



Ricerca di Sistema elettrico

Messa a punto di una metodologia deterministica/statistica per l'analisi dei segnali dello spool piece venturi / sonda ad impedenza

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



MESSA A PUNTO DI UNA METODOLOGIA DETERMINISTICA/STATISTICA PER L'ANALISI DEI SEGNALI PER LO
SPOOL PIECE VENTURI/SONDA AD IMPEDENZA

G. MONNI, M.CARAMELLO, M. DE SALVE, B. PANELLA - CIRTEN: CERSE POLITO

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Felice De Rosa, ENEA

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi, CIRTEN



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare



POLITECNICO DI TORINO

Messa a punto di una metodologia deterministica/statistica per l'analisi dei segnali dello spool piece venturi/sonda ad impedenza.

Autori

G. Monni

M. Caramello

M. De Salve

B. Panella

CERSE-POLITO RL 1570/2015

TORINO Agosto 2015

Lavoro svolto in esecuzione dell'Attività LP1. TASK C2.1 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

AdP MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico - Piano Annuale di Realizzazione 2014
Progetto B.3.1 "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Sommario

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

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

Il circuito SPES-3, opera a elevate pressioni e temperature, e con elevate velocità dei fluidi. A causa delle condizioni di funzionamento, nella simulazione della rottura di una tubazione, si instaura un deflusso bifase nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Pertanto, i punti di misura dei circuiti idraulici a monte ed a valle della valvola di rottura sono interessati dalla presenza di fluido bifase. Poiché un unico strumento non è in grado di fornire la portata delle due fasi all'interno del condotto, la messa a punto di uno "Spool Piece" (SP), inteso come un insieme di strumenti connessi in serie, è necessaria per la misura delle portate in presenza di deflusso bifase.

Nel PAR precedente sono stati presentati i risultati della campagna sperimentale effettuata per caratterizzare lo SP costituito da un venturi, tipo corto e sonda ECP installati in una *test section* orizzontale che opera con un deflusso bifase aria-acqua, ad elevati gradi di vuoto. La metodologia sviluppata per analizzare i segnali e modellizzare il funzionamento dello SP sono stati discussi e confrontati con i risultati ottenuti in deflusso verticale anulare.

Nella corrente annualità i risultati disponibili insieme ad una nuova campagna di prova di estensione temporale dei dati acquisiti più lunga sono stati analizzati in termini deterministici (valori medi e loro dipendenza dalle condizioni di prova) e sia stocastici (densità di probabilità).

L'attività svolta è stata oggetto della memoria : venturi flow meter and Electrical Capacitance Probe in a horizontal two-phase flow (autori G. Monni, M. Caramello, M. De Salve, B. Panella) presentata al 33rd UIT Heat Transfer Conference a L'Aquila (22- 23 June 2015) [14]. Si è effettuata una analisi di dettaglio dei dati sperimentali disponibili e il confronto con i nuovi dati ottenuti, dando più importanza all'analisi dei segnali elettrici acquisiti e alla loro dipendenza dalle condizioni di prova. La loro conversione in grandezze fisiche (pressioni differenziali, portate, frazioni di vuoto) è stata considerata essenzialmente al fine di considerare la congruenza fisica delle informazioni estratte dalla procedura di prova. Nel presente documento l'analisi della risposta degli strumenti è stata approfondita tramite lo studio del comportamento dinamico in regime statico (prove di livello) e in deflusso bifase. Il lavoro ha lo scopo di verificare la sensibilità degli strumenti alle variazioni del deflusso bifase e il rapporto effettivo segnale/rumore. E' presentata una nuova metodologia per l'analisi dei segnali della sonda ad impedenza.

SOMMARIO

INDICE DELLE FIGURE	4
INDICE DELLE TABELLE.....	4
1 INTRODUZIONE.....	6
2 CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE.....	8
2.1 Sezione di prova.....	8
2.2 Sistema acquisizione dati	10
3 METODOLOGIA DETERMINISTICO-STATISTICA PER L'ANALISI DEI SEGNALI DELO SPOOL PIECE VFM-ECP	12
3.1 Analisi dei segnali del venturi.....	14
3.2 Analisi dei segnali sonda ECP	21
4 CONCLUSIONI.....	40
BIBLIOGRAFIA	41
ADDENDUM.....	42
APPENDICE: Caratterizzazione degli aspetti stocastici dei segnali associati ai trasduttori di pressione.....	46

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: Circuito con <i>test section</i> orizzontale.....	9
Fig. 2: Foto <i>test section</i> orizzontale	9
Fig. 3: Sistema di scarico del deflusso a valle del tubo di venturi (configurazione orizzontale)	10
Fig. 4: Temperatura lungo la <i>test section</i> in funzione della velocità superficiale dell'aria	13
Fig. 5: Foto venturi reversibile nella configurazione orizzontale	15
Fig. 6 Esempio andamento temporali segnali VFM: S1,S2,S3 ed S4.....	18
Fig. 7 Istogrammi segnali VFM per alcune condizioni sperimentate	19
Fig. 8: Segnali strumenti prove dinamiche: (a) Orifice, (b) Pressure, (c) VFM, (d) Total VFM	20
Fig. 9: Schema sonda Capacitiva SIET	21
Fig. 10: Sonda ECP disposta nella configurazione orizzontale	22
Fig. 11: Posizione elettrodi sonda in configurazione orizzontale	23
Fig. 12: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove statiche – Combinazioni elettrodo 1 - 2-9	24
Fig. 13: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove statiche – Combinazioni elettrodo 9 - 8-1	25
Fig. 14: Segnali medi sonda ECP in funzione dell'angolo fra gli elettrodi – Prove statiche.....	27
Fig. 15 Andamento del livello in funzione del semiangolo bagnato	29
Fig. 16 Andamento della frazione di vuoto in funzione del semi angolo di bagnabilità	30
Fig. 17 $S_{e,r} = f(\theta_{e,r}, \alpha)$ prove statiche.....	30
Fig. 18: Segnali medi sonda ECP $V = f(\theta, h_r)$ – Prove statiche	31
Fig. 19: Mappa della sonda ad impedenza, relativa agli elettrodi esterni per alcuni valori della frazione di vuoto.....	30
Fig. 20: Esempio di profili sperimentali ottenuti con l'eccitazione dell'elettrodo 1 e la lettura degli elettrodi residui (R=2,9).....	31
Fig.21: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove dinamiche – Combinazioni elettrodo 1 - 2,9.....	32
Fig. 22: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove dinamiche – Combinazioni elettrodo 9 – 8,1.....	35
Fig. 23: Segnali medi sonda ECP in funzione dell'angolo fra gli elettrodi – Prove dinamiche	37
Fig. 24: $S_{e,r} = f(\theta_{e,r}, x)$ e $S_{e,r} = f(\theta_{e,r}, \alpha)$ per prove dinamiche	38
Fig. 25: Confronto $S_{e,r} = f(\theta_{e,r}, \alpha)$ tra prove statiche e prove dinamiche.....	38
Fig.26: Segnali generati dalla sonda ad impedenza nelle prove dinamiche quando è eccitato l'elettrodo 1.....	39
Fig.27: Segnali ricostruiti della sonda ad impedenza rispetto a cui valutare le deviazioni.....	39
Fig. AD-1: Confronto tra i dati sperimentali e stimati per la fase gas.....	44
Fig. AD-2: Confronto tra i dati sperimentali e stimati per la fase liquida.....	44
Fig. AD-3: Confronto tra titolo sperimentale e titolo stimato sulla base della minimizzazione dell'errore di previsione delle perdite di carico irreversibili.....	45

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1: Matrice sperimentale prove dinamiche.....	13
Tab. 2: Caratteristiche Orifizio	14
Tab. 3: Caratteristiche VFM	15
Tab. 4: VFM: Prove dinamiche monofase	16
Tab. 5: VFM: Analisi prove dinamiche monofase.....	16

Tab. 6: VFM: prove dinamiche bifase	17
Tab. 7: VFM: Analisi prove dinamiche bifase.....	18
Tab. 8: Parametri statistici Misure Dinamiche.....	21
Tab. 9: Sonda ECP – Parametri statistici Misure statiche I	26
Tab. 10: Sonda ECP – Parametri statistici Misure statiche II.....	26
Tab. 11: Sonda ad impedenza: prove statiche.....	29
Tab. 12: Sonda ad impedenza: condizioni prove statiche.....	29
Tab. 13: Sonda ECP - Parametri statistici Misure Dinamiche I.....	36
Tab. 14: Sonda ECP - Parametri statistici Misure Dinamiche II	36
Tab. AD1: Dati sperimentali di riferimento per l'analisi delle prestazioni dello SP.....	42
Tab. AD2: Grandezze ricostruite come osservate dallo SP con la metodologia deterministica.....	43

1 INTRODUZIONE

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

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

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

Poiché un unico strumento non è in grado di fornire la portata delle due fasi all'interno del condotto, la messa a punto di uno "Spool Piece" (SP), inteso come un insieme di strumenti connessi in serie, è necessaria per la misura delle portate in presenza di deflusso bifase. Uno SP ideale è un condotto costituito da una serie di strumenti, alimentati in ingresso da un deflusso. Lo SP ideale ha una dinamica veloce, e individua un set di equazioni algebriche (in cui il numero di equazioni indipendenti è pari al numero delle grandezze incognite del deflusso) che permettono di descrivere il deflusso noti i segnali elettrici degli strumenti.

La scelta degli strumenti che compongono lo SP è strettamente legata al tipo di deflusso che si intende analizzare, alla velocità delle fasi, alle pressioni e alle temperature [1][2][3].

Lo SP è costituito da una serie di strumenti sensibili alle variazioni delle proprietà fluidodinamiche della miscela.

Oltre che di questi strumenti, lo SP deve essere equipaggiato di trasduttori di pressione assoluta e differenziale, nonché di termocoppie per la misura di temperatura. Queste informazioni risultano di fondamentale importanza per la valutazione delle proprietà delle singole fasi e per l'interpretazione dei segnali degli altri strumenti.

Esistono numerose possibilità di combinare diversi strumenti per formare uno SP; in particolare negli ultimi anni si è cercato di sviluppare uno SP composto da soli due strumenti, con il vantaggio di ridurre le lunghezze richieste e ovviamente i costi e la complessità dell'installazione. Lo svantaggio che si ha nel ridurre il numero degli strumenti è la necessità di sopperire alle informazioni mancanti tramite modelli e correlazioni empiriche o teoriche.

Nel corso delle annualità precedenti sono stati investigati diversi strumenti e accoppiamenti in vari SP:

- SP composto da misuratore turbina e drag disk [4] [5]
- sonda a impedenza a geometria concava, del Wire Mesh Sensor [6][7][8] e di una sonda tomografica capacitiva (Electrical Capacitance Probe – ECP) sviluppata presso la SIET [9][10][11]
- SP composto da venturi, tipo classico, e WMS, installato in un circuito orizzontale [12]
- SP costituito da venturi e sonda ECP in configurazione verticale e in regime di alti gradi di vuoto (deflusso anulare e anulare misto) [13]

- SP costituito da venturi e sonda ECP in configurazione orizzontale e in regime di alti gradi di vuoto (deflusso anulare e anulare misto) [14].

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

La presente attività è relativa alla messa a punto di una metodologia deterministica/statistica per l'analisi dei segnali dello spool piece venturi/sonda capacitiva ECP.

Il lavoro teorico-sperimentale svolto durante il precedente PAR [15] ha portato a dimostrare che l'impiego di un misuratore con tubo di venturi integrato in uno spool con altri dispositivi consente la stima della portata bifase e l'analisi dei regimi di moto del fluido in particolare dei moti quali anulare/disperso (elevata frazione di vuoto) e moto a bolle (bassa frazione di vuoto).

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

La modellazione di uno "spool piece" per la stima dei parametri di un deflusso bifase richiede necessariamente la caratterizzazione sperimentale dei vari regimi (flow patterns) con l'ausilio di modelli fenomenologici e deterministici. Per ridurre e caratterizzare le incertezze associate ai dati sperimentali si è osservata l'esigenza di una analisi dei range di transizione tra i flow patterns con l'ausilio di una metodologia basata sull'analisi statistica dei segnali associati agli strumenti dello spool piece stesso.

Il problema dell'analisi dei segnali acquisiti nel corso del processo di misura è di notevole interesse in quanto, in prospettiva, deve essere una parte integrante dei moderni sistemi di misura delle grandezze sia analogiche che digitali. Il processo di digitalizzazione è nel contesto della catena di misura. Il processo di elaborazione/ interpretazione è da sviluppare e dimostrare fuori linea e successivamente integrarlo in linea.

Nella corrente annualità i risultati disponibili insieme ad una nuova campagna di prova di estensione temporale dei dati acquisiti più lunga sono stati analizzati in termini deterministici (valori medi e loro dipendenza dalle condizioni di prova) e sia stocastici (densità di probabilità).

Le attività svolte hanno comportato una analisi di dettaglio dei dati sperimentali disponibili e il confronto con i nuovi ottenuti. Si è data più importanza all'analisi dei segnali elettrici acquisiti e alla loro dipendenza dalle condizioni di prova. La loro conversione in grandezze fisiche (pressioni differenziali, portate, frazioni di vuoto) è stata considerata essenzialmente al fine di considerare la congruenza fisica delle informazioni estratte dalla procedura di prova. Il comportamento della sonda ad impedenza è stato completato con una serie di prove statiche (acqua stagnante) oltre che con deflussi sviluppati. Si è considerata una potenziale metodologia per l'elaborazione ed interpretazione dei segnali della sonda ad impedenza.

2 CIRCUITO SPERIMENTALE E STRUMENTAZIONE

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

L'alimentazione dell'aria è assicurata da una soffiante (UNIJET500) che fornisce alte portate di fluido a bassa pressione. La portata d'aria, regolata tramite un inverter, è misurata, in uscita dalla soffiante, tramite un orifizio calibrato, avente un'incertezza dichiarata del 2% v.f.s.. Viene inoltre misurata la temperatura del fluido, in modo da correggere il valore di densità in funzione di questa grandezza.

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

La portata di liquido viene misurata mediante un banco di rotametri aventi i seguenti range di misura:

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

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

2.1 Sezione di prova

La sezione di prova costituita da un condotto orizzontale in Plexiglass, avente lunghezza totale di circa 3500 mm, è composta da una sezione d'ingresso ($L = 200$ mm e $D_i = 80$ mm) in cui vengono miscelate le due portate (l'aria entra assialmente nel condotto principale, mentre l'acqua è iniettata in direzione radiale, mediante, dallo SP (venturi+ECP) e dal tratto d'uscita. Lo SP, installato a valle del miscelatore, è composto dalla sonda ($L = 1210$ mm e $D_i = 80$ mm), e dal venturi con i suoi tratti di calma (lunghezza totale pari a 1290 mm).

La *test section*, Fig. 1 e Fig. 2, ha una lunghezza totale di 2500 mm ed è compresa tra due valvole di intercettazione, a chiusura rapida, che consentono la misura del grado di vuoto volumetrico.

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

Le cadute di pressione nel venturi vengono misurate tramite due trasduttori di pressione collegati alle prese relative alla sezione di monte, ristretta e di valle. Vengono quindi misurate oltre che le cadute di pressione tra ingresso e sezione ristretta, anche le cadute di pressione tra ingresso e uscita, in modo da ricavare le cadute di pressione irreversibili dello strumento. Oltre che i segnali degli strumenti dello SP, vengono misurate la pressione assoluta in ingresso alla *test section* e la temperatura del fluido in corrispondenza dello SP.

A valle dello SP, è installato un ulteriore tratto di 500 mm e una vasca che consente la separazione delle due fasi, Fig. 3.

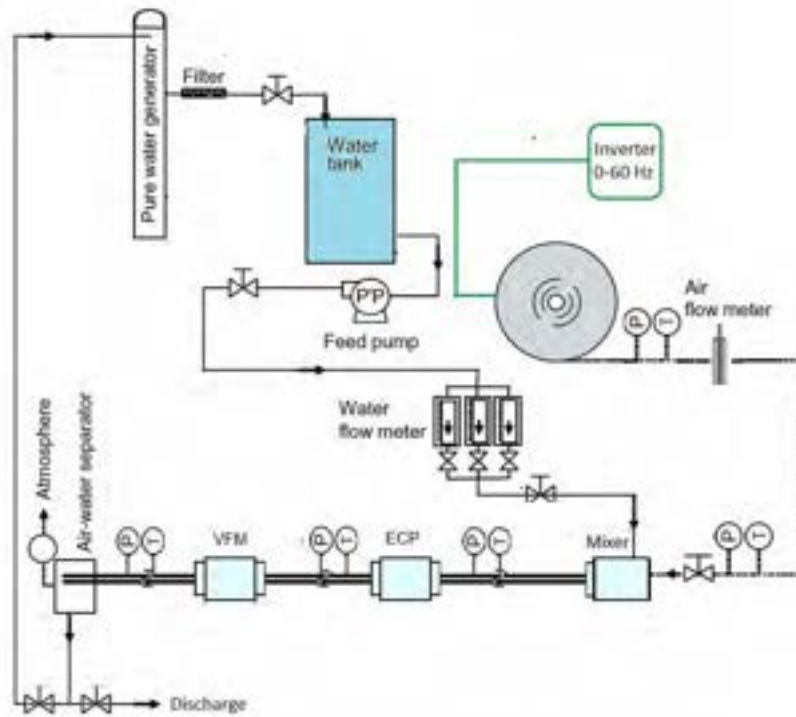


Fig. 1: Circuito con *test section* orizzontale (VFM: venturi; ECP: sonda capacitiva)



Fig. 2: Foto *test section* orizzontale



Fig. 3: Sistema di scarico del deflusso a valle del tubo di venturi (configurazione orizzontale)

2.2 Sistema acquisizione dati

Strumentazione convenzionale

Gli strumenti per la misura convenzionali, utilizzati per la misura delle portate di aria e di acqua imposte, sono rappresentati da un trasduttore di pressione differenziale ed un orifizio e da un rotametro per la portata d'acqua. Si misura o meglio si impone la frequenza di esercizio, con un inverter, alla soffiante. Si misura la pressione assoluta all'ingresso della sonda ad impedenza (segnale S2) e si misurano le temperature dell'aria e della miscela aria acqua lungo il circuito di prova.

Per caratterizzare il comportamento del venturi, vengono acquisiti e analizzati i segnali relativi a:

- la pressione differenziale nel venturi (inlet-throat): segnale S1,
- la cadute di pressione irreversibile del venturi (inlet-outlet): segnale S4.

Trattandosi di pressioni differenziali sono importanti, da un punto di vista sia deterministico che statistico, le variazioni del segnale elettrico rispetto allo zero oltre che la sua linearità o meno rispetto alla pressione differenziale. I segnali generati dai trasduttori (4 – 20 mA) sono convertiti in tensione con l'ausilio di resistenze elettriche di riferimento in prossimità del sistema di acquisizione dati.

I segnali vengono acquisiti, tramite scheda DAQ (NI USB-6218), in ambiente LabView® per 100 s utilizzando una frequenza di acquisizione di 1250 Hz. I segnali vengono quindi elaborati in ambiente Matlab® e Python. Un'analisi degli andamenti temporali dei segnali degli strumenti, viene eseguita al fine di determinare le deviazioni standard dei segnali e la loro variazione rispetto al caso monofase.

I valori di temperatura e la portata della fase liquida sono lette, controllate e trascritte nel corso della prova.

In particolare le temperature sono lette all'inizio e alla fine di ogni fase della prova.

Strumentazione non convenzionale: Sonda ECP

Per quando riguarda la sonda ECP, i segnali inviati e ricevuti dalla scheda di acquisizione (DAQ USB 6343) sono gestiti tramite un programma indipendente, in ambiente LabView®, sincronizzato però con le misure degli altri segnali.

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

Viene registrato in uscita il valore medio RMS relativo ai 2000 *samples* letti per ogni combinazione. Vengono eccitati in sequenza gli elettrodi 1-9 (esterni) e per ogni elettrodo eccitato vengono letti gli output degli elettrodi riceventi esterni. Finita la scansione di lettura dei 9 elettrodi, si passa alla lettura dei 9 segnali relativi alle misure tra elettrodi esterni e elettrodo centrale.

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

Per ogni prova sono stati effettuati 50 cicli di misura.

I segnali vengono quindi elaborati in ambiente Matlab®. Per quel che concerne il modello dello SP, si utilizzano i segnali mediati (media aritmetica) su 100 secondi di acquisizione; un'analisi degli andamenti temporali dei segnali degli strumenti, viene eseguita al fine di determinare le deviazioni standard dei segnali e la loro variazione rispetto al caso monofase e quindi il comportamento dinamico del sensore.

Per l'analisi dei segnali, svolta anche questa in ambiente Python, si è considerato il ciclo di misura della sonda considerando la risposta della sonda in termini di segnali , nel periodo di osservazione e per tutti gli elettrodi esterni , della coppia elettrodo di eccitazione E (mantenuto costante) ed elettrodo di misura o ricevente R (variabile da 1 a 9). L'elettrodo centrale è solo ricevente e quindi nella fase di misura si è variato l'elettrodo di eccitazione esterno (E=1-9) su un settore angolare di 180 gradi.

3 METODOLOGIA DETERMINISTICO-STATISTICA PER L'ANALISI DEI SEGNALI DELLO SPOOL PIECE VFM-ECP

Nel presente capitolo vengono descritte e analizzate le metodologie proposte per l'analisi di segnali degli strumenti costituenti lo SP.

Per la descrizione dettagliata degli strumenti e per la loro modellazione in deflusso bifase si rimanda ai report precedenti.

Lo spool (venturi e sonda ad impedenza), nel suo uso nel circuito di messa a punto, è inteso come generatore di segnali elettrici associati alla fluidodinamica monofase e/o bifase presente nella sezione di prova. La metodologia discussa è da intendersi come procedura da implementare, in prospettiva "on line", all'interno del sistema di acquisizione dati, per l'analisi/interpretazione del processo di misura.

Le condizioni di prova utilizzate per la qualificazione del processo di misura riguardano le portate monofase liquida e gassosa, la frequenza di esercizio della soffiante (grandezze imposte).

Lo spool, nel corso del processo di misura, genera diverse informazioni (in termini di segnali elettrici) associati al venturi e alla sonda ad impedenza.

A) Venturi (VFM)

- pressione differenziale tra monte e sezione della gola ;
- pressione differenziale tra monte e valle del venturi (perdite di carico irreversibile);
- pressione assoluta ingresso spool;

E' misurata ma non acquisita la temperatura del fluido all'ingresso dello spool.

B) Sonda ad impedenza (ECP):

- interrogazione ciclica di dieci coppie di elettrodi (nove esterni ed uno centrale con eccitazione ciclica dei soli nove elettrodi esterni).
- Ogni coppia genera un segnale elettrico S_{ij} che è associato, considerando un sistema di riferimento fisso e per le coppie individuate con i soli elettrodi esterni:
 - alla posizione angolare θ_e dell'elettrodo di eccitazione E_e ;
 - alla posizione angolare θ_r dell'elettrodo ricevitore E_r ;
 - la distanza angolare (in valore assoluto e relativo) tra i due elettrodi θ_{er} .
- Per le coppie individuate tra gli elettrodi esterni e l'elettrodo centrale si generano nove segnali S_{ic} associati all'angolo dell'elettrodo eccitatore E_e .

Il processo di misura è caratterizzato da una frequenza di campionamento delle informazioni f_c relativamente elevata (1250 Hz) su un numero di canali diverso per la sezione venturi (4) e per la sezione sonda (10). Il processo di misura è ripetuto ciclicamente in modo da realizzare per ogni segnale l'osservazione di un segnale avente una base temporale dell'ordine dei 100 -150 secondi. Ogni segnale è quindi caratterizzato da una sequenza numerica di dimensione notevole ed adeguata per una analisi sia statistica che di trend attraverso una suddivisione in sottogruppi.

Per i soli fini di messa a punto della metodologia di analisi/interpretazione dei segnali , le campagne di prova sono caratterizzate dalla misura delle portate delle due fasi liquida e gassosa, dalla

frequenza elettrica di alimentazione della soffiante. In alcune prove si è provveduto a stimare la frazione di vuoto con l'intercettazione della massa d'acqua presente nella sezione di prova e più spesso con la stima del livello dell'acqua intercettata nella sezione di prova.

Nelle prove dinamiche il deflusso viene creato imponendo le portate delle due fasi all'ingresso della *test section*; nelle prove a basse portate di aria ($J_g < 15$ m/s), il deflusso realizzato è stratificato, con portata di liquido trascinta nel core gassoso trascurabile. Mentre a più elevate portate il flow pattern che si instaura è di tipo anulare. L'effetto della gravità sulla distribuzione delle fasi, richiede lo sviluppo di un modello interpretativo adeguato, ma consente anche di sfruttare la diversa risposta degli elettrodi di misura per il riconoscimento del flow pattern e del livello di liquido.

