappresentata dalla presenza di moto a slug che si manifesta nelle prove caratterizzate da bassi gradi di vuoto (vedi figure 40, 44, 86, 102, 106, 110, 148 e 152).

Ad ogni modo, i valori di grado di vuoto stimati tramite la regressione lineare ben riproducono quelli effettivi, soprattutto nella zona di nostro interesse, ovvero quella caratterizzata da alti gradi di vuoto (Tabella 4).

alpha misurato	m	alpha calcolato	errore %
0,57946	0,006139	0,652906056	-11,2491
0,58704	0,004879	0,731833383	-19,785
0,6351	0,005559	0,689217504	-7,85202
0,73566	0,004162	0,776764723	-5,29179
0,74302	0,004613	0,748476814	-0,72906
0,74367	0,004185	0,775345429	-4,08533
0,7455	0,003996	0,787175456	-5,2943
0,74801	0,005143	0,715289764	4,574403
0,8252	0,004208	0,77388585	6,630713
0,829	0,004517	0,754536402	9,868788
0,90801	0,00495	0,727371706	24,83439
0,92135	0,001476	0,945130758	-2,51613
0,9417	0,002966	0,851702448	10,56678
0,9584	0,001397	0,950046267	0,879298
0,95916	0,000672	0,995456077	-3,64618
0,9782	0,000559	1,002578644	-2,43159
0,9824	0,000641	0,99742598	-1,50648
0,98373	0,00203	0,91035528	8,060009
0,9858	0,000514	1,005365806	-1,94614
0,987	0,000984	0,975950079	1,132222
0,9914	0,00073	0,991836315	-0,04399
0,9915	0,000725	0,992145188	-0,06503
0,9938	0,000553	1,0029343	-0,91076

Tabella 4: errore percentuale nella stima del grado di vuoto

Una seconda correlazione può essere ricavata considerando la differente sensibilità della sonda a seconda della coppia di elettrodi tra i quali si effettua la misura.

La figura 167 mostra l'andamento del segnale normalizzato in funzione del grado di vuoto per combinazioni di elettrodi omologhe. Si nota che, a parità di grado di vuoto, il segnale aumenta al crescere dell'angolo compreso tra gli elettrodi.

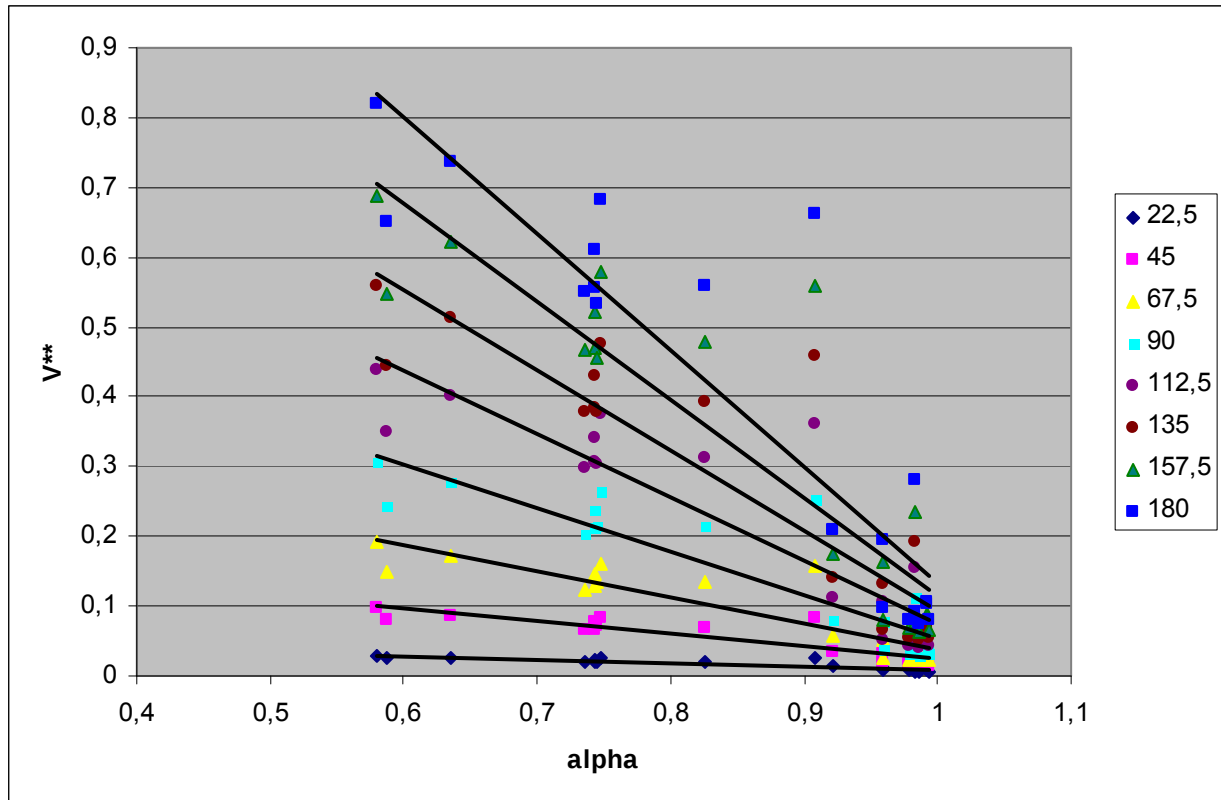


Figura 167: sensibilità della sonda in funzione della coppia di elettrodi

Il grado di vuoto del generico deflusso bifase può essere espresso come combinazione lineare dei segnali ottenuti con coppie di elettrodi poste a diverse distanze.