In Tab. 1 è riportata la matrice sperimentale utilizzata per definire la risposta dello SP in condizioni dinamiche.

ID	Prove dinamiche					
	Wg	Wl	x	Wtot	Jg	Jl
RUN 1	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
RUN 2	0,0664	0,0000	1,0000	0,0664	12,9290	0,0000
RUN 3	0,0860	0,0000	1,0000	0,0860	17,3006	0,0000
RUN 4	0,1033	0,0000	1,0000	0,1033	21,6144	0,0000
RUN 5	0,0637	0,0178	0,7819	0,0814	12,4937	0,0035
RUN 6	0,1038	0,0172	0,8578	0,1210	21,2832	0,0034
RUN 7	0,0626	0,0239	0,7241	0,0865	12,5834	0,0048
RUN 8	0,1026	0,0228	0,8185	0,1254	21,3248	0,0045

Tab. 1: Matrice sperimentale prove dinamiche

Il RUN1, che rappresenta in realtà il test statico “tutto aria”, è stato inserito nel contesto delle prove dinamiche per valutare l'effetto della temperatura sui segnali dello SP. Infatti, essendo il circuito aria privo di uno scambiatore di raffreddamento, all'aumentare della portata (ovvero della frequenza di funzionamento dell'inverter che regola la soffiante) la temperatura del fluido aumenta sensibilmente, come riportato in Fig. 4. Il grafico mostra che per le prove monofase aria l'aumento di temperatura si conserva nella test section, mentre nelle prove bifase l'effetto è sensibilmente smorzato dall'iniezione del liquido freddo. Questo effetto deve ovviamente essere tenuto in debita considerazione sia nel calcolo delle densità, sia nella risposta degli strumenti.

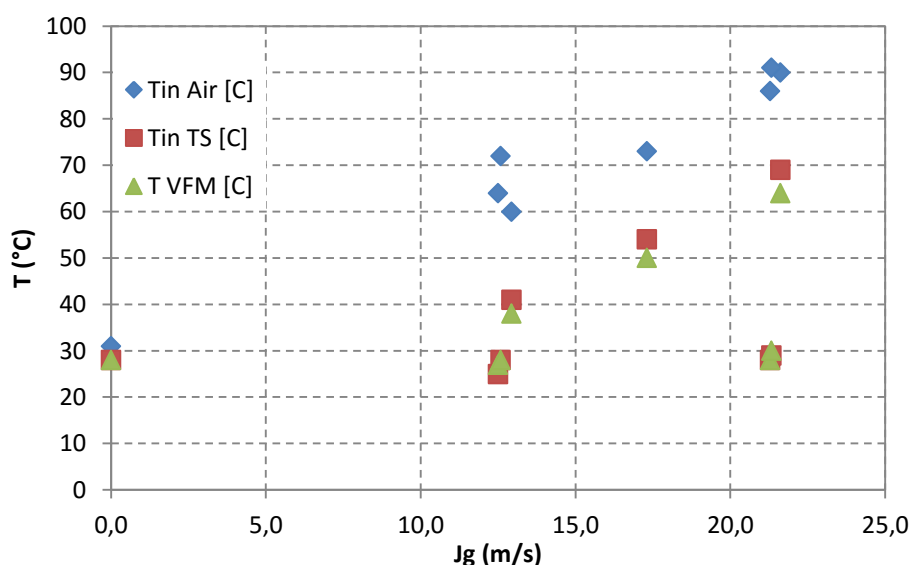


Fig. 4: Temperatura lungo la test section in funzione della velocità superficiale dell'aria

Vengono registrati i valori dei segnali relativi a:

- Orifice (relativo alla portata monofase aria): segnale S3
- Pressione assoluta in ingresso alla *Test Section*: segnale S2
- venturi : segnale S1
- venturi irreversibile : segnale S4
- Sonda ECP : segnali $S_{i,j}$

Dove i è elettrodo di eccitazione, j è l'elettrodo di misura ed inoltre i diverso da j .

3.1 Analisi dei segnali del venturi

Ogni storia temporale, eventualmente suddivisa in sottogruppi è caratterizzabile in termini di:

- Valore medio V_m
- Scarto quadratico medio σ in valore sia assoluto che percentuale
- Valore minimo e massimo V_{min} e V_{max}
- Istogramma normalizzato con area unitaria con un numero di intervalli (bins) assunto pari a dieci.

In presenza di una elevata differenza tra i valori massimo e minimo, l'analisi statistica, grazie all'elevato numero dei punti di misura può essere estesa ad intervalli temporali dell'ordine del secondo e sulla base degli andamenti dei valori medi identificare il trend temporale oltre che lo scarto quadratico medio all'interno di quell'intervallo.

L'osservazione dei segnali in forma grafica consente di caratterizzare la tipologia della prova svolta: *stazionaria, transitoria, ad elevato contenuto di comportamento stocastico*.

In presenza di comportamenti stazionari o con elevato contenuto stocastico la sintesi della prova è presentata in forma tabellare considerando l'intera fase di osservazione.

I valori medi dei segnali ed anche gli scarti quadratici, per gli strumenti tipo i trasduttori di pressione, sono convertiti, sulla base delle curve di calibrazione, in grandezze fisiche per l'elaborazione deterministica.

Sulla base delle caratteristiche del venturi ed anche dell'orifizio utilizzato per la misura della portata dell'aria, si stima la portata apparente vista dal venturi, si considera il rapporto tra le pressioni differenziali perdite di carico irreversibili nel venturi /pressione differenziale monte/sezione minima del venturi; confronto tra le portate associate al venturi e all'orifizio.

L'orifizio è caratterizzato dai seguenti dati:

diametro condotto : D	65.0	mm
sezione condotto A	0.0033185	m ²
diametro sezione minima d	30.193	mm
rapporto diametri d/D	0.4645	
coefficiente efflusso C	0.605	
coefficiente orifizio	0.000444	m ²

Tab. 2: Caratteristiche orifizio

Il venturi è caratterizzato dai seguenti dati:

diametro condotto : D	80.0	mm
sezione condotto A	0.00502654824574	m ²
diametro sezione minima d	40.0	mm
sezione minima Ad	0.001257	m ²
rapporto diametri d/D	0.5	
Coefficiente efflusso	0.985	
Coefficiente contrazione Cd	0.001298	m ²
coefficiente venturi	0.001278	m ²

Tab. 3: Caratteristiche venturi

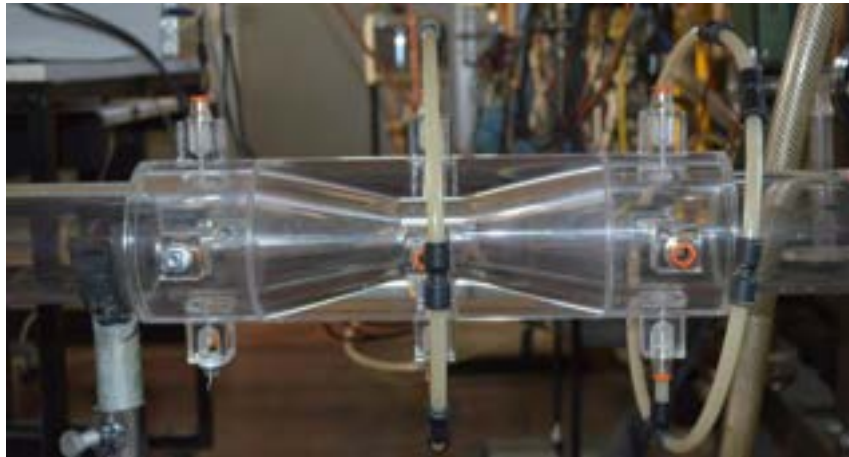


Fig. 5: Foto venturi reversibile nella configurazione orizzontale

Per il venturi e per l'orifizio i modelli di riferimento per la stima della portata (in monofase) sono semplicemente del tipo:

$$W_v = C_v \sqrt{2\rho_v \Delta p_v} \quad (1)$$

$$W_o = C_o \sqrt{2\rho_o \Delta p_o} \quad (2)$$

Nell'ipotesi che i due strumenti siano attraversati dalla stessa portata in massa si ha il rapporto:

$$\frac{C_v}{C_o} = \sqrt{\frac{\rho_o \Delta p_o}{\rho_v \Delta p_v}} \quad (3)$$

In un intervallo di funzionamento ideale con del venturi e dell'orifizio questo rapporto è stimato pari circa 0.34. Si ravvisa l'opportunità di una attenta campagna di prova per caratterizzare, in diversi intervalli di esercizio, per la coppia orifizio venturi il rapporto C_v/C_o in termini di rapporti delle pressioni differenziali e di rapporti delle temperature.

Interessante è il rapporto tra le perdite di carico irreversibili e quelle reversibili:

$$R = \frac{\Delta p_{v,I}}{\Delta p_v} \quad (4)$$

Utilizzando le informazione del solo venturi, in condizioni monofase o più in generale di fluido omogeneo si ha:

$$\Delta p_v = \frac{1}{2\rho_v} \left(\frac{W_v}{C_v} \right)^2 \quad (5)$$

Per quanto riguarda le perdite di carico irreversibili i dati possono essere espressi nella forma:

$$\Delta p_{v,I} = \frac{k}{2\rho_v} (W_v)^2 \quad (6)$$

Le condizioni di prova sperimentate in monofase sono:

ID	Wa kg/s	Wl kg/s	Wt kg/s	x	Jl m/s	Jg m/s
RUN2	0.0666	0.0	0.0666	1.0	0.0	12.1137255695
RUN3	0.0862	0.0	0.0862	1.0	0.0	16.0655839221
RUN4	0.1036	0.0	0.1036	1.0	0.0	19.8145814314

Tab. 4: VFM: Prove dinamiche monofase

Le velocità superficiali sono tra i 12 m/s e i 19 m/s.

In condizioni monofase si sono osservati i risultati di tabella:

ID	RV=DPVI/DPV	RVO=DPV/DPO	RIO=DPVI/DPO	PA Bar
RUN2 : f=30 Hz	0.34	0.132	0.045	0.977
RUN3 f=40 Hz	0.39	0.135	0.053	0.983
RUN4 f=50 Hz	0.41	0.140	0.057	0.991

Tab. 5: VFM: Analisi prove dinamiche monofase

Il rapporto RV aumenta con la portata e nell'intervallo sperimentato è compreso tra 0.34 e 0.4

Il rapporto tra le due pressioni differenziali, in regime di deflusso monofase è una funzione dei coefficienti k e C_v . Quindi il rapporto è un parametro caratteristico R^* leggermente dipendente dal numero di Reynolds.

In conclusione il rapporto:

$$R = \frac{\Delta p_{v,I}}{\Delta p_v}$$

in regime monofase, è un parametro R^* costante o più in generale funzione della portata monofase del fluido di riferimento (per esempio aria nel caso di deflussi ad alto grado di vuoto)

L'impiego sistematico della relazione:

$$W_v = C_v \sqrt{2\rho_v \Delta p_v}$$

con la densità dell'aria consente di definire una portata apparente. Qualora $R = R^*$ con una definita tolleranza si può affermare che il deflusso è monofase aria.

Il rapporto $\Psi = R/R^*$ consente di definire un moltiplicatore bifase funzione del titolo x :

$$x = \frac{W_g}{(W_l + W_l)} \quad (7)$$

$$\Psi = \frac{R_{TP}}{R_m} = f(x, W_g) \quad (8)$$

Per $R \gg R^* = 0.4$ si tratta di un deflusso bifase in cui il titolo x segue considerando i moltiplicatori bifase

$$\Delta p_{TP} = \Delta p_g \cdot \phi_g^2 \quad (9)$$

$$\frac{\left(-\frac{dp}{dz}\right)_{TP}}{\left(-\frac{dp}{dz}\right)_g} = \phi_g^2 \quad (10)$$

$$W_{tot} = \frac{C_{TP} \cdot F_a \cdot Y \cdot A_2}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \cdot \sqrt{2\rho_{TP}\Delta p_{TP}} \quad (11)$$

$$\Delta p_{irr} = k_1 \cdot (\rho_g J_g^{k_2}) \cdot (J_l/J_g)^{k_3} + k_4 \quad (12)$$

dove J_g e J_l sono le velocità superficiali di aria e acqua rispettivamente. Le costanti sono state ricavate da best-fit dei dati sperimentali: $k_1 = 0.2096$, $k_2 = 2$, $k_3 = 0.13$, $k_4 = -2.9786$.

Ed un processo iterativo che permette di stimare le portate delle due fasi.

ID	Wa kg/s	Wl kg/s	Wt kg/s	x	Jl m/s	Jg m/s
RUN5	0.066	0.0178	0.0814	0.7817	0.00354	11.12
RUN6	0.104	0.0172	0.1210	0.8576	0.00343	17.84
RUN7	0.063	0.0239	0.0865	0.7239	0.00475	10.98
RUN8	0.093	0.0228	0.1154	0.8027	0.00453	16.12

Tab. 6: Venturi: prove dinamiche bifase

ID	$RV=DPVI/DPV$	$RVO=DPV/DPO$	$RIO=DPVI/DPO$	PA Bar
RUN5: f=30 Hz	0.610	0.149	0.091	0.981
RUN6 f=50 Hz	0.649	0.146	0.095	0.999
RUN7 f=30 Hz	0.622	0.151	0.094	0.981
RUN8 f=50 Hz	0.623	0.146	0.091	0.995

Tab. 7: Venturi: Analisi prove dinamiche bifase

I trasduttori di pressione utilizzati sono tutti con uscita 4-20 mA. Per l'analisi del comportamento statistico del segnale è opportuno osservare che l'informazione fisica sui fenomeni fluidodinamici è contenuta nella variazione del segnale rispetto al segnale elettrico di zero (sensibilità del processo di misura). Tuttavia si ritiene utile analizzare in termini statici l'intero segnale in modo da caratterizzare lo stesso in termini di rumore presente sia sullo zero che nel contenuto informativo. Un esempio di analisi delle risposte del venturi, per una tipica prova monofase è riportato in Fig. 6.

I Segnali S1,S2,S3 ed S4 si riferiscono alle seguenti grandezze

- S1 pressione differenziale venturi
- S2, pressione assoluta ingresso sezione di prova
- S3pressione differenziale orifizio
- S4 pressione differenziale monte/ valle venturi

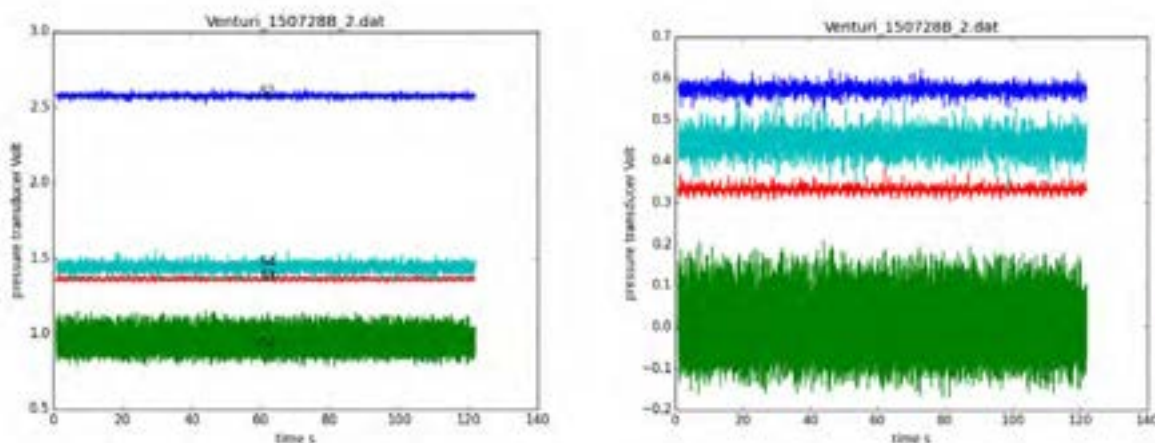


Fig. 6 Esempio andamento temporali segnali venturi: S1,S2,S3 e S4

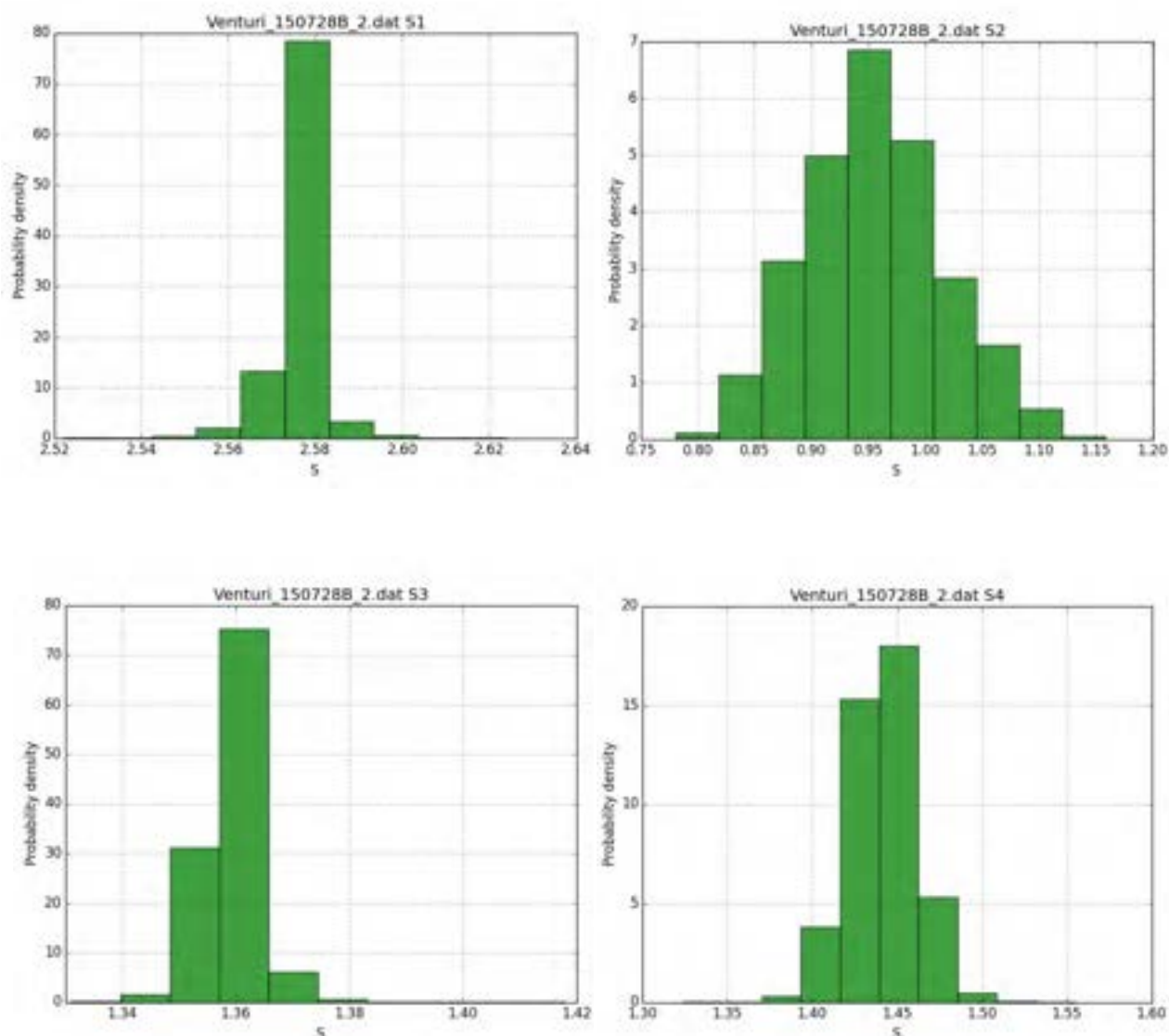


Fig. 7 Istogrammi segnali venturi per alcune condizioni sperimentate

In appendice vengono riportati i grafici relativi a ogni test sperimentale effettuato.

In Fig. 8 sono riportati gli andamenti temporali dei segnali del VFM, dell'orifizio e del trasduttore di pressione assoluta. Si evince una buona sensibilità della misura delle cadute di pressione irreversibili anche a piccole variazioni di portata liquida. Il segnale classico del venturi, mostra invece una buona sensibilità alla variazione della portata di aria, e una bassa sensibilità alla variazione della portata di liquido, molto piccola nelle prove analizzate. Questo effetto era già stato evidenziato anche nelle prove precedenti [15] dove il deflusso analizzato variava da stratificato a anulare in un più ampio spettro di portate delle due fasi.

Occorre sottolineare, che i test eseguiti confermano, anche nel caso bifase, i risultati ottenuti nella campagna sperimentale precedente, evidenziando la buona ripetibilità dei segnali.

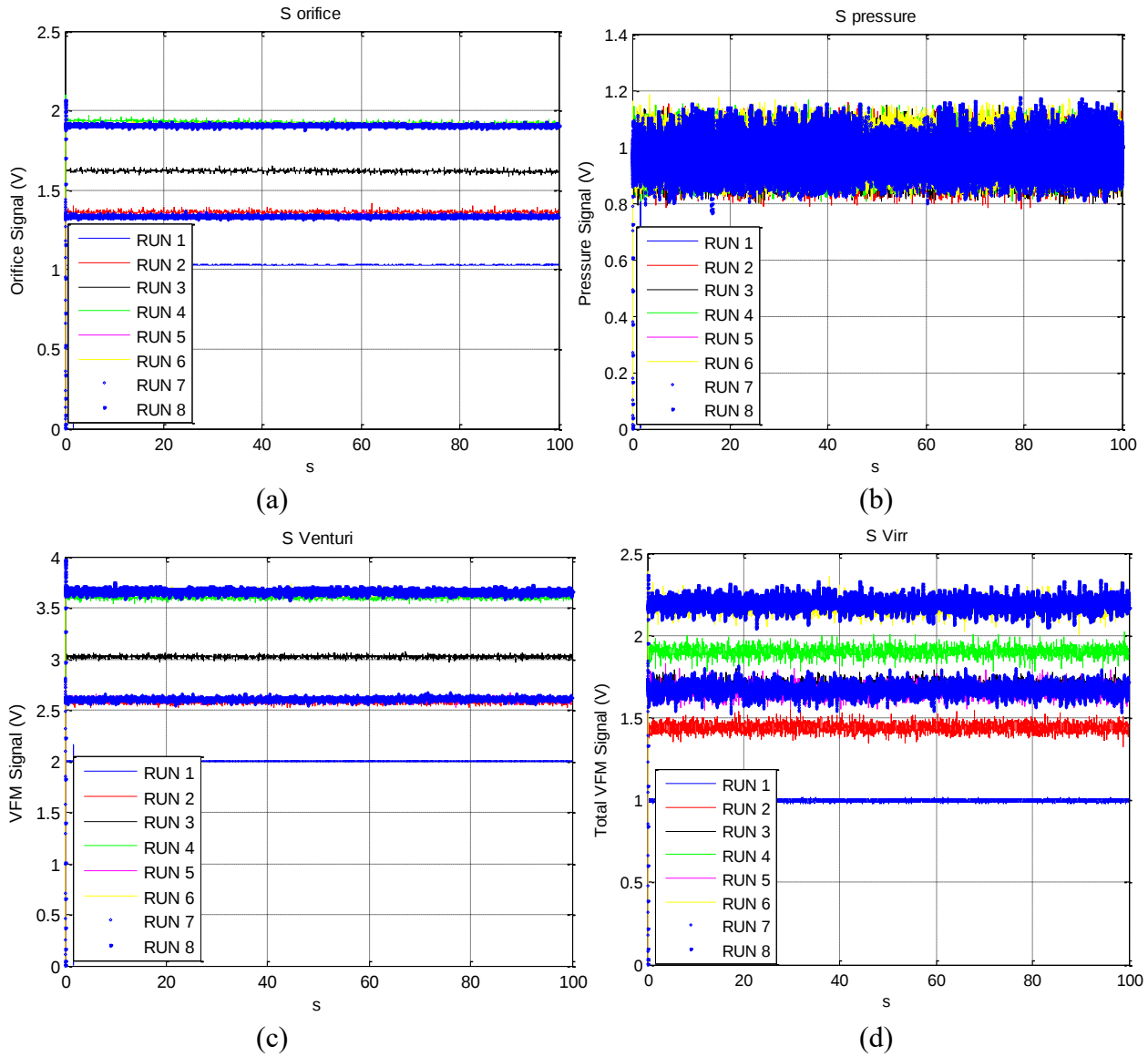


Fig. 8: Segnali strumenti prove dinamiche: (a) Orifizio, (b) Pressione, (c) Venturi (VFM), (d) Total Venturi (VFM)

In Tab. 8 sono riportati i dati statistici delle prove in esame.

Per evidenziare le proprietà statistiche dei segnali, questi sono stati analizzati come:

$$V^* = V - V_0$$

Rispetto alle prove statiche si evidenzia un valore sensibilmente più basso di Signal to Noise ratio. Questo suggerisce in realtà la sensibilità degli strumenti alle fluttuazioni del deflusso bifase, sebbene in presenza di deflusso anulare la distribuzione del segnale rimanga gaussiana come evidenziato dal rapporto tra media e mediana.

Mean signal								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
Venturi	0,0007	0,5752	1,0220	1,5990	0,6013	1,6518	0,6042	1,6589
Orifice	0,0293	0,3592	0,6185	0,9245	0,3333	0,9145	0,3304	0,9065
Pressure	0,9486	0,9555	0,9612	0,9685	0,9592	0,9767	0,9594	0,9777
V irr	0,0036	0,4417	0,6920	0,9027	0,6607	1,1737	0,6699	1,1950
Median signal								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
Venturi	0,0010	0,5760	1,0230	1,6000	0,6010	1,6520	0,6040	1,6590
Orifice	0,0290	0,3590	0,6190	0,9230	0,3330	0,9150	0,3300	0,9070
Pressure	0,9480	0,9540	0,9590	0,9670	0,9590	0,9740	0,9590	0,9770
V irr	0,0030	0,4420	0,6920	0,9030	0,6600	1,1740	0,6690	1,1950
Standard deviation								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
Venturi	3,77E-04	3,39E-04	4,65E-04	6,55E-04	4,07E-04	7,91E-04	4,61E-04	8,64E-04
Orifice	9,98E-05	1,06E-04	1,42E-04	2,25E-04	9,29E-05	1,80E-04	9,23E-05	1,78E-04
Pressure	6,05E-04	3,72E-03	4,20E-03	3,28E-03	1,11E-03	4,17E-03	1,66E-03	2,40E-03
V irr	1,23E-04	4,77E-04	6,22E-04	6,35E-04	8,03E-04	8,87E-04	9,51E-04	9,67E-04
mean-median ratio								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
Venturi	0,717	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
Orifice	1,010	1,001	0,999	1,002	1,001	0,999	1,001	0,999
Pressure	1,001	1,002	1,002	1,002	1,000	1,003	1,000	1,001
V irr	1,193	0,999	1,000	1,000	1,001	1,000	1,001	1,000
signal to noise ratio								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
Venturi	1,90E+00	1,69E+03	2,20E+03	2,44E+03	1,48E+03	2,09E+03	1,31E+03	1,92E+03
Orifice	2,94E+02	3,38E+03	4,35E+03	4,11E+03	3,59E+03	5,09E+03	3,58E+03	5,09E+03
Pressure	1,57E+03	2,57E+02	2,29E+02	2,95E+02	8,64E+02	2,34E+02	5,76E+02	4,08E+02
V irr	2,92E+01	9,26E+02	1,11E+03	1,42E+03	8,22E+02	1,32E+03	7,04E+02	1,24E+03

Tab. 8: Parametri statistici Misure Dinamiche (V*)

3.2 Analisi dei segnali sonda ECP

La sonda capacitiva (ECP) è composta da una serie di elettrodi (9) disposti lungo le generatrici di un tubo cilindrico e da un elettrodo centrale [9].

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

La distanza angolare tra gli elettrodi esterni adiacenti è di 22, 5° (Fig. 9) che corrisponde a una corda esterna e interna al condotto rispettivamente di 17.56 mm e 15.6 mm, essendo il diametro interno del condotto pari a 80 mm e il diametro esterno pari a 90 mm.



Fig. 9: Schema sonda Capacitiva SIET

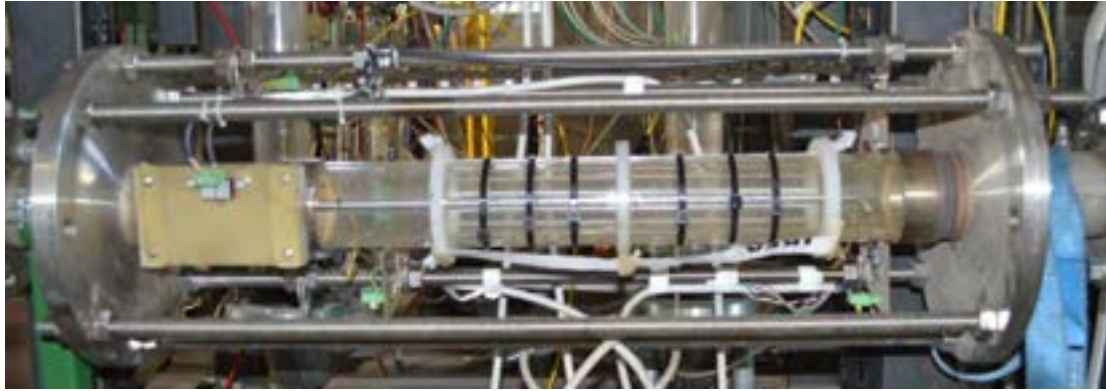


Fig. 10: Sonda ECP disposta nella configurazione orizzontale

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

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

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

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

Nelle prove in regime statico, il circuito è configurato con le valvole di isolamento chiuse, in modo tale da imporre un livello di liquido noto nella *test section*. In particolare il livello è caratterizzato dal ricoprimento completo di un definito numero di elettrodi. La sonda ad impedenza è posizionata orizzontalmente con gli elettrodi disposti come in Fig. 11. Il condotto orizzontale è stato riempito gradualmente con acqua demineralizzata fino a coprire i vari elettrodi, realizzando in tal modo un regime stratificato, tipico dei deflussi orizzontali.

Le analisi effettuate sui segnali della sonda ECP riguardano in particolare i segnali misurati per l'elettrodo 1 - elettrodo eccitatore (posizione superiore del condotto) Fig. 11, e per l'elettrodo 9, posizionato nella parte inferiore del condotto.

Nelle prove statiche il condotto orizzontale veniva riempito gradualmente con acqua demineralizzata fino a coprire i vari elettrodi, realizzando in tal modo un regime stratificato, tipico dei deflussi orizzontali.

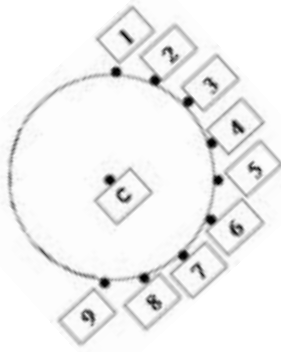
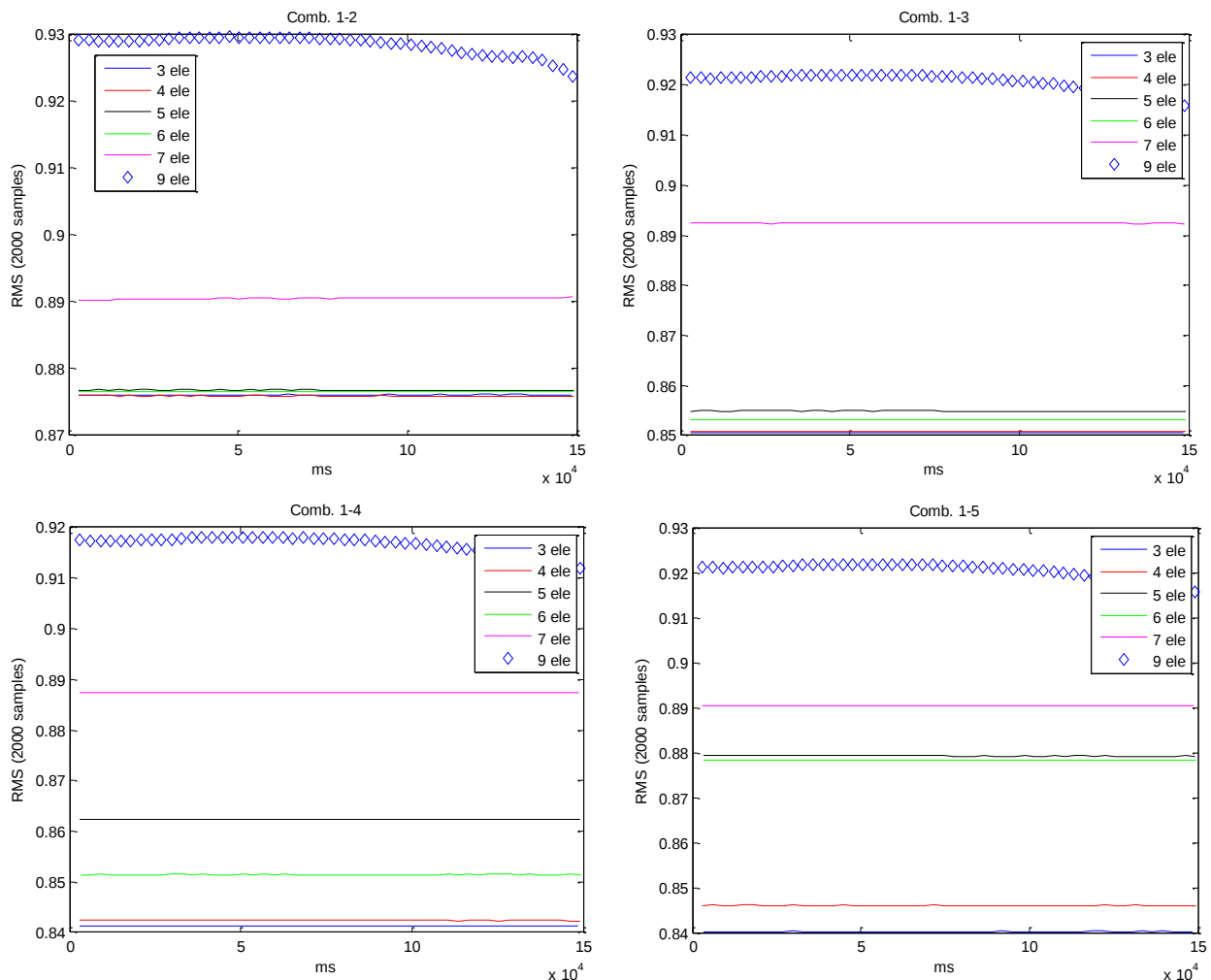


Fig. 11: Posizione elettrodi sonda in configurazione orizzontale

In Fig. 12 è riportato l’andamento temporale dei segnali con elettrodo 1 quale elettrodo eccitatore, per i vari livelli sperimentati. In legenda la dicitura “3 ele”-“9 ele” significa che il livello dell’acqua copriva rispettivamente 3 elettrodi (partendo dal fondo del condotto), ovvero gli elettrodi da 9 a 7 di Fig. 11; e 9 elettrodi, ovvero condotto completamente pieno d’acqua.

Dai grafici di Fig. 12 si evince che quando il condotto è completamente riempito di liquido si ha una leggera deriva del segnale probabilmente causata dall’instaurarsi di correnti parassite non debitamente annullate da schermi adeguati.

In Fig. 13 è riportato l’andamento temporale dei segnali con elettrodo 9 quale elettrodo eccitatore. Anche per queste misure si nota la deriva del segnale in regime “tutto liquido”.



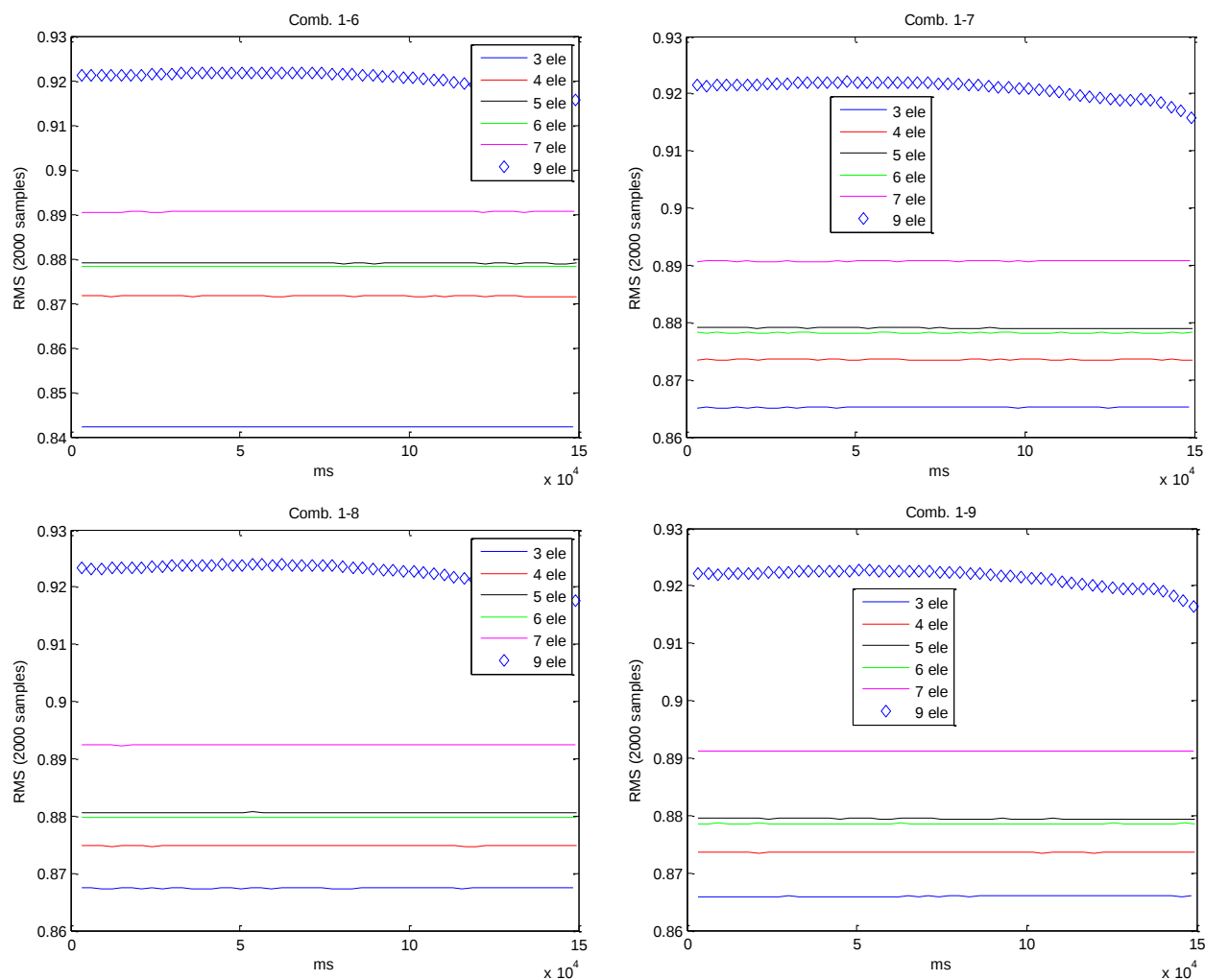
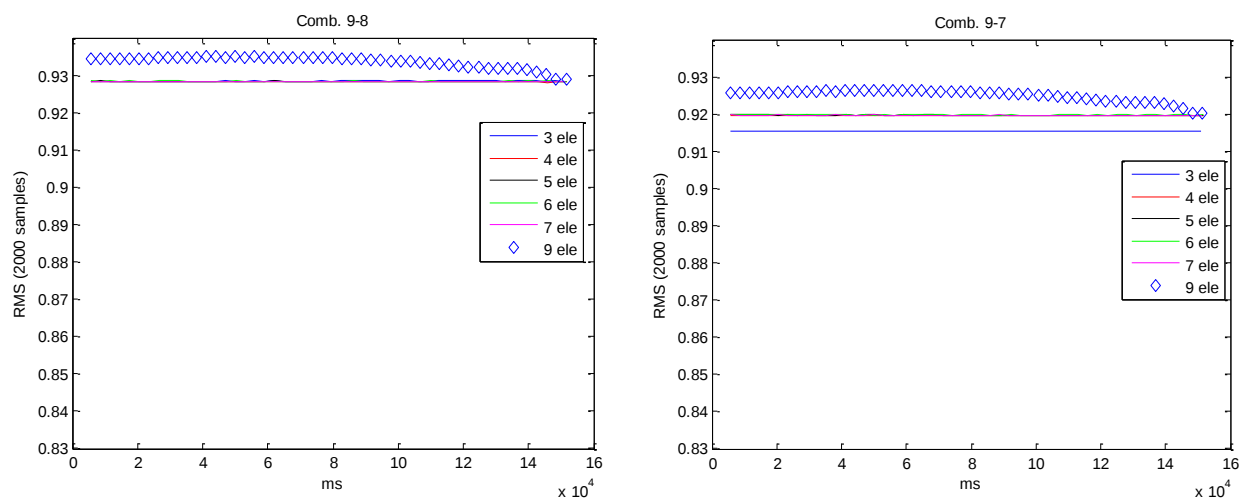


Fig. 12: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove statiche – Combinazioni elettrodo 1 – 2,9



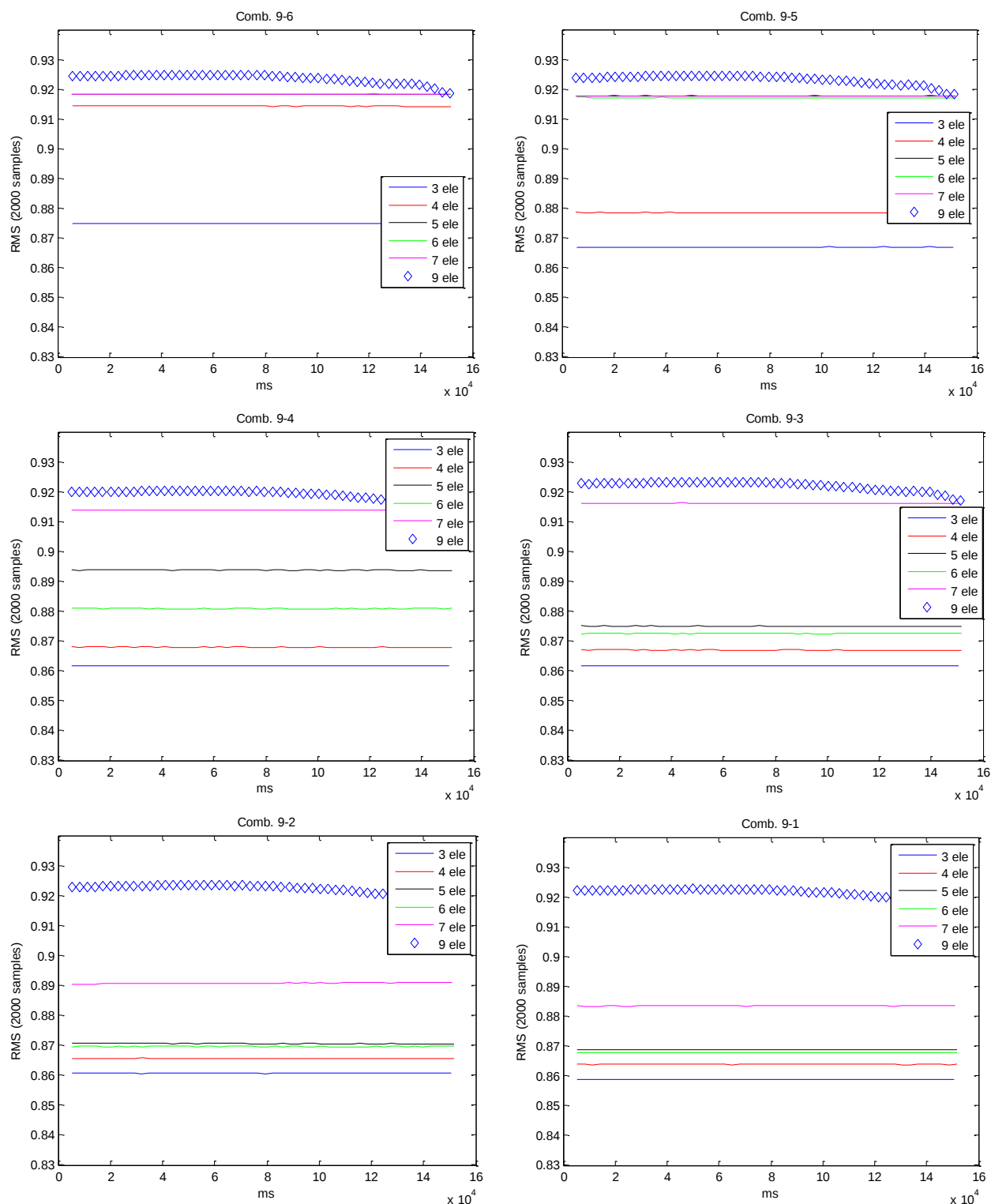


Fig. 13: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove statiche – Combinazioni elettrodo 9 – 8,1

I segnali registrati sono stati utilizzati per ricavare gli indicatori statistici classici: media, mediana e *standard deviation*, come riportato in Tab. 9. L'analisi di questi parametri ha messo in evidenza una buona stabilità del segnale, un ottimo valore di *Signal to Noise ratio*, come riportato in Tab. 10. In Tab. 10 è inoltre riportato il rapporto tra media e mediana: un valore pari o prossimo a 1 evidenzia una distribuzione gaussiana del segnale.