Considerando per esempio i segnali ottenuti con elettrodi posti alla distanza angolare di 22,5°, 45°, 90° e 180° la correlazione è del tipo:

$$\alpha = Ay_{22,5^\circ} + By_{45^\circ} + Cy_{90^\circ} + Dy_{180^\circ}$$

Per ricavare i quattro coefficienti della correlazione si considerano quattro prove in modo da impostare un sistema di quattro equazioni in quattro incognite.

$y_{22,5^\circ}$, y_{45° , y_{90° e y_{180° rappresentano i valori del grado di vuoto ricavati dalla regressione lineare dei dati sperimentali riportate in figura 168.

	0,74302	0,92135	0,9858	0,9938
22,5	0,0234	0,0133	0,0068	0,0062
45	0,0767	0,0357	0,0152	0,0148
90	0,2369	0,0808	0,0300	0,0312
180	0,6118	0,2081	0,0750	0,0794

Tabella 5: segnali normalizzati

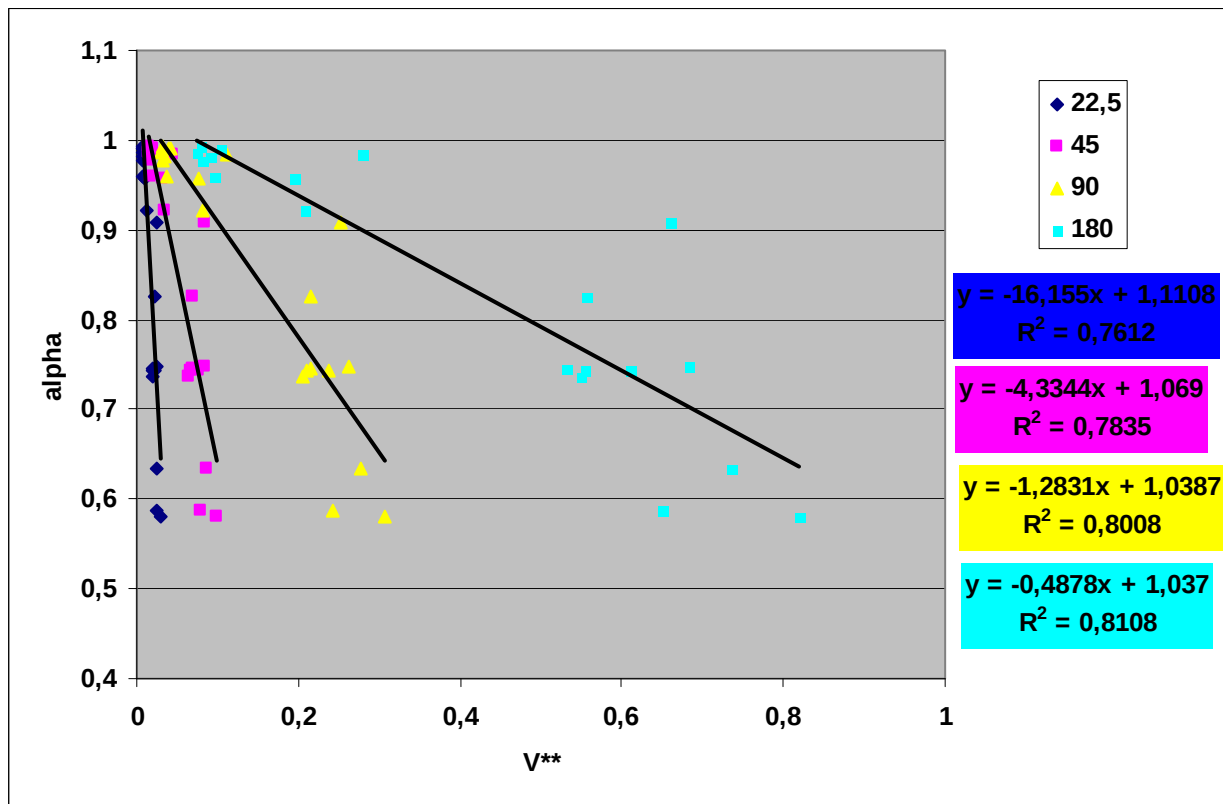


Figura 168: grado di vuoto in funzione del segnale normalizzato

Considerando i segnali normalizzati in funzione dell'angolo tra gli elettrodi interessati nella misura, ottenuti per i deflussi caratterizzati dai gradi di vuoto mostrati in Tabella 5, si ottengono i valori dei coefficienti:

A	B	C	D
2,0238	-3,2238	-3,5911	5,7843

Conseguentemente la funzione di correlazione tra i segnali degli elettrodi e il corrispondente grado di vuoto diventa:

$$\alpha = 2,0238 * y_{22,5^\circ} - 3,2238 * y_{45^\circ} - 3,5911 * y_{90^\circ} + 5,7843 * y_{180^\circ}$$

In questo caso, l'errore percentuale medio tra il grado di vuoto misurato e calcolato (Tabella 6) risulta essere inferiore al 5%. La deviazione standard calcolata risulta circa 7.

alpha misurato	alpha calcolato	errore %
0,57946	0,609326184	4,90151
0,58704	0,664003175	11,59078
0,6351	0,676597016	6,133195
0,73566	0,753509681	2,368872
0,74302	0,742956802	-0,00851
0,74367	0,763842585	2,640935
0,7455	0,861406387	13,45548
0,74801	0,685949579	-9,04737
0,8252	0,770053328	-7,16141
0,90801	0,705695404	-28,6688
0,92135	0,921301309	-0,00529
0,9584	0,953730415	-0,48961
0,95916	0,960081255	0,095956
0,9782	0,981135025	0,299146
0,9824	0,989090598	0,676439
0,98373	0,907506984	-8,39917
0,9858	0,985741037	-0,00598
0,9914	0,980258006	-1,13664
0,9915	0,979762868	-1,19796
0,9938	0,993738613	-0,00618

Tabella 6: errore percentuale nella stima del grado di vuoto

6. CONCLUSIONI

La SIET ha sviluppato un prototipo di sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto di miscele bifase acqua-vapore. La prima fase delle attività, eseguite nel Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2008-09 aveva portato allo sviluppo di un primo prototipo, adatto ad operare a bassa temperatura e pressione. La seconda fase delle attività, descritta nel presente rapporto e relativa al PAR 2011 ha portato allo sviluppo di un prototipo adatto per operare alle condizioni prototipiche delle linee di rottura dell'impianto SPES3 (15 bar, 200°C). Tale prototipo, presenta una architettura hardware e software migliorata rispetto al precedente.

Il tubo in plexiglass del primo prototipo è stato sostituito con un tubo in vetro borosilicato in grado di operare ai suddetti valori di pressione e temperatura. Il numero degli elettrodi è stato raddoppiato; i circuiti stampati dual layer sono stati realizzati da una ditta specializzata nel settore; il software per la gestione dei segnali di input-output è stato ottimizzato.

Il prototipo è stato inserito in un impianto sperimentale di prova già esistente, realizzato per effettuare test su prototipi di barre scaldanti per l'impianto SPES3. Tale circuito è in grado di realizzare le stesse condizioni termoidrauliche di funzionamento delle linee di rottura di SPES3, pertanto è stato possibile alimentare la sezione di prova con flussi acqua/vapore prototipici.

Il circuito sperimentale, dotato di valvole rapide, ha consentito di eseguire misure di grado di vuoto volumetrico medio sui flussi bifase.

Le misure di grado di vuoto sono state correlate ai segnali della sonda capacitiva in modo da ottenere un modello predittivo sperimentale, requisito fondamentale per l'utilizzo della sonda nelle linee di rottura dell'impianto SPES3. La deviazione standard dell'errore di tale modello risulta essere pari a 7.

E' stato considerato anche un modello predittivo più rigoroso per la ricostruzione della mappa tomografica che si basa sulla soluzione di un problema alle derivate parziali, noto in letteratura come CEM (Complete Electrode Model). Tale metodo richiede tuttavia l'elaborazione di metodi numerici per la realizzazione del corrispondente problema discreto, che non sono stati sviluppati in questa attività.

I risultati raggiunti con il modello predittivo sperimentale sono comunque ritenuti molto soddisfacenti.

Il passo successivo di questa attività di ricerca dovrebbe riguardare la verifica sperimentale di uno SPOOL PIECE completo, costituito dalla sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto, da un misuratore di flusso della quantità di moto e da un misuratore di velocità, alle condizioni operative previste in SPES3. Una volta disponibili i dati sperimentali dei tre strumenti, si dovrebbero applicare le equazioni teoriche per la derivazione della portata massica.

7. 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.
- [1] 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] M. De Salve, G. Monni, B. Panella: Caratterizzazione di una sonda Capacitiva in deflusso verticale ascendente aria-acqua, Politecnico di Torino-Dipartimento di Energetica, CERSE-POLITO RL 1260-I/2011, luglio 2011.
- [9] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, C. Randaccio: Electrical capacitance probe characterisation for vertical annular air-water flow investigation, Politecnico di Torino-Dipartimento di Energetica – SIET S.p.A –Piacenza, HEFAT2012, 16-18 July 2012 Malta.
- [10] 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.

- [11] SIET document 01 814 RP 12 Rev.0: Verifica sperimentale di prototipi di elementi scaldanti per l'impianto SPES3 – barre Thermocoax, 15 giugno 2012.

Allegato 1:

**Circuito sperimentale per le prove a caldo sulla sonda capacitiva
(disegno 077.01.02.dwg)**

Allegato 2:

**Schema di flusso impianto prova sonda capacitiva
(disegno 077.03.01.dwg)**