Mean electrode 1							Mean electrode 9						
	3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.		3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.
1-2	0,8761	0,8759	0,8768	0,8766	0,8905	0,9285	9-1	0,8589	0,8638	0,8688	0,8678	0,8834	0,9214
1-3	0,8506	0,8508	0,8549	0,8532	0,8924	0,9208	9-2	0,8606	0,8656	0,8705	0,8696	0,8908	0,9229
1-4	0,8413	0,8424	0,8624	0,8514	0,8874	0,9168	9-3	0,8616	0,8670	0,8750	0,8725	0,9161	0,9227
1-5	0,8402	0,8460	0,8792	0,8783	0,8904	0,9205	9-4	0,8617	0,8679	0,8937	0,8808	0,9137	0,9198
1-6	0,8423	0,8716	0,8790	0,8782	0,8906	0,9206	9-5	0,8669	0,8785	0,9176	0,9171	0,9178	0,9231
1-7	0,8652	0,8735	0,8790	0,8782	0,8907	0,9208	9-6	0,8749	0,9143	0,9183	0,9184	0,9183	0,9236
1-8	0,8674	0,8748	0,8806	0,8798	0,8924	0,9226	9-7	0,9154	0,9196	0,9197	0,9198	0,9197	0,9250
1-9	0,8659	0,8736	0,8794	0,8786	0,8912	0,9214	9-8	0,9284	0,9282	0,9283	0,9284	0,9283	0,9336
Median electrode 1							Median electrode 9						
	3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.		3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.
1-2	0,8761	0,8759	0,8768	0,8766	0,8906	0,9291	9-1	0,8589	0,8638	0,8687	0,8678	0,8834	0,9221
1-3	0,8506	0,8508	0,8549	0,8532	0,8924	0,9214	9-2	0,8606	0,8656	0,8705	0,8696	0,8908	0,9229
1-4	0,8413	0,8424	0,8624	0,8514	0,8874	0,9174	9-3	0,8616	0,8670	0,8750	0,8725	0,9161	0,9227
1-5	0,8402	0,8460	0,8792	0,8783	0,8904	0,9211	9-4	0,8617	0,8679	0,8937	0,8808	0,9137	0,9198
1-6	0,8423	0,8716	0,8790	0,8782	0,8906	0,9212	9-5	0,8669	0,8785	0,9177	0,9171	0,9178	0,9239
1-7	0,8651	0,8735	0,8790	0,8782	0,8907	0,9214	9-6	0,8749	0,9143	0,9183	0,9184	0,9183	0,9244
1-8	0,8674	0,8748	0,8806	0,8798	0,8924	0,9233	9-7	0,9154	0,9196	0,9197	0,9197	0,9197	0,9257
1-9	0,8659	0,8736	0,8794	0,8786	0,8912	0,9221	9-8	0,9284	0,9282	0,9283	0,9284	0,9283	0,9344
Var electrode 1							Var electrode 9						
	3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.		3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.
1-2	1,35E-09	1,91E-09	2,24E-09	9,24E-10	1,13E-08	2,04E-06	9-1	2,00E-09	1,62E-09	2,92E-09	9,71E-10	1,99E-09	2,43E-06
1-3	1,51E-09	1,53E-09	2,47E-09	1,29E-09	1,48E-09	2,16E-06	9-2	9,16E-10	1,92E-09	2,29E-09	1,53E-09	1,89E-08	2,46E-06
1-4	1,16E-09	2,07E-09	1,45E-09	1,22E-09	1,16E-09	2,12E-06	9-3	1,65E-09	1,80E-09	2,88E-09	1,39E-09	1,03E-09	2,54E-06
1-5	1,83E-09	1,79E-09	2,22E-09	1,42E-09	1,56E-09	2,19E-06	9-4	1,65E-09	1,53E-09	1,28E-09	1,30E-09	1,27E-09	2,48E-06
1-6	1,05E-09	1,89E-09	2,31E-09	1,47E-09	1,54E-09	2,17E-06	9-5	2,14E-09	2,50E-09	2,99E-09	1,35E-09	1,28E-09	2,53E-06
1-7	1,61E-09	1,82E-09	2,31E-09	1,49E-09	1,46E-09	2,18E-06	9-6	2,17E-09	2,74E-09	2,13E-09	1,32E-09	1,48E-09	2,49E-06
1-8	1,97E-09	1,29E-09	2,06E-09	1,44E-09	1,40E-09	2,21E-06	9-7	1,43E-09	2,19E-09	2,50E-09	1,02E-09	1,33E-09	2,48E-06
1-9	1,99E-09	1,46E-09	2,34E-09	1,43E-09	1,09E-09	2,23E-06	9-8	1,24E-09	3,16E-09	2,09E-09	1,38E-09	1,01E-09	2,49E-06

Tab. 9: Sonda ECP – Parametri statistici prove statiche I

mean-median ratio													
	3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.		3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.
1-2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-4	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-4	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-6	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-7	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-6	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-7	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-9	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	9-8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
signal to noise ratio													
	3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.		3 elec.	4 elec.	5 elec.	6 elec.	7 elec.	9 elec.
1-2	6,50E+08	4,59E+08	3,91E+08	9,49E+08	7,90E+07	4,56E+05	9-1	4,30E+08	5,32E+08	2,97E+08	8,94E+08	4,43E+08	3,79E+05
1-3	5,62E+08	5,56E+08	3,46E+08	6,63E+08	6,04E+08	4,27E+05	9-2	9,39E+08	4,51E+08	3,79E+08	5,68E+08	4,71E+07	3,75E+05
1-4	7,26E+08	4,07E+08	5,96E+08	7,00E+08	7,62E+08	4,32E+05	9-3	5,23E+08	4,82E+08	3,03E+08	6,29E+08	8,92E+08	3,63E+05
1-5	4,58E+08	4,73E+08	3,97E+08	6,17E+08	5,69E+08	4,20E+05	9-4	5,23E+08	5,66E+08	7,01E+08	6,77E+08	7,19E+08	3,71E+05
1-6	8,00E+08	4,61E+08	3,81E+08	5,96E+08	5,79E+08	4,23E+05	9-5	4,05E+08	3,51E+08	3,07E+08	6,81E+08	7,14E+08	3,64E+05
1-7	5,36E+08	4,81E+08	3,80E+08	5,89E+08	6,09E+08	4,21E+05	9-6	4,04E+08	3,34E+08	4,32E+08	6,94E+08	6,19E+08	3,70E+05
1-8	4,39E+08	6,77E+08	4,27E+08	6,13E+08	6,37E+08	4,18E+05	9-7	6,40E+08	4,19E+08	3,68E+08	9,02E+08	6,90E+08	3,72E+05
1-9	4,36E+08	5,99E+08	3,75E+08	6,15E+08	8,18E+08	4,14E+05	9-8	7,49E+08	2,93E+08	4,43E+08	6,73E+08	9,16E+08	3,75E+05

Tab. 10: Sonda ECP – Parametri statistici prove statiche II

In Fig. 14 è riportato il segnale medio delle varie combinazioni analizzate in funzione dell'angolo tra gli elettrodi di misura (θ).

L'andamento del segnale medio mostra la sensibilità della sonda all'effettivo livello del liquido presente all'interno della test section, e l'importanza di combinare le misure top (elettrodo 1) e bottom (elettrodo 9) per la definizione del flow pattern (stratificato nel presente caso).

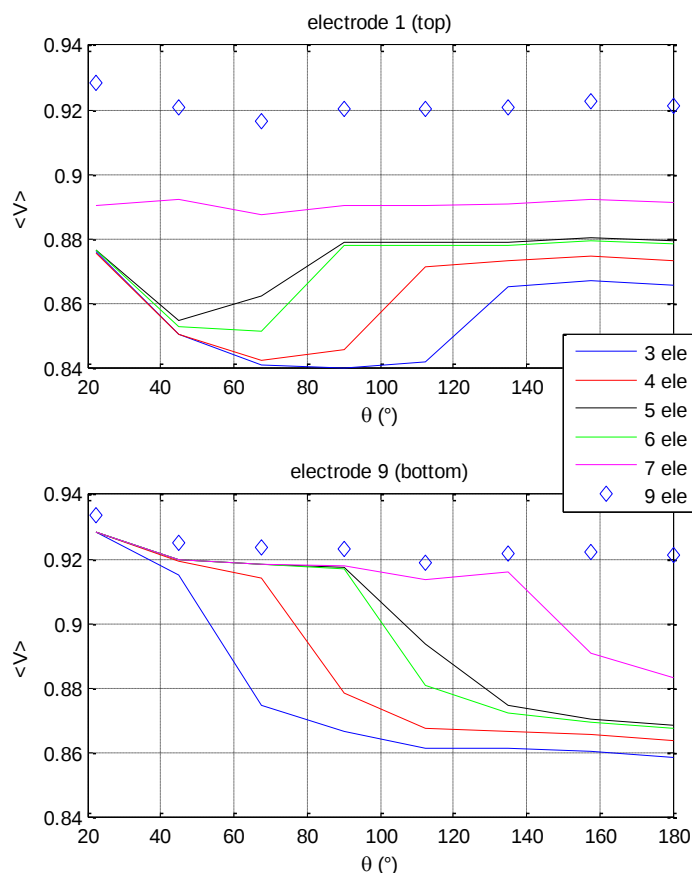


Fig. 14: Segnali medi sonda ECP in funzione dell'angolo fra gli elettrodi – Prove statiche

In particolare dall'analisi delle figure precedenti si evince che:

Misure elettrodo 1: i segnali misurati mostrano un valore proporzionale alla frazione di corda (calcolata tra elettrodi di misura) occupata dalla fase liquida e alla distanza tra gli elettrodi stessi: minore è la distanza, a parità di livello di liquido, maggiore è il segnale. Quando l'interno condotto è riempito dal liquido ($h=D$) il segnale evidenzia la pura dipendenza dalla distanza fra gli elettrodi. Per altezze del liquido inferiori, si può notare che la misura dipende sia dall'angolo (θ) che dalla frazione di condotto occupata dal liquido. Ad esempio, tra elettrodo 1 e elettrodo 2 ($\theta=22.5^\circ$) il segnale rimane costante fino a quando il livello di liquido non arriva a coprire l'altezza di 7 elettrodi (ovvero da 9 a 2). In quest'ultimo caso il livello di liquido copre completamente l'elettrodo eccitatore N°2, pertanto la misura effettuata sull'elettrodo N°1 mostra un segnale più elevato rispetto alle misure precedenti. Se si analizzano i segnali relativi agli elettrodi posti a distanza maggiore (67.5° - 180°), questi evidenziano la loro sensibilità al livello di liquido in maniera crescente (da 3 a 7 elettrodi interessati dal riempimento). È interessante notare la presenza di un pianerottolo nel segnale medio, indice di saturazione del segnale quando è intercettato il livello di liquido nel condotto.

Misure elettrodo 9: L'elettrodo 9 posto nella parte inferiore del condotto è di più semplice interpretazione in quanto in questo caso risulta sempre coperto dal liquido, e quindi le misure al variare della distanza mostrano un netto cambiamento di pendenza, che evidenzia proprio l'altezza del liquido raggiunta all'interno del condotto.

La sonda è interrogata eccitando un elettrodo e misurando la tensione elettrica associata a tutti gli altri elettrodi.

I segnali, dopo averli caratterizzati in termini di valori medi e di scarti quadratici medi su una base temporale, sono da correlare in funzione della distanza tra l'elettrodo eccitatore e l'elettrodo di misura per quanto concerne gli elettrodi esterni naturalmente fissato l'elettrodo eccitatore.

Per descrivere l'angolo tra l'elettrodo di misura o ricezione (r) e quello di eccitazione (e) ed indicando con $N_e=9$ il numero degli elettrodi, si considera:

l'angolo dell'elettrodo di ricezione:

$$\theta_r = (r-1) \frac{180}{(N_e-1)} \quad (13)$$

e l'angolo dell'elettrodo di eccitazione :

$$\theta_e = (e-1) \frac{180}{(N_e-1)} \quad (14)$$

La distanza angolare tra i due elettrodi risulta:

$$\Delta\theta_{e,r} = \theta_r - \theta_e = (r-e) \frac{180}{(N_e-1)} \quad (15)$$

Si intende caratterizzare i segnali di risposta della sonda con funzioni del tipo:

$$S_{e,r} = f(\theta_e, \theta_r, \alpha) \quad (16)$$

dove α è una frazione di vuoto o un livello associato al deflusso.

Nelle prove statiche il condotto orizzontale è stato riempito gradualmente con acqua demineralizzata fino a coprire i vari elettrodi, realizzando in tal modo un regime stratificato, tipico dei deflussi orizzontali.

Indicando con R il raggio interno del condotto, con α il semi angolo del segmento circolare occupato dall'acqua e con h l'altezza si ha:

per la corda c :

$$c = 2R \sin(\alpha) = 2\sqrt{h(2R-h)} \quad (17)$$

Per la superficie occupata dal segmento circolare si ha:

$$A = \frac{1}{2} R^2 \left(\pi \frac{2\alpha}{180} - \sin(2\alpha) \right) \quad (18)$$

Mentre il livello h del liquido è espresso con la:

$$h = R(1 - \cos\alpha) \quad (19)$$

In tabella si riportano le prove “statiche” effettuate.

nome dati	prova/file	Osservazioni
Sonda_20150728_3		Tre elettrodi bagnati, semiangolo regione segmento liquido $\alpha=45^\circ$
Sonda_20150728_4		Quattro elettrodi bagnati, semiangolo regione segmento liquido: $\alpha=67.5$
Sonda_20150728_5		Cinque elettrodi bagnati, semiangolo regione segmento liquido: $\alpha=90$
Sonda_20150728_6		Sei elettrodi bagnati, semiangolo regione segmento liquido: $\alpha=112.5$
Sonda_20150728_7		Sette elettrodi bagnati, semiangolo regione segmento liquido: $\alpha=135$
Sonda_20150728_9		Condotta completamente occupata dal liquido

Tab. 11: Sonda a impedenza: prove statiche

In questo tipo di prove le grandezze interferenti con i segnali della sonda sono la temperatura e la conducibilità elettrica dell’acqua.

In tabella si riportano, al variare del semiangolo α , il livello stimato e la corrispondente frazione di vuoto.

run	S_2015072 8_3	S_2015072 8_4	S_2015072 8_5	S_2015072 8_6	S_2015072 8_7	S_2015072 8_9
ang	45.0	67.5	90.0	135.5	157.5	180.0
Livello mm	11.72	24.69	40.00	68.53	76.96	80
Void fraction	0.91	0.74	0.5	0.0881	0.0125	0.0

Tab. 12: Sonda ECP: condizioni prove statiche

Gli andamenti tipici del livello e della frazione di vuoto sono riportati nelle figure 15 e 16:

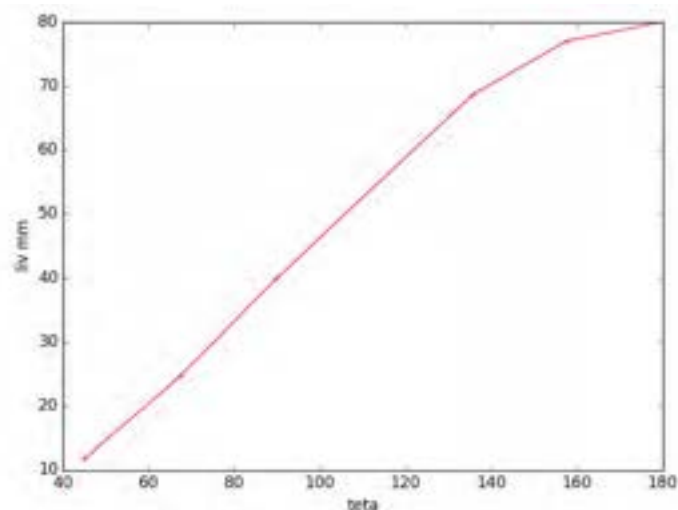


Fig. 15 Andamento del livello in funzione del semi angolo bagnato (teta = θ)

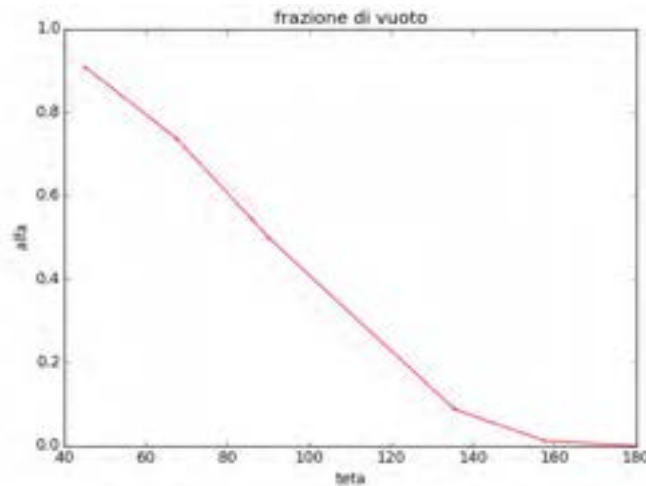


Fig. 16 Andamento della frazione di vuoto in funzione del semi angolo di bagnabilità (teta = 0)

Assumendo come riferimento angolare l'elettrodo 9, si può ricostruire l'andamento del segnale in funzione dell'angolo $\Delta \theta_{e,r}$ e la "void fraction" α come riportato nella figura 17.

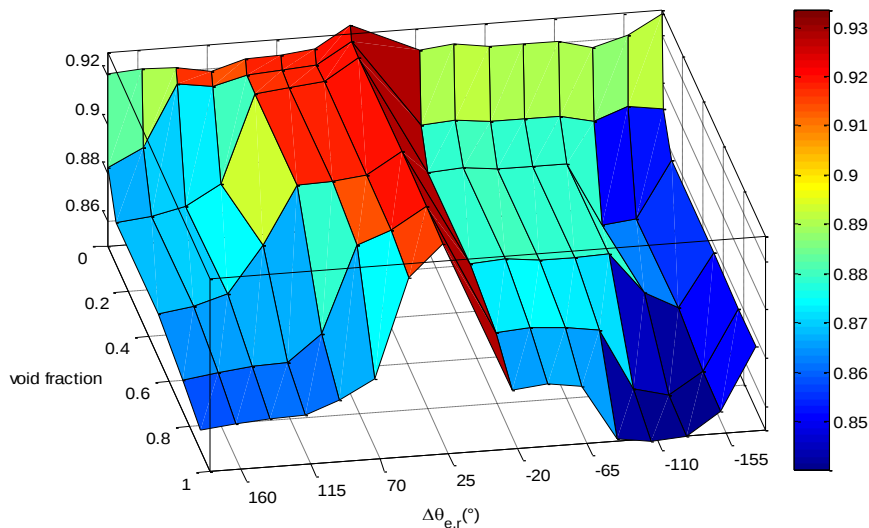


Fig. 17 : $S_{e,r} = f(\Delta \theta_{e,r}, \alpha)$ per prove statiche

Nella figura seguente vengono riportati i segnali della sonda in funzione dell'angolo di misura tra gli elettrodi θ , e dell'altezza di liquido h_l . La Fig. 18, i cui estremi rappresentano i valori monofase aria e acqua (valori minimi e massimi), consente di riconoscere immediatamente quali elettrodi (asse delle ascisse) risentono della presenza del livello di liquido e in quale misura, in funzione del livello di liquido stesso (asse delle ordinate).

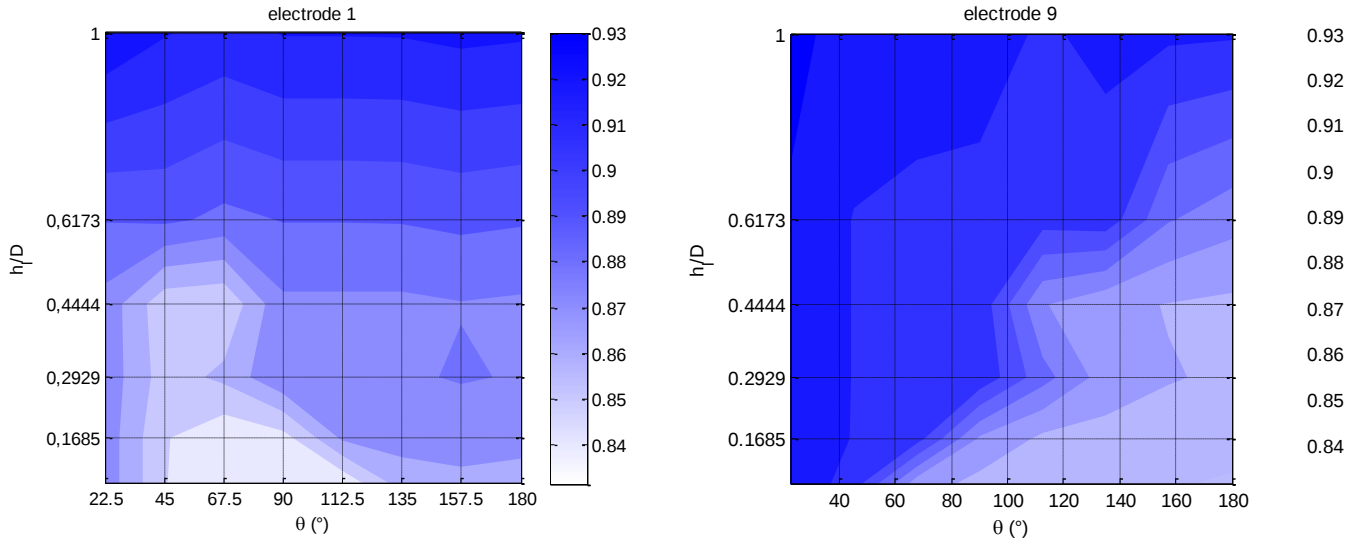


Fig. 18: Segnali medi sonda ECP $V = f(\theta, h_i)$ – Prove statiche

Caratterizzati gli andamenti dei segnali della sonda in funzione della distanza angolare θ , per ogni elettrodo eccitatore si considera il best fit polinomiale per descrivere il segnale nelle seguenti condizioni:

tutta acqua $S_l(\theta)$, tutta aria $S_a(\theta)$.

Sulla base di queste due funzioni, definita la frazione di vuoto convenzionale:

$$\alpha = \frac{S(\theta) - S_l(\theta)}{S_a(\theta) - S_l(\theta)} \quad (20)$$

Fissato α , si può ricostruire il segnale $S(\theta)$ con la:

$$S_R = S_l(\theta) + \alpha(S_a(\theta) - S_l(\theta)) \quad (21)$$

Il confronto tra le diverse curve $S_R(\theta)$, che definiscono la mappa della sonda in un esercizio con fluido omogeneo, e la $S(\theta)$ permette di individuare dove è concentrata la fase liquida.

In Fig. 19 si riporta la mappa della sonda costruita, per alcune frazioni di vuoto, sulla base della eq. (21).

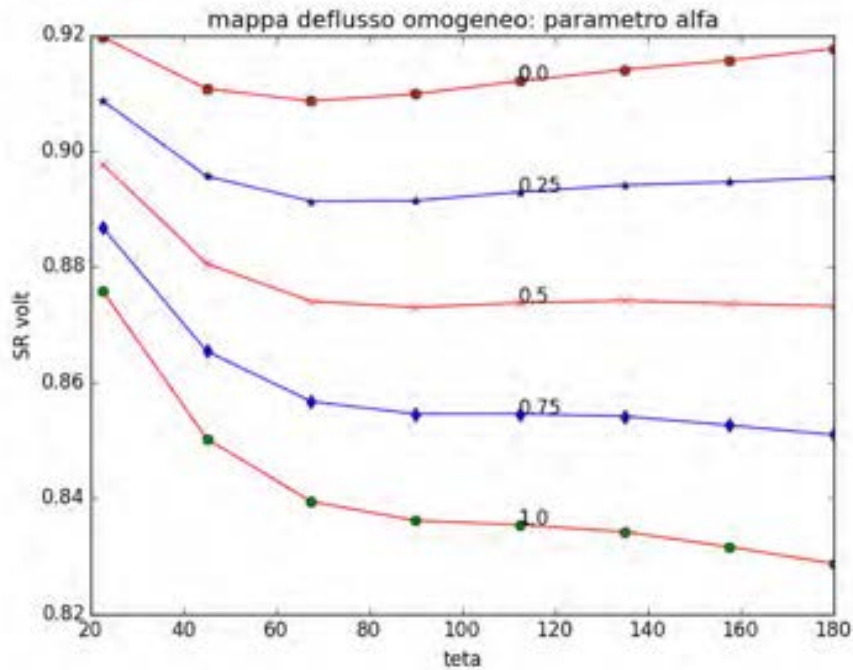


Fig. 19: Mappa della sonda ECP, relativa agli elettrodi esterni per alcuni valori della frazione di vuoto ($\theta = 0$).

Diviene interessante l'analisi delle differenze $S(\theta) - S_R(\theta)$. Ciò può essere effettuato con la sovrapposizione della precedente mappa con i tipici profili sperimentali osservati considerando soprattutto la coppia con l'elettrodo eccitatore $E=1$ e gli elettrodi ricevitori da $r=2$ sino a $r=9$. Un esempio di risultati per le prove statiche è riportato in Fig. 20:

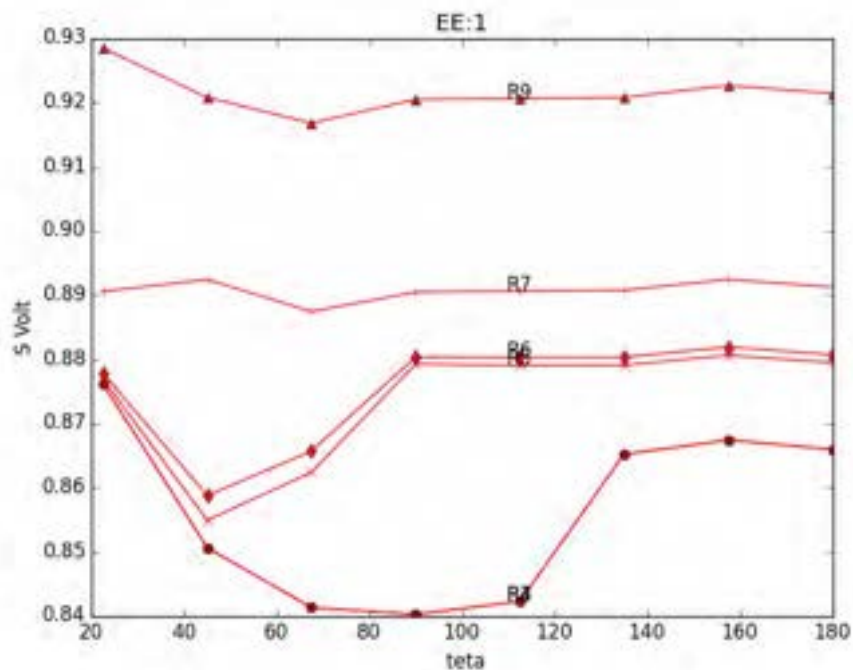
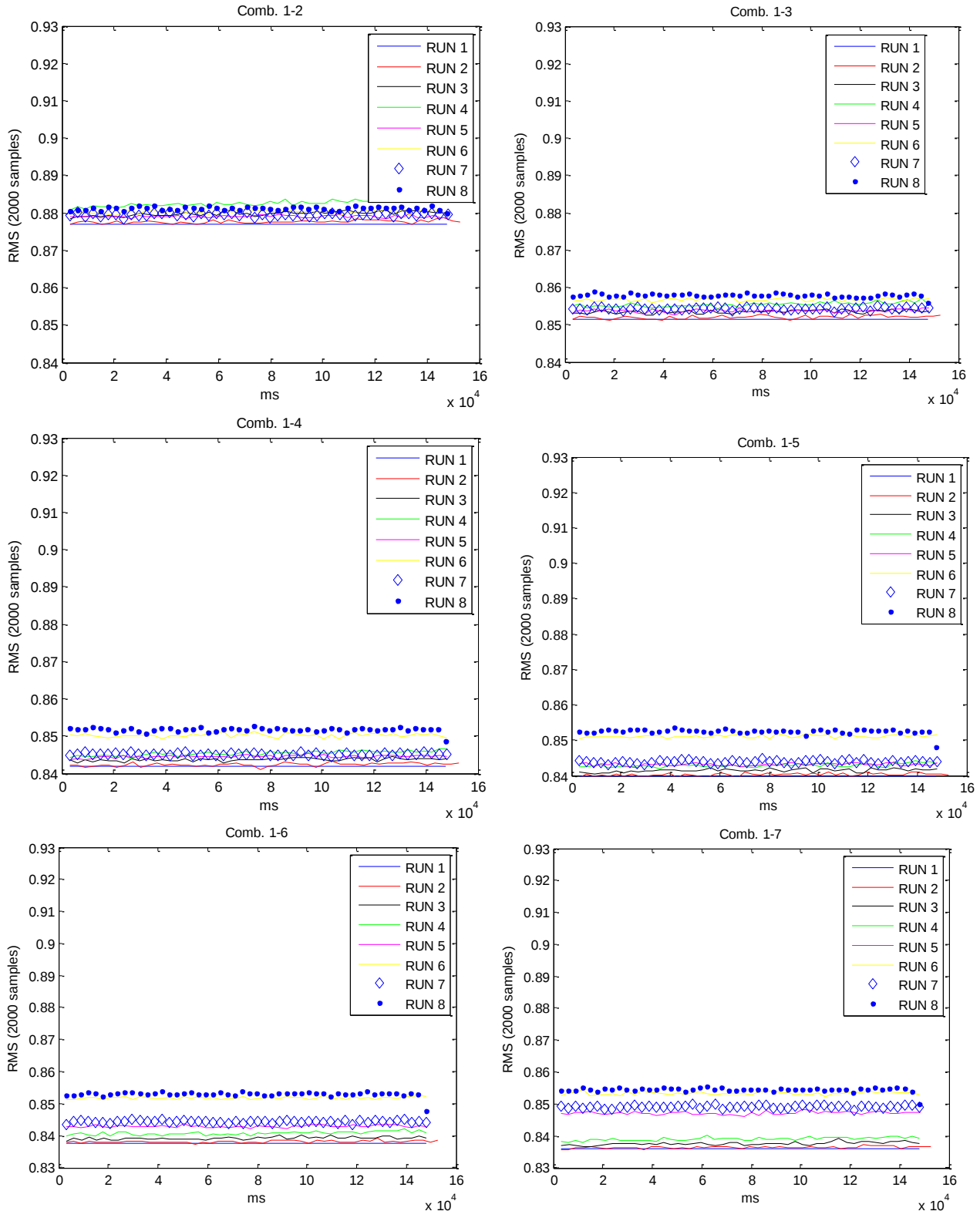


Fig. 20: Esempio di profili sperimentali ottenuti con l'eccitazione dell'elettrodo 1 e la lettura degli elettrodi residui ($R=2,9$); ($\theta = 0$).

La prova indicata con R9 è costituita da tutto liquido (frazione di vuoto zero): il segnale è praticamente costante.

Nelle prove dinamiche il deflusso viene creato imponendo le portate delle due fasi all'ingresso della *test section*; realizzando un deflusso monofase aria a varie velocità (e temperature) e un deflusso bifase essenzialmente di tipo stratificato e anulare.



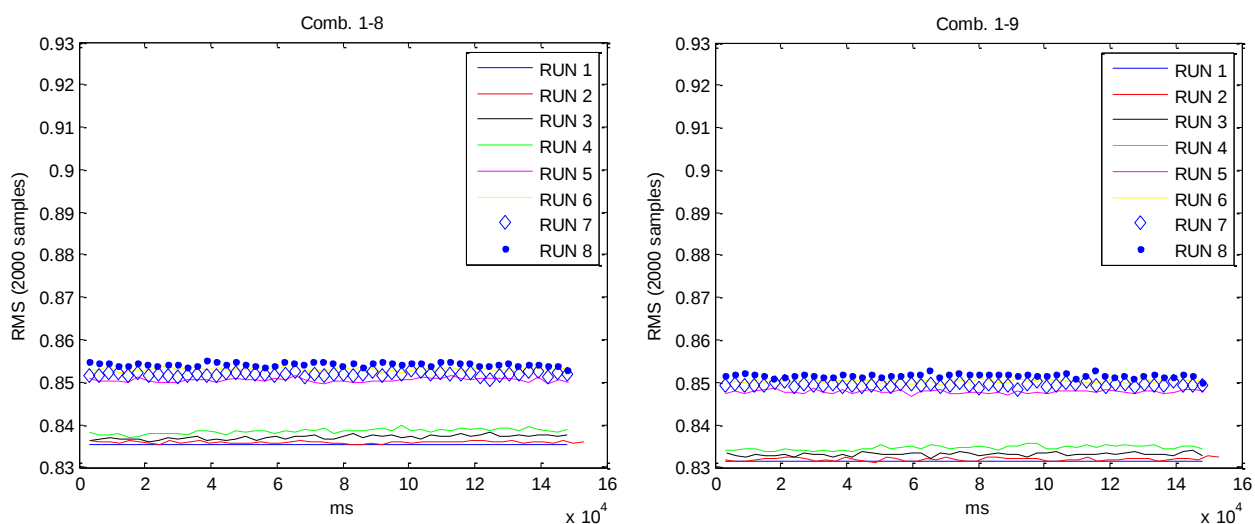
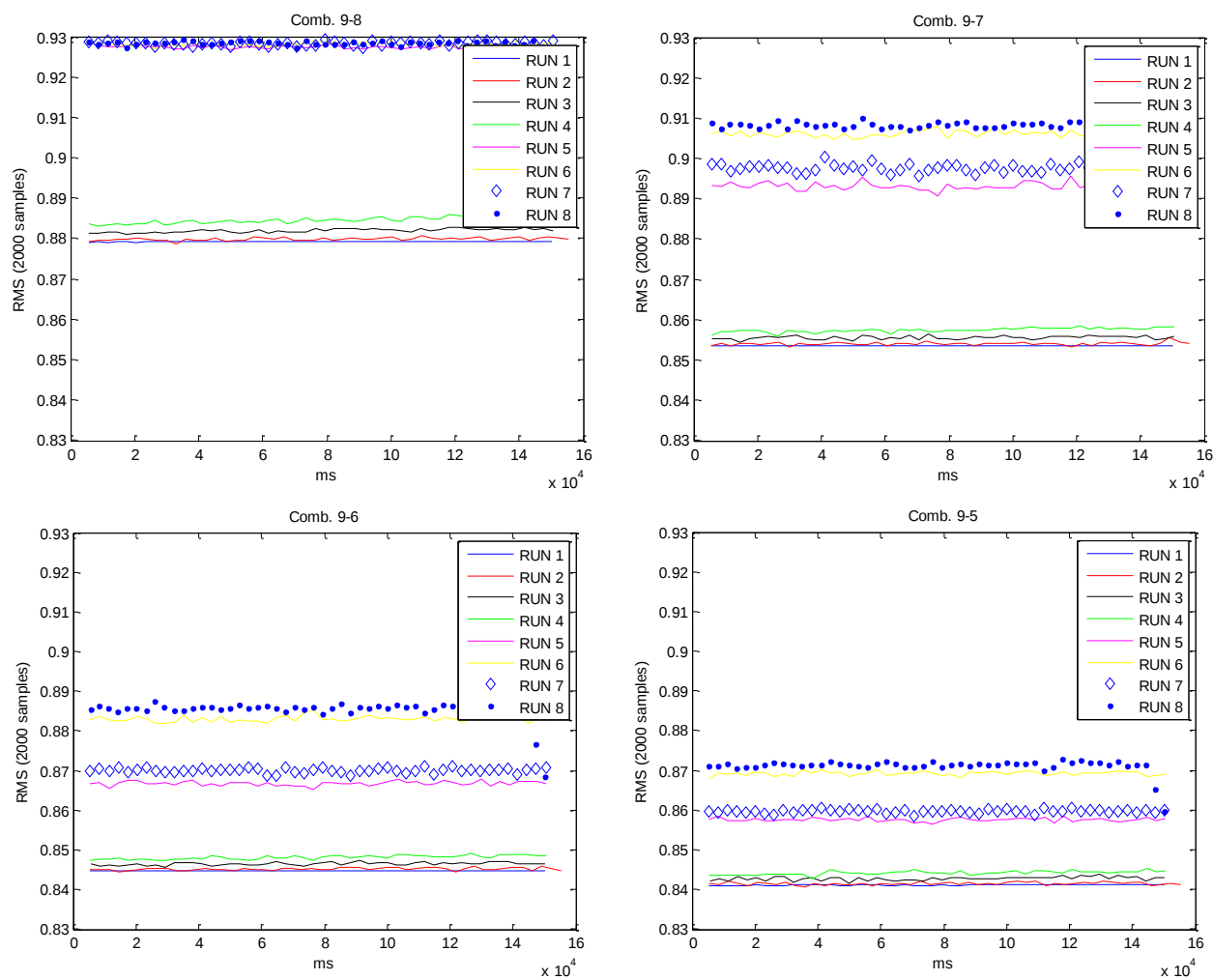


Fig. 21: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove dinamiche – Combinazioni elettrodo 1 – 2,9



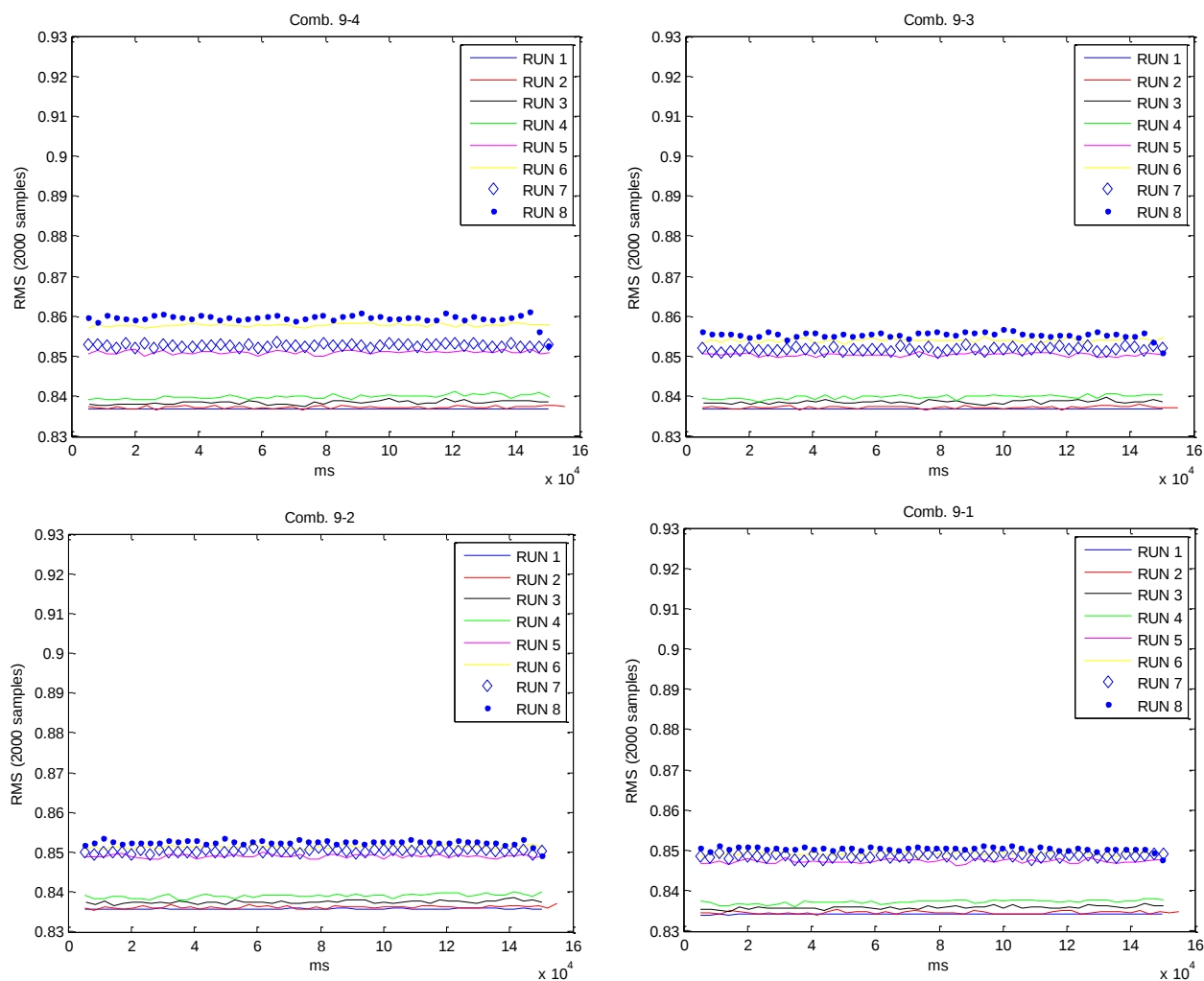


Fig. 22: Andamento temporale segnali sonda ECP – Prove dinamiche – Combinazioni elettrodo 9 – 8,1

Gli andamenti temporali dei segnali (Fig. 21 e 22), sono stati analizzati dal punto di vista stocastico (Tab. 13 e Tab. 14) e da un punto di vista deterministico (Fig. 3).

L'analisi statistica, evidenzia che nelle condizioni in esame il segnale è caratterizzato da una distribuzione gaussiana (deflusso stazionario o mediamente stazionario nel caso delle prove bifase) e un valore relativamente basso di *standard deviation*.

E' comunque opportuno estendere il *range* sperimentale a portate maggiori di liquido, per caratterizzare la sensibilità della sonda a fenomeni di tipo transitorio a varie frequenze caratteristiche.

Mean electrode 1									Mean electrode 9								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8		RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
1-2	0,8769	0,8776	0,8798	0,8826	0,8790	0,8803	0,8795	0,8812	9-1	0,8341	0,8346	0,8359	0,8373	0,8473	0,8493	0,8486	0,8504
1-3	0,8514	0,8520	0,8535	0,8554	0,8537	0,8568	0,8543	0,8579	9-2	0,8358	0,8362	0,8375	0,8391	0,8490	0,8515	0,8504	0,8525
1-4	0,8419	0,8424	0,8437	0,8454	0,8445	0,8502	0,8451	0,8517	9-3	0,8368	0,8373	0,8386	0,8398	0,8504	0,8540	0,8518	0,8554
1-5	0,8398	0,8403	0,8414	0,8429	0,8431	0,8511	0,8439	0,8525	9-4	0,8368	0,8373	0,8385	0,8399	0,8510	0,8578	0,8527	0,8595
1-6	0,8376	0,8381	0,8392	0,8408	0,8429	0,8518	0,8444	0,8531	9-5	0,8411	0,8415	0,8428	0,8442	0,8575	0,8693	0,8598	0,8714
1-7	0,8360	0,8364	0,8376	0,8391	0,8471	0,8534	0,8491	0,8545	9-6	0,8448	0,8452	0,8465	0,8482	0,8668	0,8830	0,8701	0,8858
1-8	0,8354	0,8359	0,8371	0,8385	0,8505	0,8531	0,8519	0,8543	9-7	0,8535	0,8540	0,8556	0,8575	0,8931	0,9061	0,8976	0,9077
1-9	0,8315	0,8319	0,8331	0,8346	0,8478	0,8504	0,8494	0,8517	9-8	0,8792	0,8799	0,8820	0,8846	0,9274	0,9281	0,9283	0,9283
Median electrode 1									Median electrode 9								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8		RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
1-2	0,8769	0,8776	0,8799	0,8825	0,8791	0,8803	0,8796	0,8812	9-1	0,8341	0,8346	0,8359	0,8374	0,8472	0,8494	0,8486	0,8505
1-3	0,8514	0,8520	0,8535	0,8554	0,8538	0,8568	0,8543	0,8579	9-2	0,8358	0,8362	0,8375	0,8391	0,8490	0,8515	0,8504	0,8525
1-4	0,8419	0,8424	0,8437	0,8455	0,8446	0,8502	0,8451	0,8518	9-3	0,8368	0,8373	0,8386	0,8400	0,8504	0,8540	0,8518	0,8555
1-5	0,8398	0,8403	0,8415	0,8428	0,8431	0,8511	0,8438	0,8526	9-4	0,8369	0,8373	0,8385	0,8399	0,8510	0,8578	0,8527	0,8596
1-6	0,8376	0,8381	0,8392	0,8408	0,8429	0,8518	0,8444	0,8531	9-5	0,8411	0,8415	0,8429	0,8442	0,8575	0,8693	0,8598	0,8714
1-7	0,8360	0,8364	0,8376	0,8391	0,8471	0,8534	0,8491	0,8546	9-6	0,8448	0,8452	0,8466	0,8482	0,8668	0,8830	0,8701	0,8858
1-8	0,8354	0,8360	0,8372	0,8386	0,8505	0,8530	0,8519	0,8542	9-7	0,8535	0,8540	0,8556	0,8574	0,8928	0,9061	0,8976	0,9082
1-9	0,8315	0,8319	0,8332	0,8346	0,8478	0,8504	0,8494	0,8517	9-8	0,8792	0,8799	0,8820	0,8845	0,9274	0,9280	0,9284	0,9284
Var electrode 1									Var electrode 9								
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8		RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
1-2	1,22E-09	1,62E-07	3,32E-07	6,44E-07	8,75E-08	2,07E-07	1,41E-07	2,23E-07	9-1	1,38E-09	1,07E-07	1,64E-07	2,18E-07	2,38E-07	1,57E-07	2,07E-07	3,00E-07
1-3	2,00E-09	1,98E-07	2,05E-07	3,24E-07	1,65E-07	1,86E-07	1,20E-07	2,36E-07	9-2	2,55E-09	1,27E-07	1,58E-07	2,73E-07	1,82E-07	1,30E-07	1,55E-07	4,01E-07
1-4	1,06E-09	1,87E-07	1,67E-07	3,77E-07	1,24E-07	2,34E-07	9,22E-08	3,66E-07	9-3	2,01E-09	9,24E-08	1,79E-07	2,29E-07	1,69E-07	1,99E-07	2,70E-07	7,24E-07
1-5	1,52E-09	1,37E-07	2,08E-07	2,46E-07	1,38E-07	1,33E-07	1,44E-07	5,82E-07	9-4	1,56E-09	9,35E-08	2,10E-07	2,93E-07	2,09E-07	1,33E-07	1,49E-07	1,45E-06
1-6	1,30E-09	1,13E-07	1,94E-07	2,80E-07	1,36E-07	1,24E-07	1,45E-07	7,40E-07	9-5	1,77E-09	1,18E-07	2,29E-07	2,29E-07	2,08E-07	2,66E-07	1,60E-07	3,75E-06
1-7	1,39E-09	1,18E-07	2,40E-07	2,74E-07	2,20E-07	2,06E-07	1,70E-07	6,01E-07	9-6	1,47E-09	1,14E-07	1,46E-07	2,35E-07	3,21E-07	5,04E-07	3,49E-07	8,00E-06
1-8	1,29E-09	7,44E-08	2,48E-07	3,57E-07	2,22E-07	1,70E-07	1,83E-07	1,81E-07	9-7	1,03E-09	1,52E-07	1,69E-07	2,94E-07	1,03E-06	5,78E-07	8,80E-07	9,92E-06
1-9	1,34E-09	1,42E-07	1,84E-07	3,03E-07	1,60E-07	1,43E-07	1,46E-07	2,16E-07	9-8	1,54E-09	1,61E-07	2,20E-07	6,61E-07	1,37E-07	1,68E-07	2,17E-07	4,85E-07

Tab. 13: Sonda ECP - Parametri statistici misure dinamiche I

mean-median ratio																	
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8		RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
1-2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1-3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1-4	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1-5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-4	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1-6	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1-7	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-6	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-7	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999
1-9	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	9-8	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
signal to noise ratio																	
	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8		RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8
1-2	7,21E+08	5,43E+06	2,65E+06	1,37E+06	1,00E+07	4,25E+06	6,25E+06	3,95E+06	9-1	6,03E+08	7,84E+06	5,09E+06	3,84E+06	3,55E+06	5,42E+06	4,10E+06	2,84E+06
1-3	4,26E+08	4,31E+06	4,15E+06	2,64E+06	5,16E+06	4,60E+06	7,12E+06	3,64E+06	9-2	3,28E+08	6,59E+06	5,30E+06	3,07E+06	4,65E+06	6,55E+06	5,49E+06	2,13E+06
1-4	7,96E+08	4,51E+06	5,06E+06	2,24E+06	6,84E+06	3,64E+06	9,16E+06	2,33E+06	9-3	4,16E+08	9,06E+06	4,69E+06	3,67E+06	5,05E+06	4,29E+06	3,15E+06	1,18E+06
1-5	5,51E+08	6,13E+06	4,05E+06	3,43E+06	6,11E+06	6,41E+06	5,86E+06	1,46E+06	9-4	5,37E+08	8,95E+06	3,99E+06	2,87E+06	4,08E+06	6,47E+06	5,71E+06	5,92E+05
1-6	6,47E+08	7,41E+06	4,32E+06	3,00E+06	6,18E+06	6,86E+06	5,81E+06	1,15E+06	9-5	4,74E+08	7,14E+06	3,69E+06	3,69E+06	4,13E+06	3,26E+06	5,36E+06	2,32E+05
1-7	6,02E+08	7,09E+06	3,49E+06	3,06E+06	3,85E+06	4,14E+06	5,00E+06	1,42E+06	9-6	5,74E+08	7,39E+06	5,80E+06	3,61E+06	2,70E+06	1,75E+06	2,49E+06	1,11E+05
1-8	6,47E+08	1,12E+07	3,38E+06	2,35E+06	3,84E+06	5,02E+06	4,65E+06	4,72E+06	9-7	8,26E+08	5,61E+06	5,06E+06	2,92E+06	8,69E+05	1,57E+06	1,02E+06	9,15E+04
1-9	6,21E+08	5,86E+06	4,53E+06	2,75E+06	5,29E+06	5,93E+06	5,80E+06	3,94E+06	9-8	5,70E+08	5,45E+06	4,00E+06	1,34E+06	6,77E+06	5,53E+06	4,29E+06	1,91E+06

Tab. 14: Sonda ECP - Parametri statistici misure dinamiche II

L'analisi deterministica (Fig. 23) indica la variazione del segnale per le coppie di elettrodi 1-9 in funzione dell'angolo θ .

In particolare i RUN 6 e 8, caratterizzati da elevate velocità dell'aria e quindi da un deflusso anulare, corrispondono a un segnale decrescente in funzione dell'angolo di misura, con valori medi superiori a quelli del monofase aria e l'assenza di una stratificazione del liquido; infatti il segnale tende a un valore costante al crescere della distanza di misura. Per i RUN 5 e 7, viene invece riscontrata la presenza di una stratificazione. Dall'analisi dei segnali si vede infatti che il segnale relativo agli elettrodi posti a distanza $> 90^\circ$ tende a salire, proprio a causa della presenza maggiore di liquido nella parte inferiore del canale.

L'analisi dell'elettrodo 9 e delle relative misure, evidenzia ulteriormente la distribuzione delle fasi osservata visivamente.

Le misure a 22.5° mostrano un segnale costante per tutte le condizioni bifase, dovuto alla presenza di film liquido alla parete, e un segnale maggiore per le coppie caratterizzate da un angolo compreso tra 22.5 e 157.5° , per i RUN 6 e 8 evidenziando la presenza di un numero maggiore di liquido disperso nel core rispetto ai RUN 5 e 7, dove la riduzione del segnale per angoli maggiori di 22.5° è più pronunciata a causa della concentrazione del liquido nella zona inferiore del condotto.

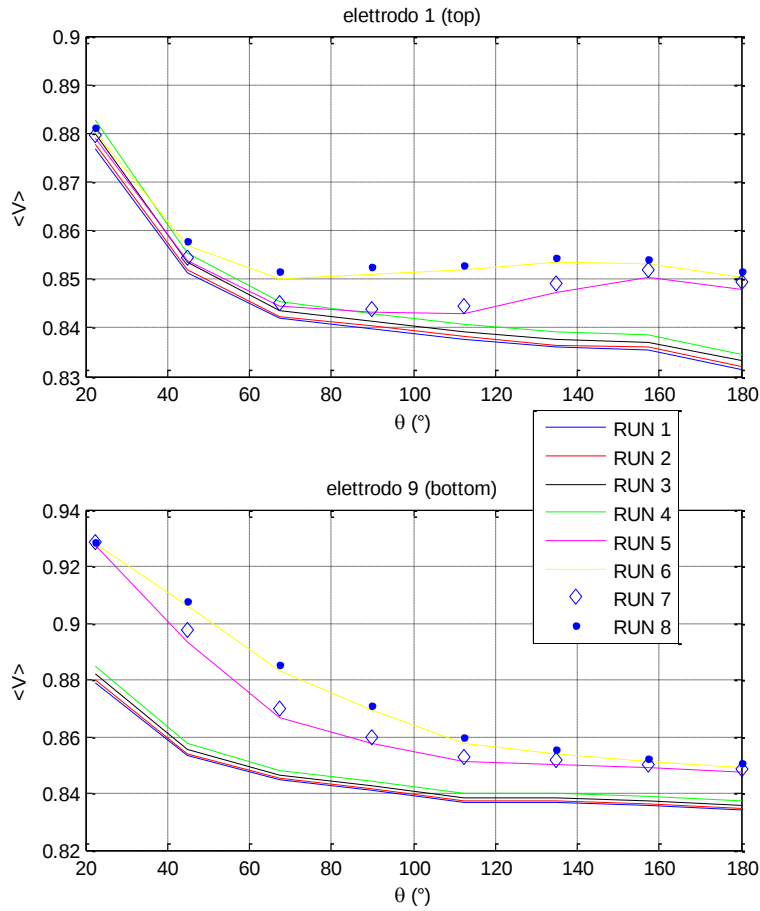


Fig. 23: Segnali medi sonda ECP in funzione dell'angolo fra gli elettrodi – Prove dinamiche

Anche in questo caso il segnale della sonda può essere espresso con una funzione

$$S_{e,r} = f(\theta_e, \theta_r, \alpha), \text{ come riportato nell'eq. (21).}$$

In Fig. 24 è riportata la mappa di $S_{e,r}$ per le prove dinamiche e in Fig. 25 è riportato il confronto tra le mappe realizzate in condizioni statiche e in condizioni dinamiche, in funzione della frazione di vuoto (o del titolo) e $\Delta\theta_{e,r}$ (eq. 15).

Emerge una buona ripetibilità della forma della funzione, che evidenzia la naturale stratificazione presente nei deflussi bifase orizzontali, e la necessità di testare la sonda ECP in condizioni di frazione di vuoto differenti, ampliando il range finora sperimentato.

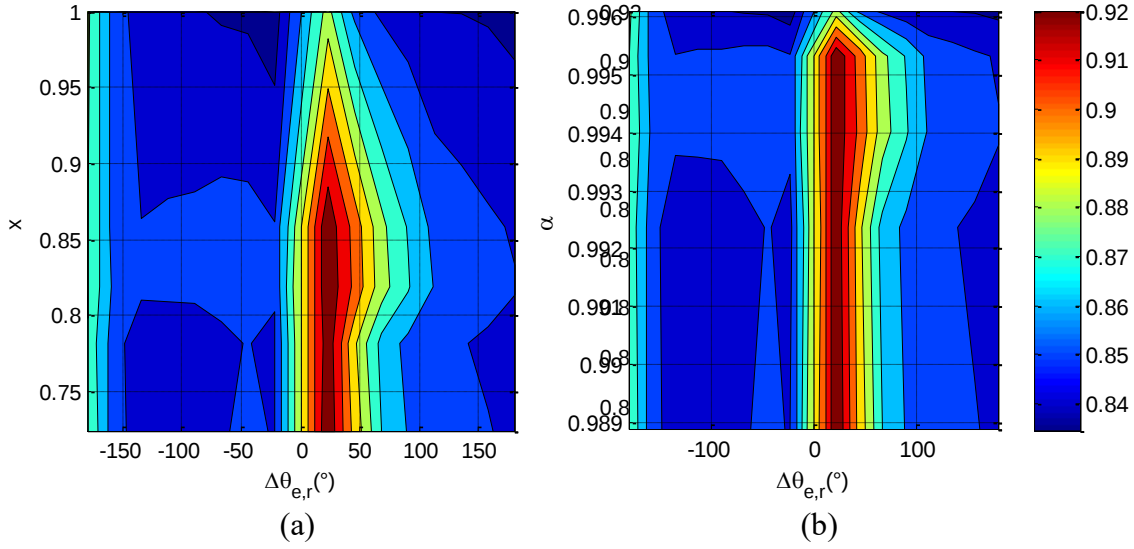


Fig. 24: $S_{e,r} = f(\Delta\theta_{e,r}, x)$ e $S_{e,r} = f(\Delta\theta_{e,r}, \alpha)$ per prove dinamiche

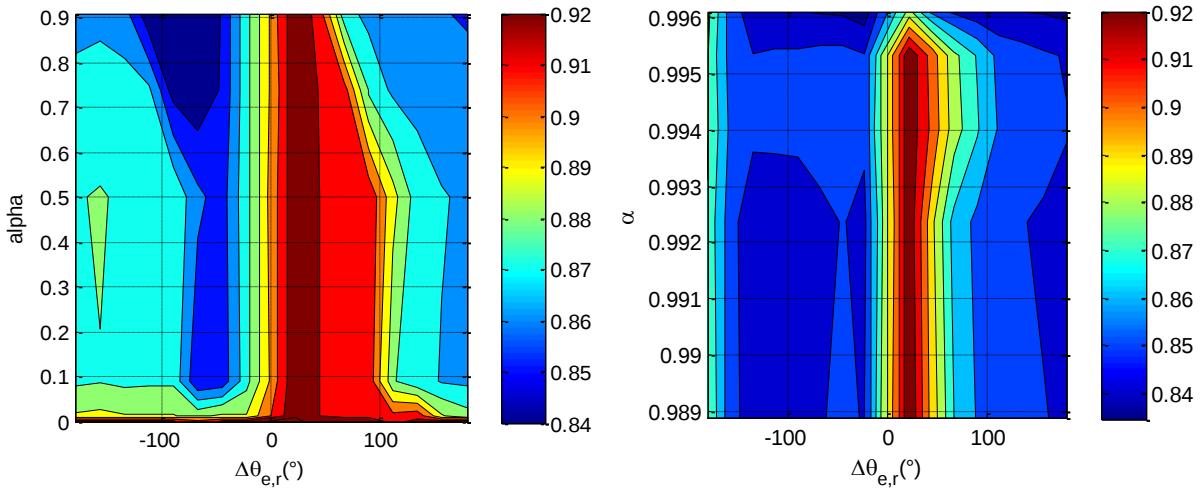


Fig. 25: Confronto $S_{e,r} = f(\Delta\theta_{e,r}, \alpha)$ tra prove statiche e prove dinamiche

Una analisi sistematica dei profili dei segnali generati dalle sonde, il confronto con i segnali ricostruiti, l'analisi delle deviazioni oltre che l'uso della definizione della frazione di vuoto definita dalla relazione (20) porta a fornire delle indicazioni sulla probabile distribuzione delle fasi e sulla frazione di vuoto. Nella Fig. 26 si riporta un altro esempio di rappresentazione dei risultati per le prove definite dinamiche, che sovrapposta con la mappa della frazione di vuoto (Fig. 27) consente di stimare le probabili frazioni di vuoto.

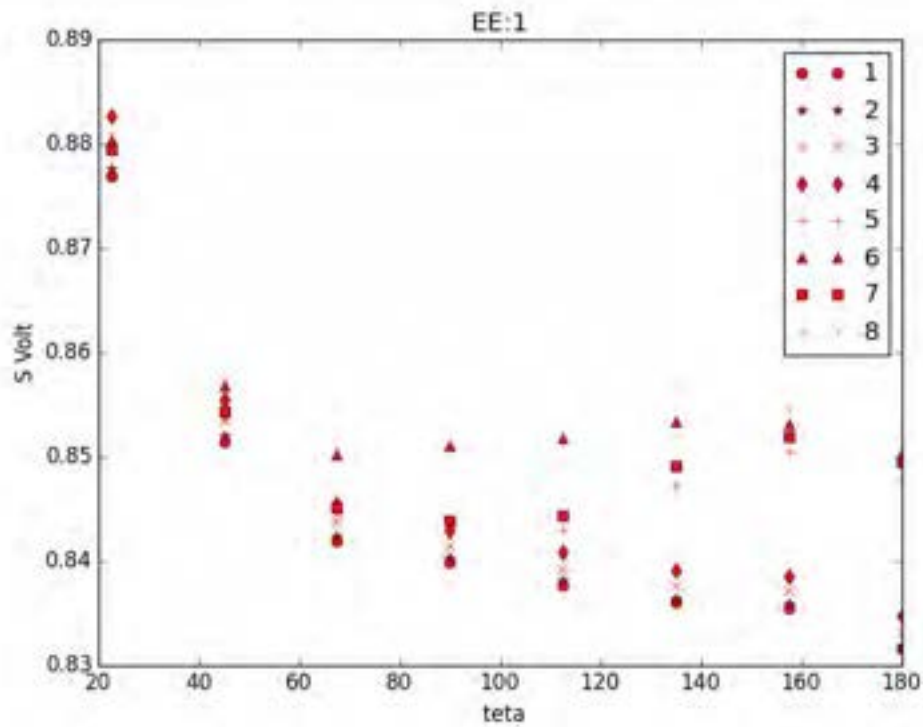


Fig. 26: Segnali generati dalla sonda ECP nelle prove dinamiche quando è eccitato l'elettrodo 1 (teta = 0).

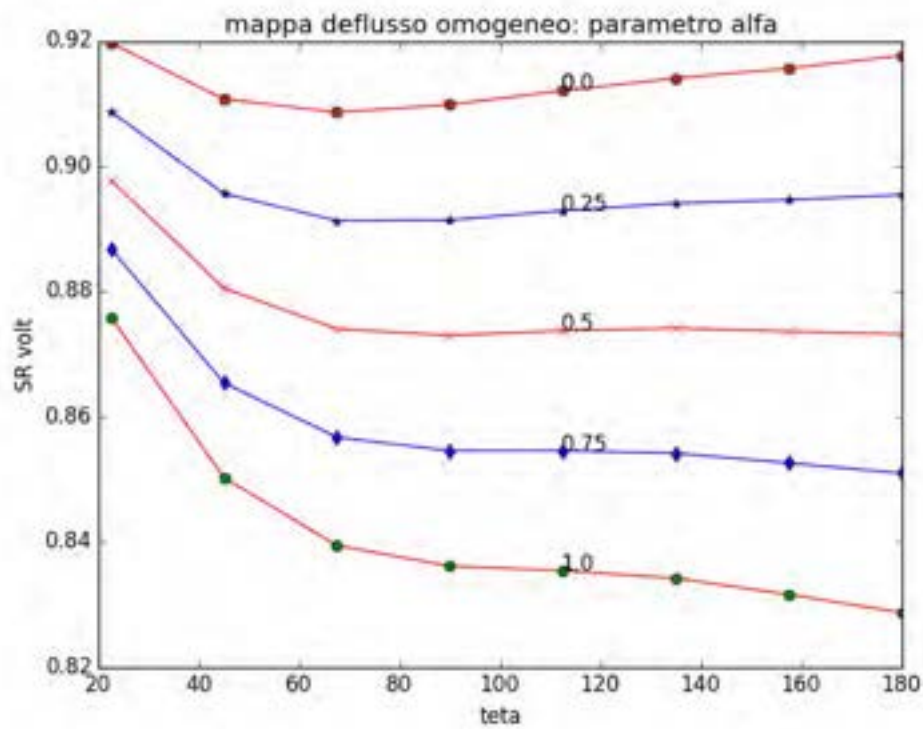


Fig. 27: Segnali ricostruiti della sonda ECP rispetto a cui valutare le deviazioni (teta = 0, alfa = α).

4 CONCLUSIONI

Alla luce degli studi effettuati nel corso dei PAR precedenti e in relazione all'applicabilità dello strumento nell'impianto SPES3 è stato proposto lo studio di uno SP composto da un venturi e da un misuratore di grado di vuoto: WMS e sonda ECP SIET.

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

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

Nel corso del PAR precedente sono stati presentati i risultati della campagna sperimentale effettuata per caratterizzare lo SP costituito da un venturi, tipo corto e sonda ECP installati in una *test section* orizzontale che opera con un deflusso bifase aria-acqua, ad elevati gradi di vuoto. I dati degli strumenti e le grandezze fluidodinamiche sono stati confrontati con i risultati ottenuti nella precedente campagna [15], evidenziando le differenze tra le due configurazioni dello SP. L'analisi ha evidenziato che la modellazione sviluppata per il deflusso verticale può essere utilizzata anche nello SP avente giacitura orizzontale, caratterizzata da deflussi fortemente asimmetrici lungo l'asse verticale del condotto a causa della stratificazione della fase liquida. La campagna sperimentale ha inoltre evidenziato che la risposta del VFM dipende fortemente dal tipo di flow pattern, con coefficienti dei modelli che devono essere calibrati ad hoc. L'analisi dei segnali della sonda, e la loro corretta interpretazione, risultano essere quindi di fondamentale importanza per una corretta interpretazione dei segnali del venturi e quindi per il calcolo delle portate delle due fasi all'interno della *test section*.

La modellazione di uno "spool piece" per la stima dei parametri di un deflusso bifase richiede necessariamente la caratterizzazione sperimentale dei vari regimi (flow patterns) con l'ausilio di modelli fenomenologici e deterministici. Per ridurre e caratterizzare le incertezze associate ai dati sperimentali si è osservata l'esigenza di una analisi dei range di transizione tra i flow patterns con l'ausilio di una metodologia basata sull'analisi statistica dei segnali associati agli strumenti dello spool piece stesso.

Il problema dell'analisi dei segnali acquisiti nel corso del processo di misura è di notevole interesse in quanto è una parte integrante dei moderni sistemi di misura delle grandezze sia analogiche che digitali. Il processo di digitalizzazione è nel contesto della catena di misura. Il processo di elaborazione/ interpretazione è da sviluppare e dimostrare fuori linea per integrarlo in linea successivamente.

Nella corrente annualità i risultati disponibili, insieme ad una nuova campagna di prova di estensione temporale dei dati acquisiti più lunga, sono stati analizzati in termini sia deterministici (valori medi e loro dipendenza dalle condizioni di prova) che stocastici (densità di probabilità).

Le attività svolte hanno comportato una analisi di dettaglio dei dati sperimentali disponibili e il confronto con i nuovi ottenuti. Si è data più importanza all'analisi dei segnali elettrici acquisiti e alla loro dipendenza dalle condizioni di prova. La loro conversione in grandezze fisiche (pressioni differenziali, portate, frazioni di vuoto) è stata considerata essenzialmente al fine di considerare la congruenza fisica delle informazioni estratte dalla procedura di prova. Il comportamento della sonda ECP è stato completato con una serie di prove statiche (acqua stagnante) oltre che con deflussi sviluppati, evidenziando le caratteristiche del segnale e la loro interpretazione fluidodinamica. L'analisi sistematica del processo di interrogazione delle coppie di elettrodi con caratterizzazione delle deviazioni rispetto alle mappe di riferimento consente di caratterizzare la probabile distribuzione delle fasi e quindi la frazione di vuoto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Greco, R. Ferri et al., *Two-Phase Flow Measurement Studies for the SPES3 Integral Test Facility for IRIS Reactor Simulation*, in 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE18) May 17–21, 2010, Xi'an, China
- [2] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *State of art and Selection of techniques in Multiphase Flow Measurement*, Report RdS/2010/67, ENEA
- [3] C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, G. Monni, B. Panella, A. Mosetto, *SPES-3 Facility Analysis, reference data for postulated Accident Simulation, Criteria for general and special instrumentation selection*. Report RdS/2010/68 ENEA
- [4] De Salve M., G. Monni, B. Panella, *Experimental Study of Horizontal air-water Two-Phase Flow with a Spool Piece*, Report ENEA Settembre 2011
- [5] De Salve M., Monni G., Panella B., *Turbine Flow Meter and Drag-Disk in Horizontal Air Water Flow*. In: UIT2011, Torino (Italia), 20-22 June 2011. pp. 107-112
- [6] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *Caratterizzazione di un deflusso bifase orizzontale aria-acqua mediante Wire Mesh Sensor*, Report RdS/2011/121
- [7] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *Horizontal Air-Water Flow Characterization with Wire Mesh Sensor*, UIT2012, Bologna (Italia), 25-27 June 2012
- [8] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *Horizontal Air-Water Flow Analysis with Wire Mesh Sensor*, in 6th European Thermal Sciences Conference, Eurotherm 2012 September 04 – 07, Poitiers - Futuroscope France
- [9] Achilli, M. Greco, *Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore*. Report RdS/2010/x ENEA
- [10] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *Caratterizzazione di una Sonda capacitiva in deflusso verticale ascendente aria-acqua* Report RdS/2011/121
- [11] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, C. Randaccio, *Electrical Capacitance Probe Characterization for Vertical Annular air-water Flow*, in 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, July 2012 Malta
- [12] M. De Salve, G. Monni, B. Panella, *A Model for a Spool Piece made up of Venturi and Void fraction Flow Meter in Horizontal Flow*, Trans. ANS, Vol. 108 1013-1016, Atlanta, Georgia, June 16–20 (2013)
- [13] G. Monni, M. De Salve, B. Panella, *Prove sperimentali e modello numerico dello Spool Piece costituito da Venturi e misuratore di grado di vuoto*, Report CERSE-POLITO RL 1565/2013
- [14] G. Monni, M. Caramello, M. De Salve, B. Panella, *Venturi flow meter and Electrical Capacitance Probe in a horizontal two-phase flow*, 33rd UIT Heat Transfer Conference - L'Aquila (22- 23 June 2015)
- [15] G. Monni, M. Caramello, M. De Salve, B. Panella, *Modellazione di uno Spool Piece per la stima dei parametri caratteristici dei deflussi bifase*, CERSE-POLITO RL 1568/2014.

Addendum

Analisi deterministica delle prestazioni dello Spool Piece (SP) Venturi - Sonda ad impedenza

L'analisi delle prestazioni dello SP dal punto di vista deterministico fa riferimento alla metodologia messa a punto nel corso del PAR 2013 "Modellazione di uno SP per la Stima dei Parametri Caratteristici dei Deflussi Bifase", CERSE-POLITO RL 1568/2014.

Il comportamento del venturi nel suo esercizio in regime bifase è descritto dalla coppia dei segnali associati alle due pressioni differenziali Δp_v tra la sezione di ingresso e la sezione minima (throat) e la Δp_{irr} pressione differenziale tra monte e valle del venturi detta irreversibile. Si osserva che in regime monofase quest'ultima è piccola e si ritiene trascurabile. Diviene invece rilevante in regime bifase.

Con le precedenti campagne sperimentali la caduta di pressione irreversibile è stata correlata alle velocità superficiali per la fase liquida J_l e gas J_g .

$$\Delta P_{irr} = 0.260565 * (\rho_g * J_g^{1.913522}) * \left(\frac{J_l}{J_g}\right)^{0.126127} \quad (AD1)$$

Questa correlazione è importante per caratterizzare il rapporto tra le portate della fase liquida e gas, nel range di esercizio dello SP, minimizzando lo scarto tra la caduta di pressione irreversibile misurata e la caduta di pressione irreversibile calcolata in funzione del titolo del deflusso. I coefficienti di questa correlazione sono associati al range sperimentato e quindi al flow pattern. Le campagne sperimentali sono state caratterizzate da un deflusso anulare con spessore non uniforme (anulare – stratificato).

In tabella AD1 si riportano i dati sperimentali di riferimento per la campagna di prova 2015.

DATI SPERIMENTALI									
ΔP_v [mbar]	ΔP_{irr} [mbar]	W_g [kg/s]	W_l [kg/s]	x	D [m]	d [m]	A_{in} [m ²]	ρ_l [kg/m ³]	ρ_g [kg/m ³]
16,74	8,81	0,06	0,00	0,94	0,08	0,04	0,01	997,54	1,17
16,16	10,21	0,06	0,01	0,88	0,08	0,04	0,01	997,54	1,17
15,71	9,77	0,06	0,02	0,75	0,08	0,04	0,01	997,54	1,16
15,42	9,91	0,06	0,03	0,69	0,08	0,04	0,01	997,54	1,17
15,28	10,81	0,06	0,04	0,62	0,08	0,04	0,01	997,54	1,17
27,67	14,59	0,08	0,00	0,95	0,08	0,04	0,01	997,30	1,17
27,52	15,50	0,08	0,01	0,91	0,08	0,04	0,01	997,30	1,17
27,08	16,68	0,08	0,02	0,79	0,08	0,04	0,01	997,30	1,17
26,64	18,85	0,08	0,03	0,74	0,08	0,04	0,01	997,05	1,17
41,10	23,33	0,10	0,00	0,96	0,08	0,04	0,01	996,24	1,16
41,84	25,17	0,10	0,01	0,92	0,08	0,04	0,01	996,24	1,16
42,43	27,85	0,10	0,02	0,82	0,08	0,04	0,01	996,24	1,17
43,32	30,00	0,10	0,03	0,78	0,08	0,04	0,01	996,24	1,17
43,62	32,40	0,10	0,04	0,72	0,08	0,04	0,01	996,24	1,17
14,89	8,13	0,06	0,00	0,94	0,08	0,04	0,01	996,79	1,15
15,52	9,86	0,06	0,02	0,75	0,08	0,04	0,01	997,30	1,16
16,03	10,64	0,06	0,03	0,69	0,08	0,04	0,01	997,30	1,16
16,66	11,79	0,06	0,04	0,62	0,08	0,04	0,01	997,30	1,16
26,28	15,18	0,09	0,00	0,96	0,08	0,04	0,01	997,30	1,16
26,77	16,41	0,09	0,01	0,91	0,08	0,04	0,01	997,05	1,16
27,30	17,38	0,08	0,02	0,80	0,08	0,04	0,01	996,79	1,16
27,37	18,36	0,08	0,03	0,75	0,08	0,04	0,01	997,05	1,17

28,82	20,42	0,08	0,04	0,68	0,08	0,04	0,01	997,05	1,17
41,04	23,27	0,10	0,00	0,96	0,08	0,04	0,01	996,24	1,16
41,43	25,69	0,10	0,01	0,93	0,08	0,04	0,01	996,52	1,17
42,18	28,10	0,10	0,02	0,83	0,08	0,04	0,01	996,24	1,16
42,97	29,71	0,10	0,03	0,79	0,08	0,04	0,01	996,52	1,17
44,22	32,19	0,10	0,04	0,73	0,08	0,04	0,01	996,79	1,18

Tab. AD1: Dati sperimentali di riferimento per l'analisi delle prestazioni dello SP

Si varia in modo parametrico il titolo x in modo da ricostruire la perdita di carico irreversibile minimizzando lo scarto. Poiché le informazioni della sonda non consentono di caratterizzare la frazione di vuoto vista dal venturi, si preferisce operare attraverso il parametro di Martinelli calcolato con la:

$$\chi^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \quad (\text{AD2})$$

A questo è associato il moltiplicatore bifase:

$$\Phi_g^2 = 1.274479\chi + 1.199561 \quad (\text{AD3})$$

Si corregge la portata in fase gassosa con la:

$$\Delta P_g = \frac{\Delta P_{V_exp}}{\Phi_g^2} \quad \text{che è utilizzata per il calcolo della portata monofase gas vista dal tubo di venturi.}$$

L'applicazione di questa metodologia porta ai risultati di tabella AD2.

x guess	χ^2	χ	Φ_g^2	ΔP_g [mBar]	W_g [kg/s]	W_{tot} [kg/s]	W_l [kg/s]	J_g [m/s]	J_l [m/s]	ΔP_{irr} [mBar]
0,989	0,000	0,020	1,225	13,673	0,072	0,072	0,001	12,153	0,000	8,813
0,943	0,002	0,045	1,257	12,852	0,069	0,073	0,004	11,783	0,001	10,212
0,950	0,002	0,042	1,253	12,530	0,068	0,072	0,004	11,634	0,001	9,772
0,934	0,002	0,049	1,262	12,214	0,067	0,072	0,005	11,486	0,001	9,913
0,842	0,006	0,080	1,302	11,738	0,066	0,078	0,012	11,260	0,002	10,814
0,986	0,000	0,022	1,227	22,541	0,092	0,093	0,001	15,604	0,000	14,594
0,976	0,001	0,029	1,237	22,253	0,091	0,093	0,002	15,504	0,000	15,502
0,946	0,002	0,044	1,256	21,568	0,090	0,095	0,005	15,264	0,001	16,682
0,803	0,008	0,092	1,316	20,236	0,087	0,108	0,021	14,785	0,004	18,849
0,967	0,001	0,034	1,243	33,072	0,110	0,114	0,004	18,901	0,001	23,333
0,946	0,002	0,044	1,256	33,315	0,111	0,117	0,006	18,971	0,001	25,170
0,885	0,004	0,067	1,285	33,028	0,111	0,126	0,014	18,889	0,003	27,846
0,805	0,008	0,091	1,316	32,926	0,111	0,138	0,027	18,860	0,005	30,001
0,615	0,021	0,146	1,386	31,467	0,108	0,176	0,068	18,437	0,014	32,403
0,982	0,001	0,025	1,231	12,090	0,066	0,067	0,001	11,428	0,000	8,131
0,936	0,002	0,048	1,261	12,305	0,067	0,072	0,005	11,529	0,001	9,864
0,904	0,004	0,060	1,276	12,556	0,068	0,075	0,007	11,646	0,001	10,640
0,827	0,007	0,085	1,307	12,741	0,068	0,083	0,014	11,732	0,003	11,789
0,968	0,001	0,034	1,242	21,154	0,088	0,091	0,003	15,117	0,001	15,182
0,946	0,002	0,044	1,256	21,313	0,089	0,094	0,005	15,173	0,001	16,408

0,921	0,003	0,054	1,269	21,524	0,089	0,097	0,008	15,248	0,002	17,378
0,879	0,005	0,069	1,287	21,267	0,089	0,101	0,012	15,157	0,002	18,359
0,788	0,009	0,096	1,322	21,806	0,090	0,114	0,024	15,348	0,005	20,422
0,967	0,001	0,034	1,243	33,014	0,110	0,114	0,004	18,885	0,001	23,273
0,932	0,002	0,050	1,263	32,800	0,111	0,119	0,008	18,823	0,002	25,688
0,861	0,006	0,074	1,294	32,589	0,110	0,128	0,018	18,763	0,004	28,102
0,813	0,008	0,089	1,313	32,739	0,111	0,136	0,025	18,806	0,005	29,709
0,710	0,014	0,119	1,351	32,741	0,111	0,157	0,046	18,806	0,009	32,187

Tab. AD2: Grandezze ricostruite come osservate dallo SP con la metodologia deterministica

Nelle figure seguenti (AD-1, AD-2, AD-3) si riporta il confronto tra quanto calcolato e misurato per la portata in fase gas, in fase liquida e per il titolo.

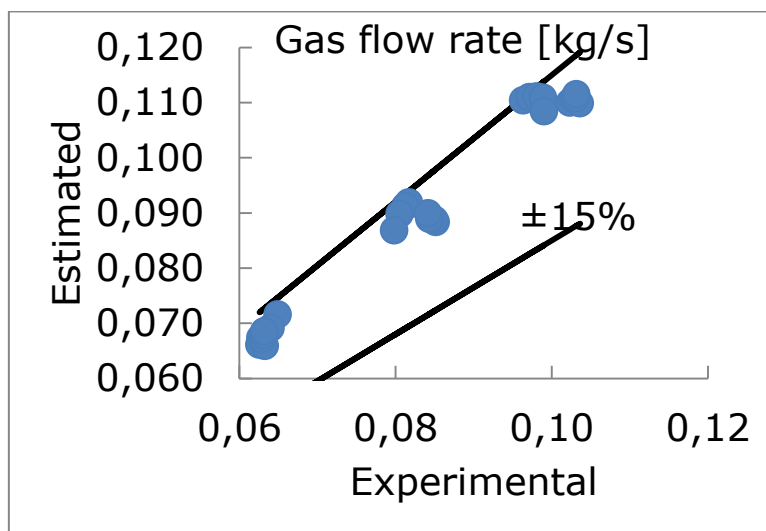


Fig. AD-1: Confronto tra i dati sperimentali e stimati per la fase gas

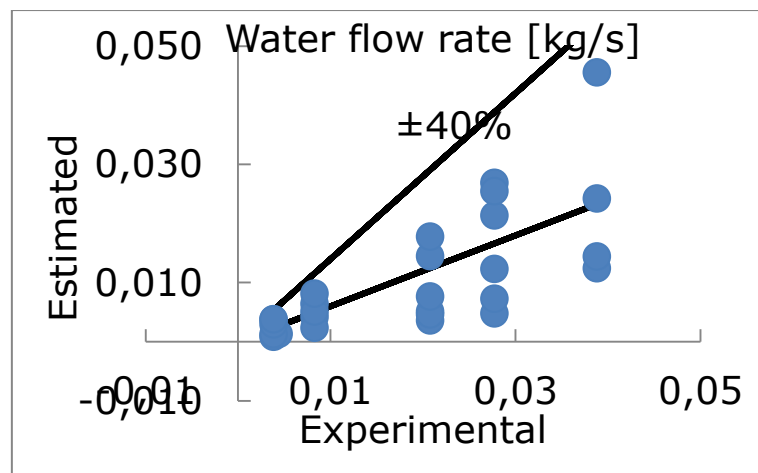


Fig. AD-2: Confronto tra le portate sperimentali e stimate per la fase liquida

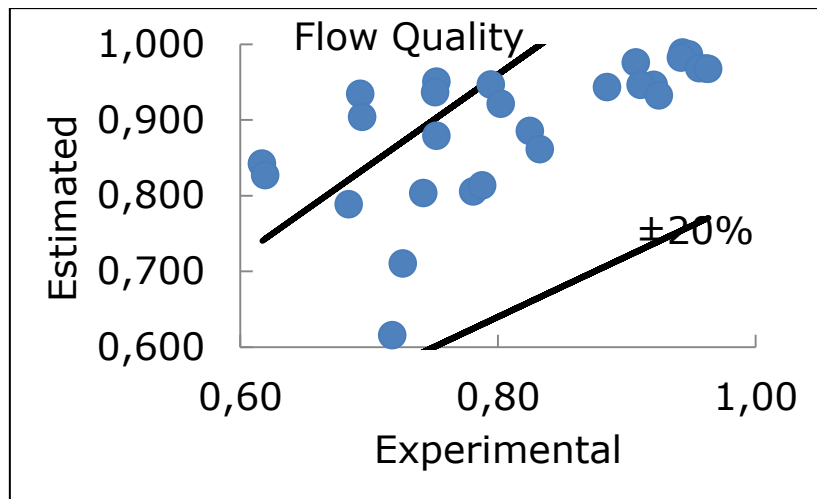


Fig. AD-3: Confronto tra titolo sperimentale e stimato sulla base della minimizzazione dell'errore di previsione delle perdite di carico irreversibili

Come già osservato nel rapporto CERSE-POLITO RL 1568/2014, l'incertezza nella stima della portata in fase liquida e del titolo non è trascurabile. Si ritiene che la riduzione delle incertezze sia possibile attraverso lo studio statistico dei segnali (in termini di scarto quadratico medio), con una migliore accuratezza della misura della pressione differenziale irreversibile e modificando la struttura della correlazione, introducendo, per esempio, un fattore che consideri l'influenza della frazione di vuoto.

L'approccio seguito ha permesso di acquisire una notevole confidenza nella acquisizione dei dati dello SP dal punto di vista statistico e deterministico. La metodologia descritta precedentemente permetterà di calibrare le relazioni di best-fit in modo tale da ridurre le incertezze di stima delle due portate, dopo aver identificato il regime di esercizio dello SP.

APPENDICE: Caratterizzazione degli aspetti stocastici dei segnali associati ai trasduttori di pressione.

Questo tipo di analisi è stata condotta caratterizzando i segnali nell'intervallo compreso tra il primo secondo di prova sino alla fine della fase di acquisizione in termini di dimensione del campione, valore minimo e massimo, valore medio e mediana, scarto quadratico medio % normalizzato rispetto al valore medio. Queste informazioni sono state rappresentate graficamente con l'ausilio di istogrammi suddividendo il range di variazione dei segnali in dieci classi. Per raggiungere questo obiettivo si è utilizzato il linguaggio di programmazione Python con le librerie scientifiche numpy e scipy e la libreria grafica matplotlib.

Elaborazioni e rappresentazioni simili a quelle presentate sono state effettuate sui segnali della sonda ad impedenza. Inoltre per i segnali della sonda l'elaborazione interessa, i profili dei valori medi per ogni coppia di elettrodi coinvolti nel processo di misura al variare della distanza angolare tra gli elettrodi e lo studio delle differenze rispetto ai segnali ricostruiti.

Nelle tabelle seguenti, per le prove condotte nel 2015, si sintetizzano i risultati ottenuti.

Prova : nome	1507928B_1.dat			
Dimensioni campione	124650			
Frequenza inverter Hz	0.0			
Portata in fase liquida kg/h	0.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	0.004	0.002	0.002	0.002
Valore massimo V	2.268	1.037	1.115	1.087
Valore medio V	2.0008	0.9487	1.0293	0.9965
Mediana V	2.001	0.948	1.029	0.997
Scarto quadratico medio %	0.6888	2.50	0.688	0.874

Prova : nome	1507928B_2.dat			
Dimensioni campione	151150			
Frequenza inverter Hz	30			
Portata in fase liquida kg/h	0.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	2.522	0.781	1.331	1.324
Valore massimo V	2.624	1.158	1.418	1.555
Valore medio V	2.57528	0.95531	1.3593	1.4417
Mediana V	2.576	0.953	1.359	1.442
Scarto quadratico medio %	0.2068	6.3086	0.3262	1.348

Prova : nome	1507928B_3.dat			
Dimensioni campione	145350			
Frequenza inverter Hz	40			
Portata in fase liquida kg/h	0.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	2.966	0.791	1.589	1.594
Valore massimo V	3.076	1.150	1.650	1.809

Valore medio V	3.022	0.9614	1.6180	1.6919
Mediana V	3.022	0.959	1.6180	1.692
Scarto quadratico medio %	0.204	6.6682	0.2809	1.3094

Prova : nome	1507928B_4.dat			
Dimensioni campione	147250			
Frequenza inverter Hz	50			
Portata in fase liquida kg/h	0.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	3.535	0.801	1.890	1.784
Valore massimo V	3.658	1.165	1.969	2.025
Valore medio V	3.59897	0.96868	1.9238	1.9025
Mediana V	3.599	0.967	1.922	1.903
Scarto quadratico medio %	0.1948	5.8768	0.356	1.1341

Prova : nome	1507928B_5.dat			
Dimensioni campione	146450			
Frequenza inverter Hz	30			
Portata in fase liquida kg/h	64.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	2.53	0.823	1.309	1.538
Valore massimo V	2.671	1.085	1.373	1.826
Valore medio V	2.6013	0.9593	1.3334	1.6608
Mediana V	2.601	0.959	1.333	1.660
Scarto quadratico medio %	0.3614	3.422	0.231	1.5637

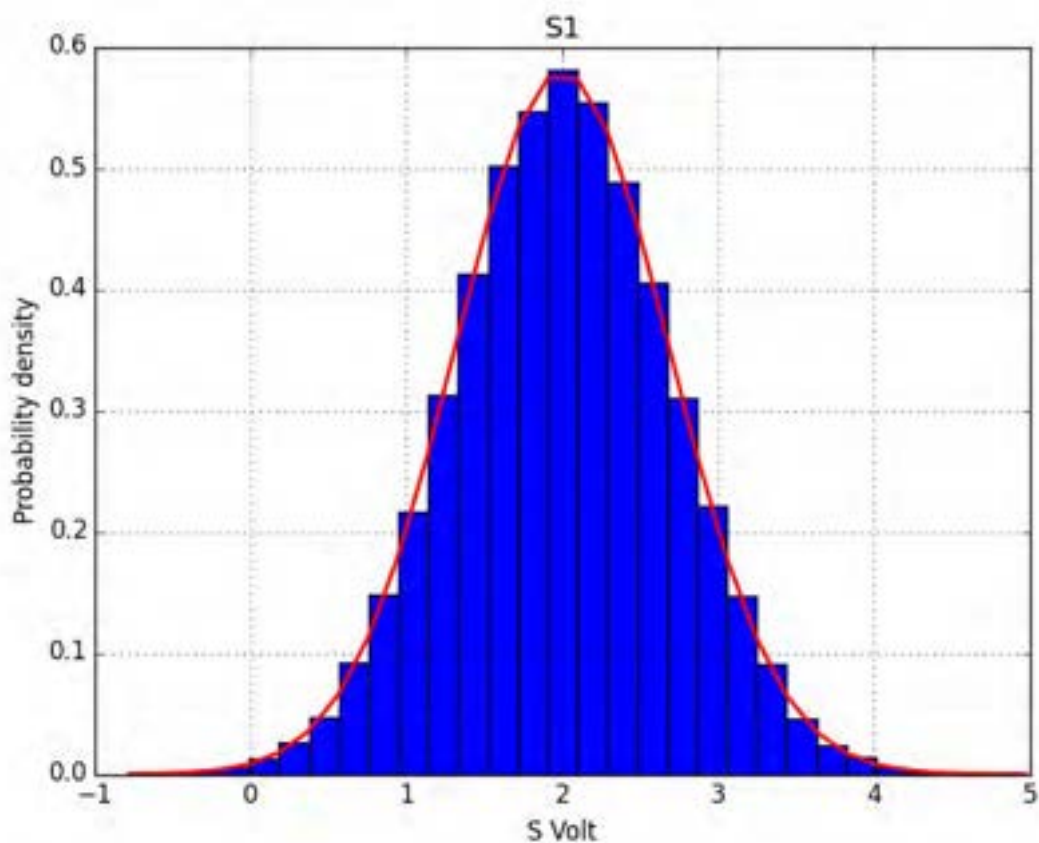
Prova : nome	1507928B_6.dat			
Dimensioni campione	145150			
Frequenza inverter Hz	50			
Portata in fase liquida kg/h	62.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	3.576	0.798	1.888	2.004
Valore massimo V	3.732	1.182	1.937	2.360
Valore medio V	3.65096	0.97676	1.9143	2.1734
Mediana V	3.651	0.974	1.914	2.1740
Scarto quadratico medio %	0.35614	6.6132	0.1507	1.1769

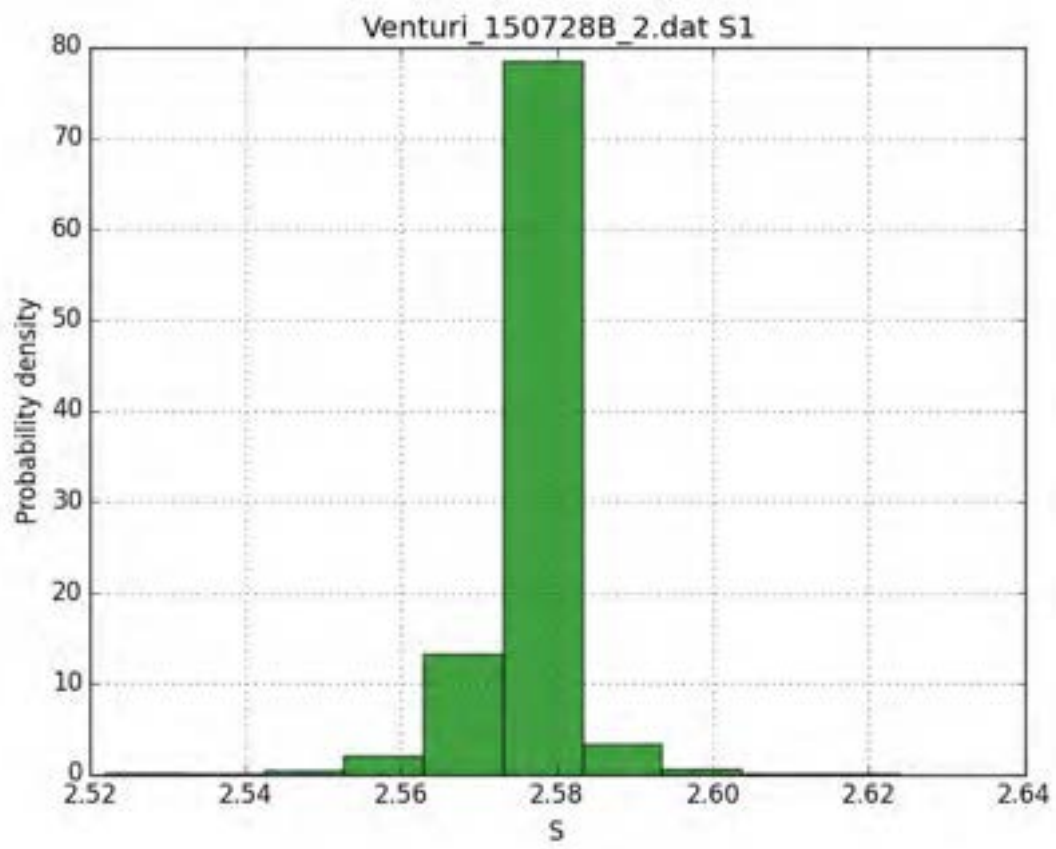
Prova : nome	1507928B_7.dat			
Dimensioni campione	156050			
Frequenza inverter Hz	30			
Portata in fase liquida kg/h	86.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	2.543	0.795	1.308	1.522
Valore massimo V	2.667	1.137	1.364	1.811

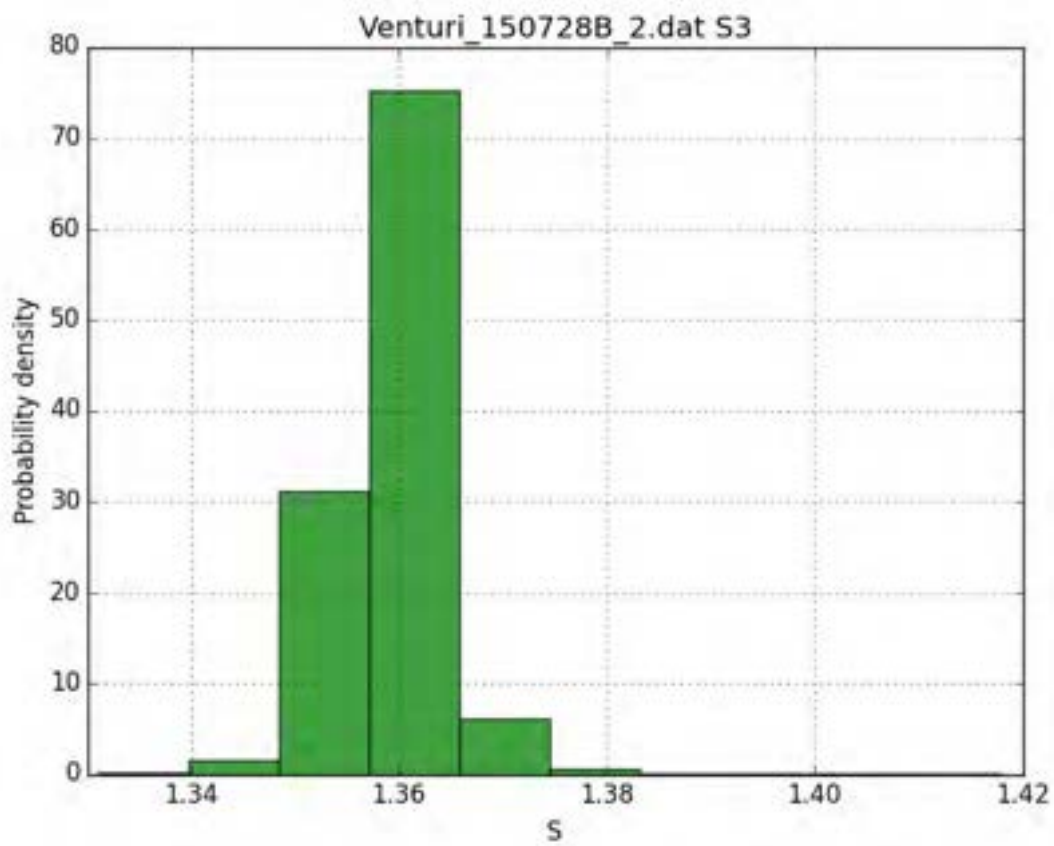
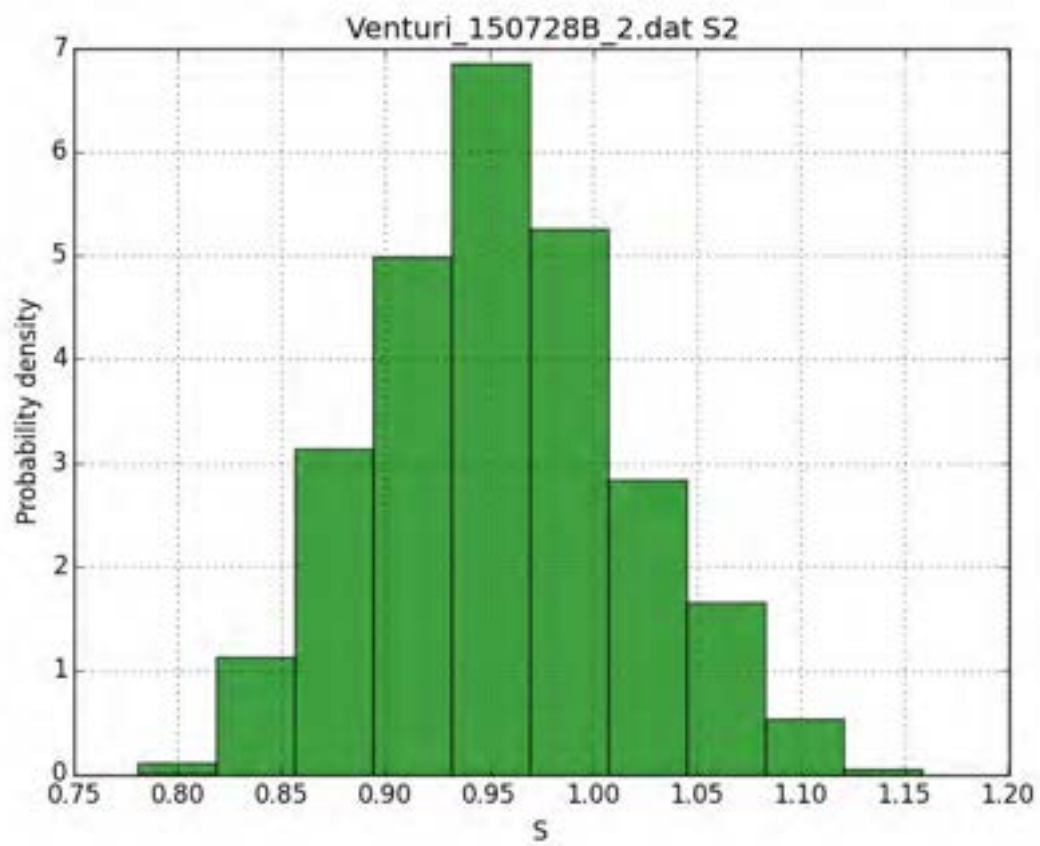
Valore medio V	2.6042	0.9592	1.3305	1.66999
Mediana V	2.604	0.959	1.33	1.669
Scarto quadratico medio %	0.4594	4.1857	0.2298	1.7124

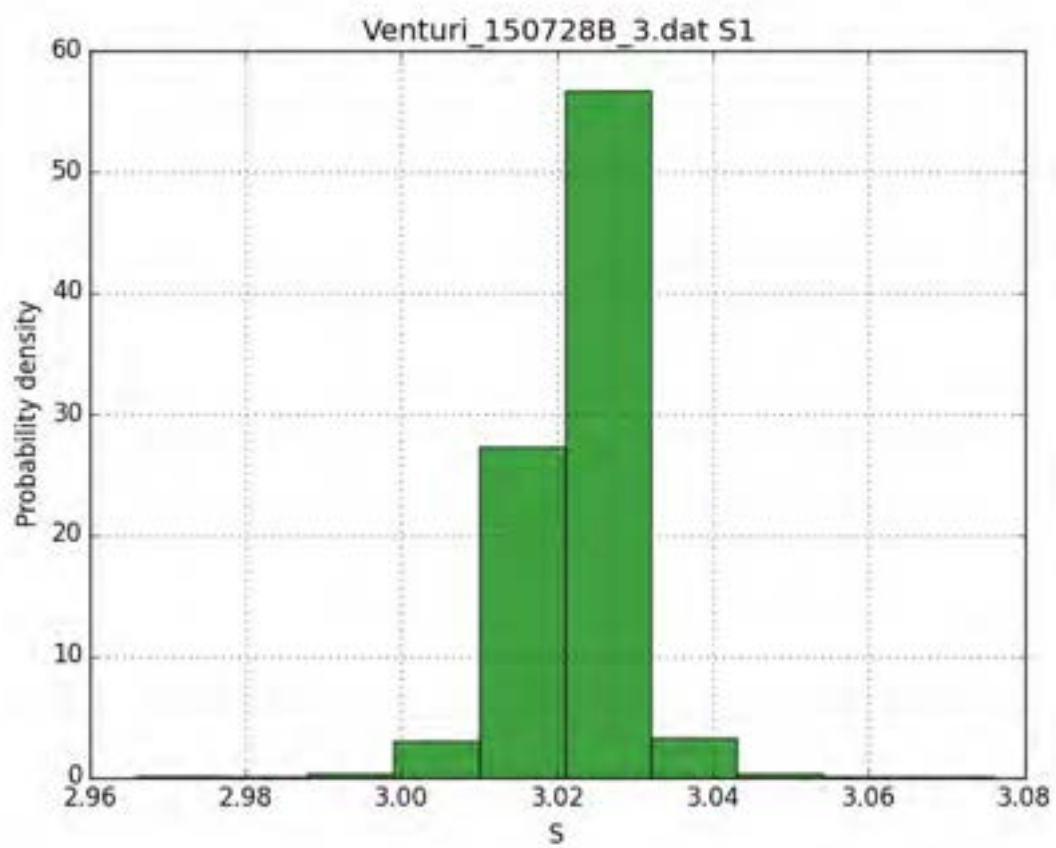
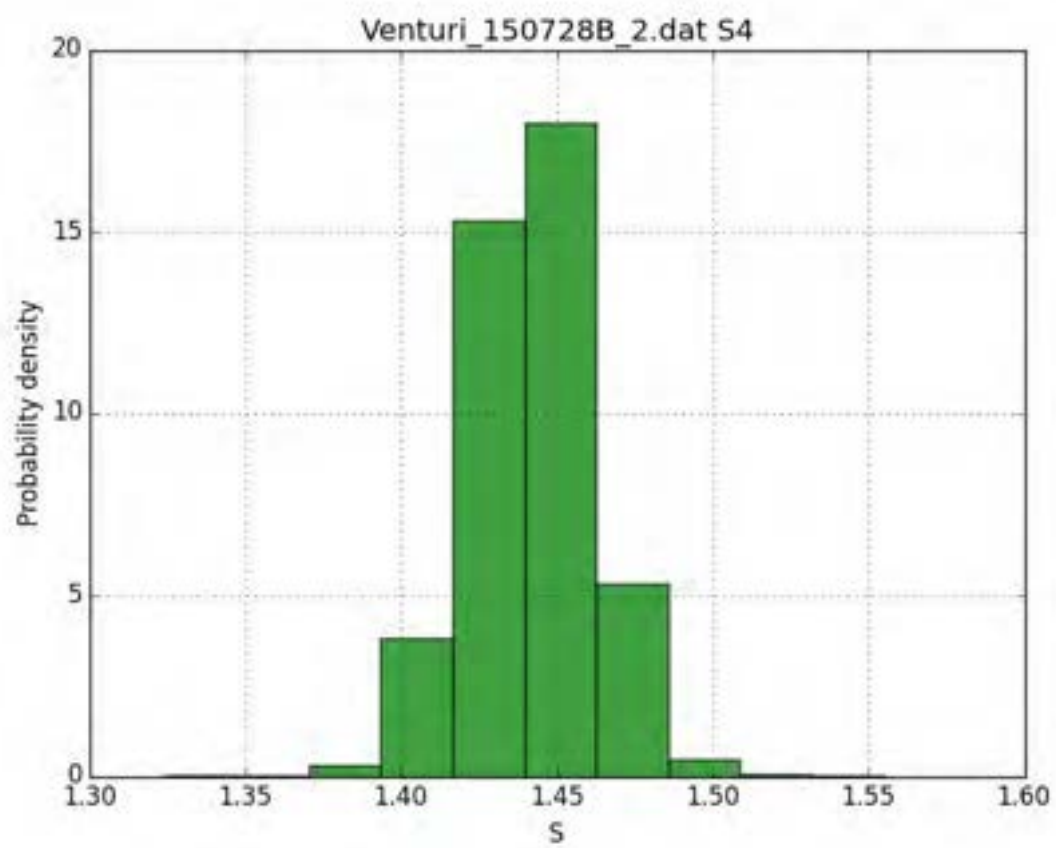
Prova : nome	1507928B_8.dat			
Dimensioni campione	172350			
Frequenza inverter Hz	50			
Portata in fase liquida kg/h	82.0			
Segnale	S1	S2	S3	S4
Valore minimo V	1.998	0.768	1.025	1.298
Valore massimo V	3.741	1.175	1.931	2.335
Valore medio V	3.3425	0.9721	1.7432	2.0329
Mediana V	3.654	0.971	1.906	2.187
Scarto quadratico medio %	19.03	4.690	19.105	16.314

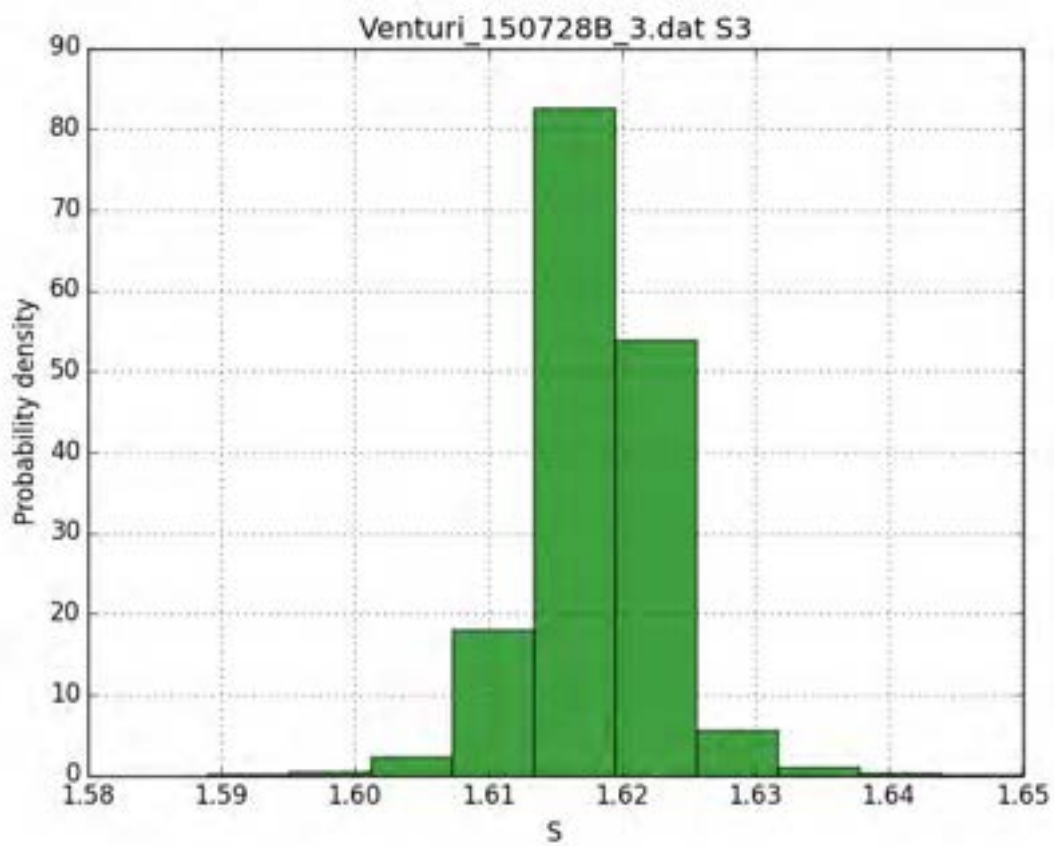
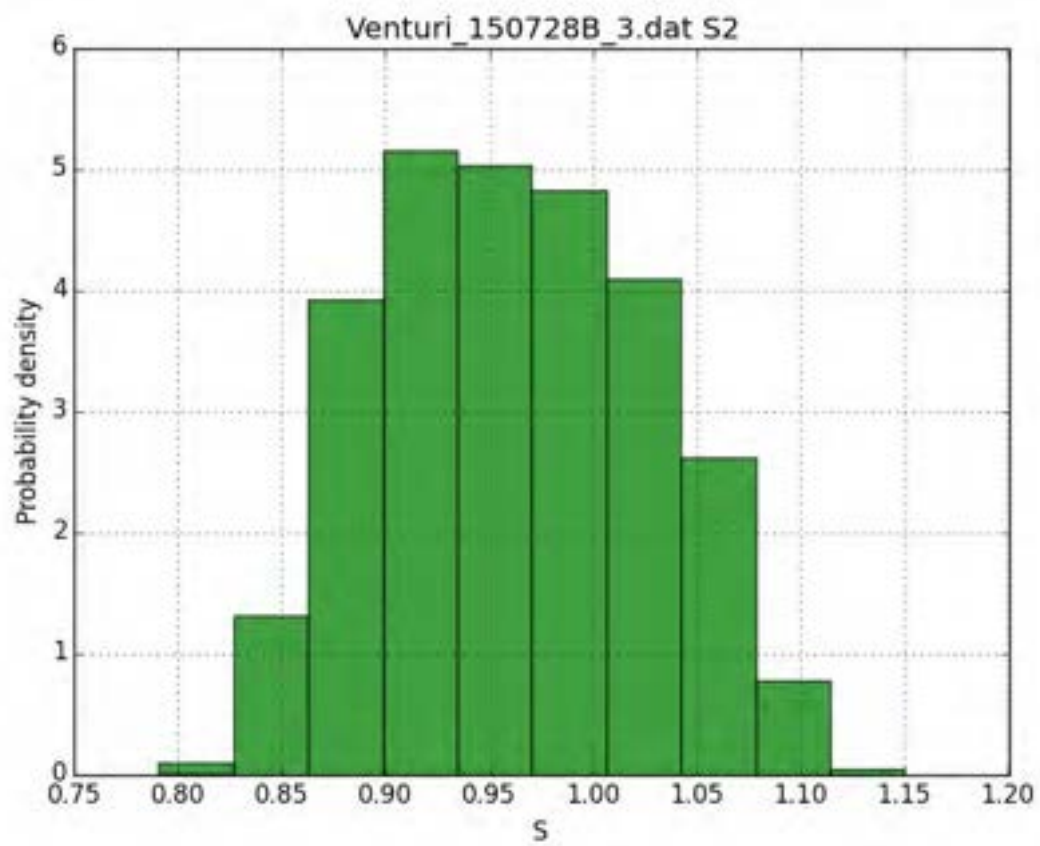
Istogrammi dei segnali per f_inverter=0

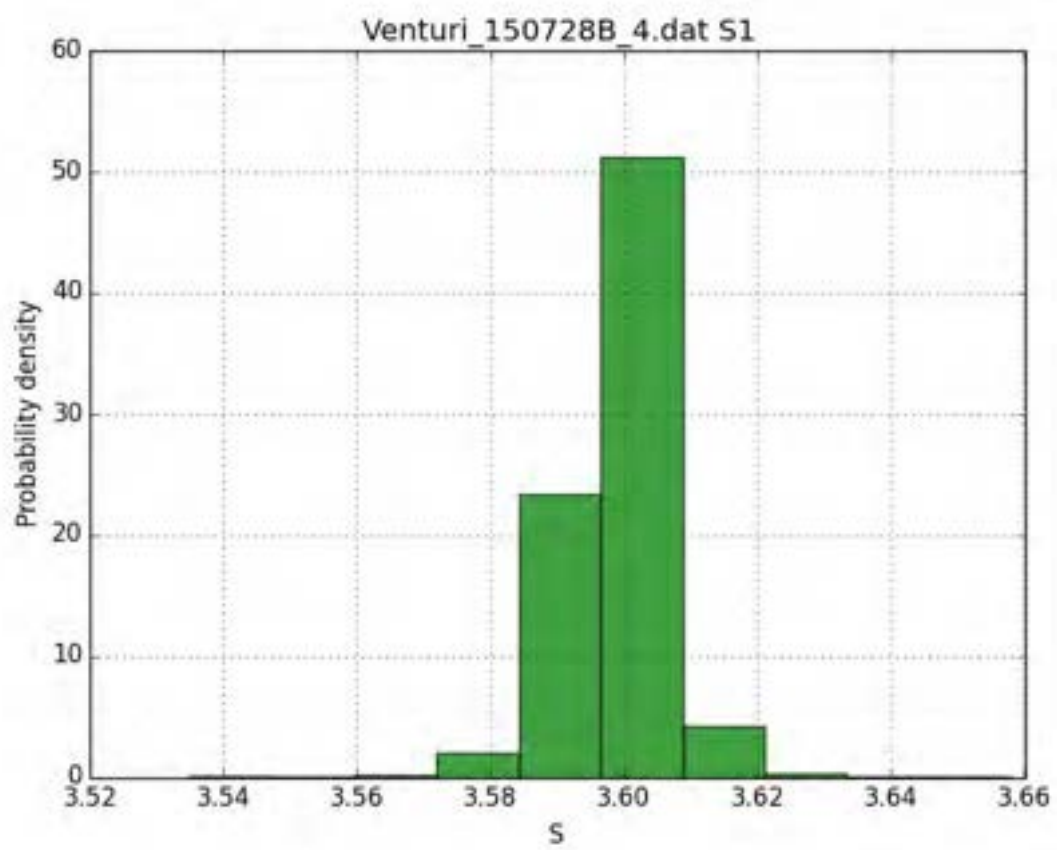
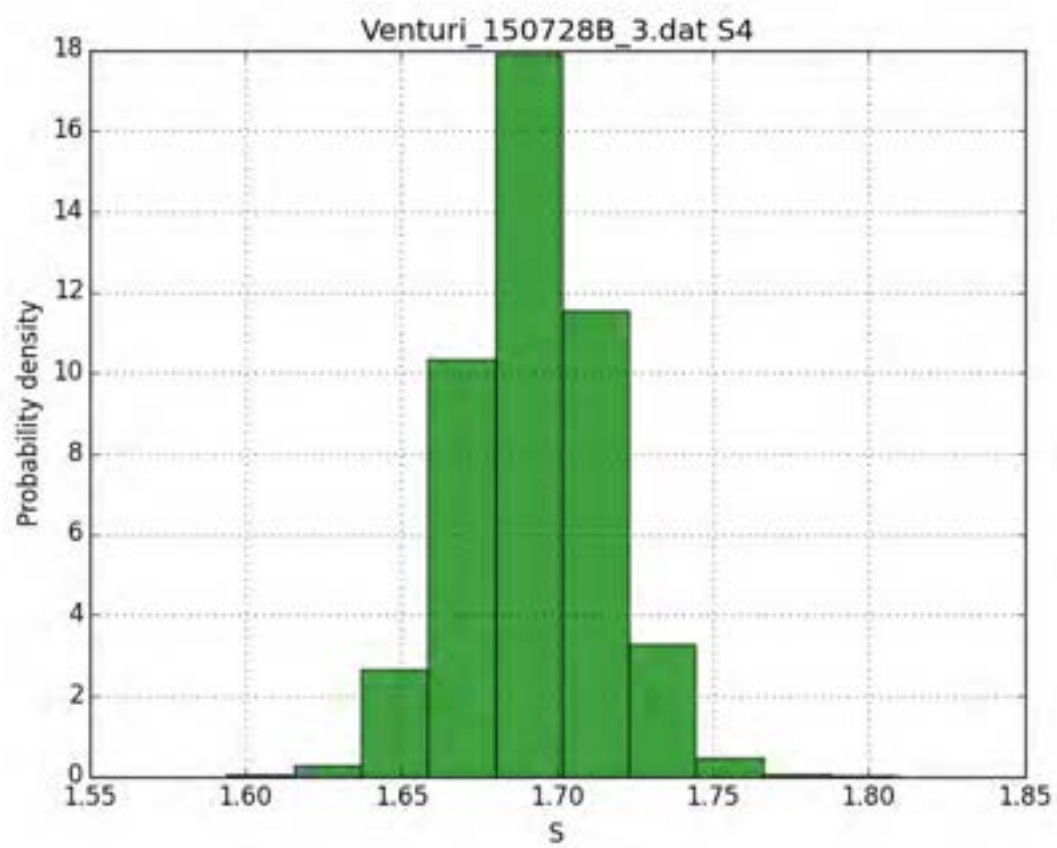


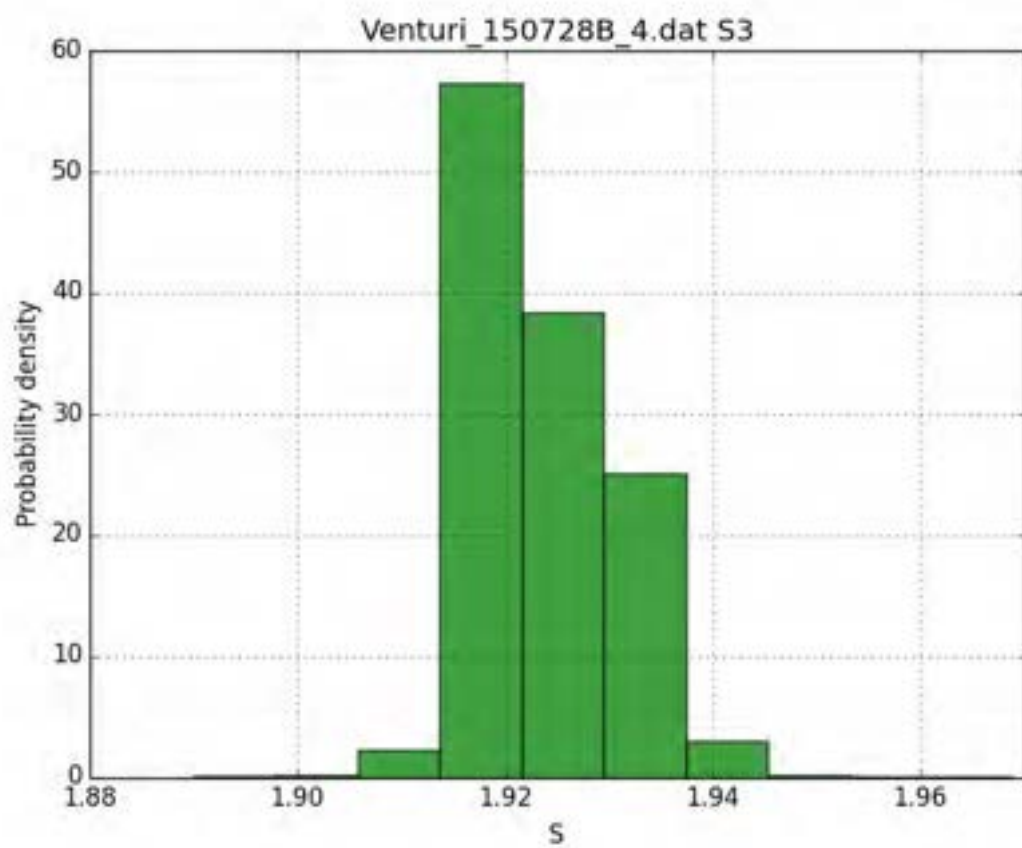
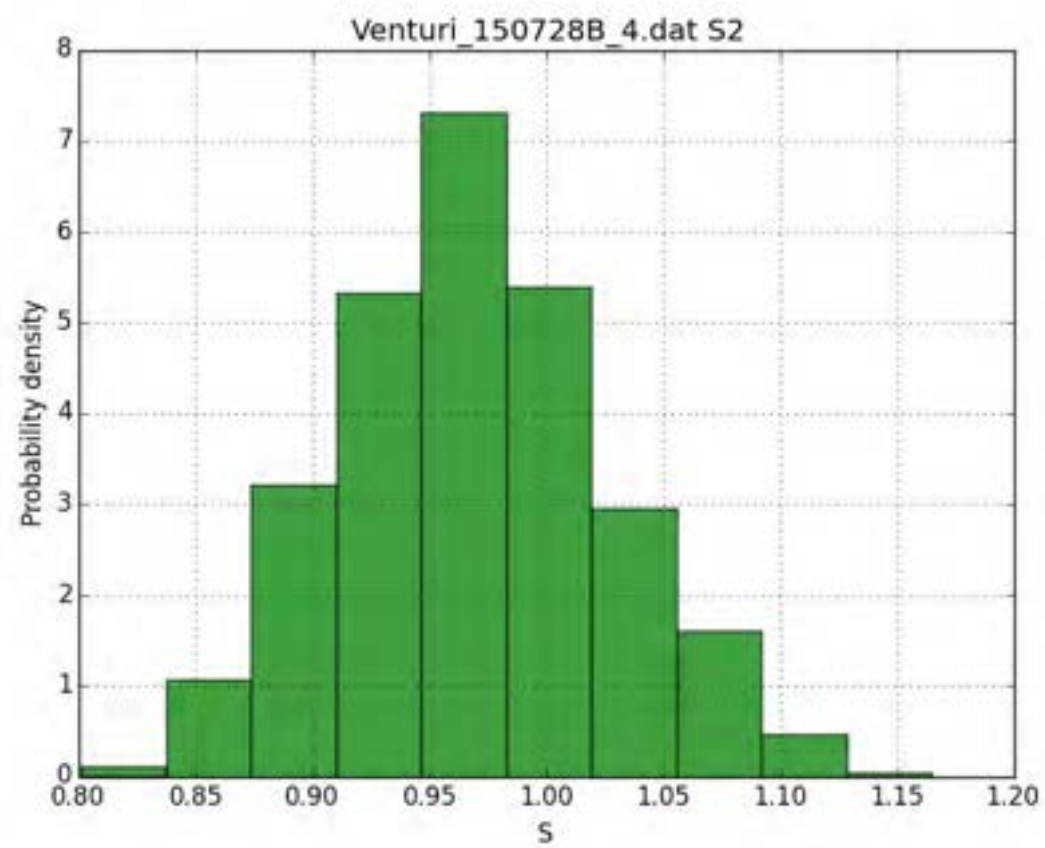


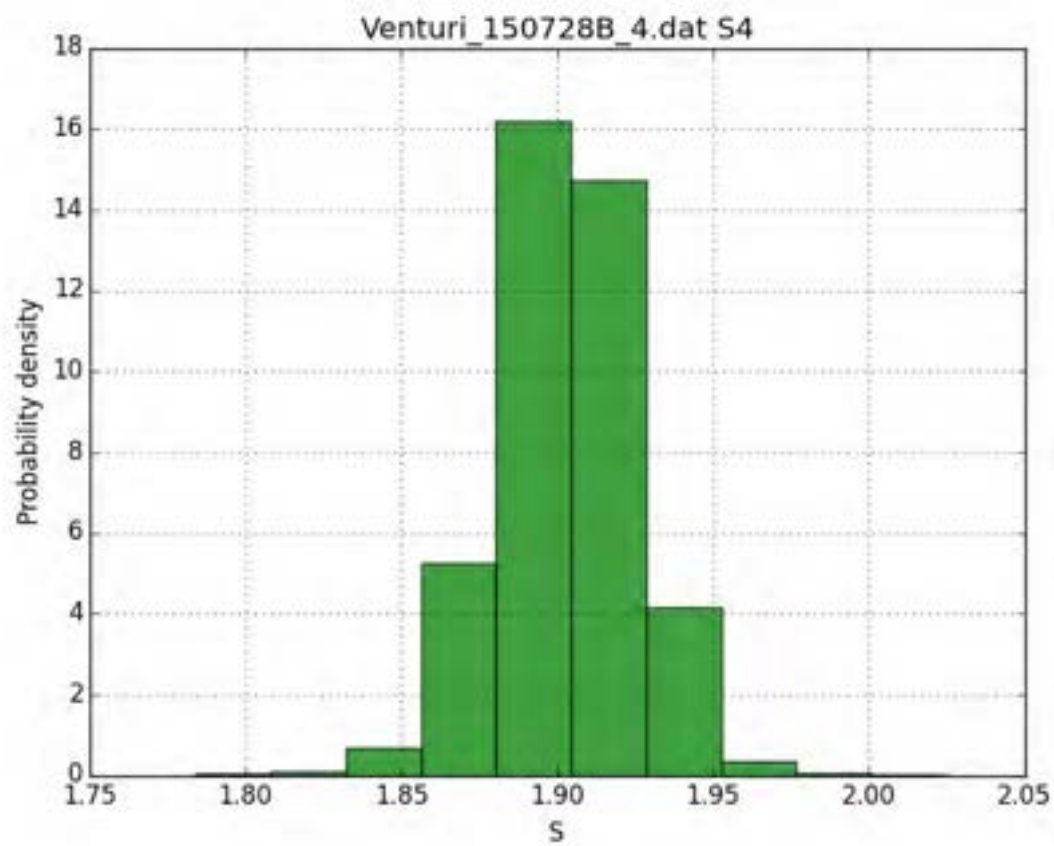
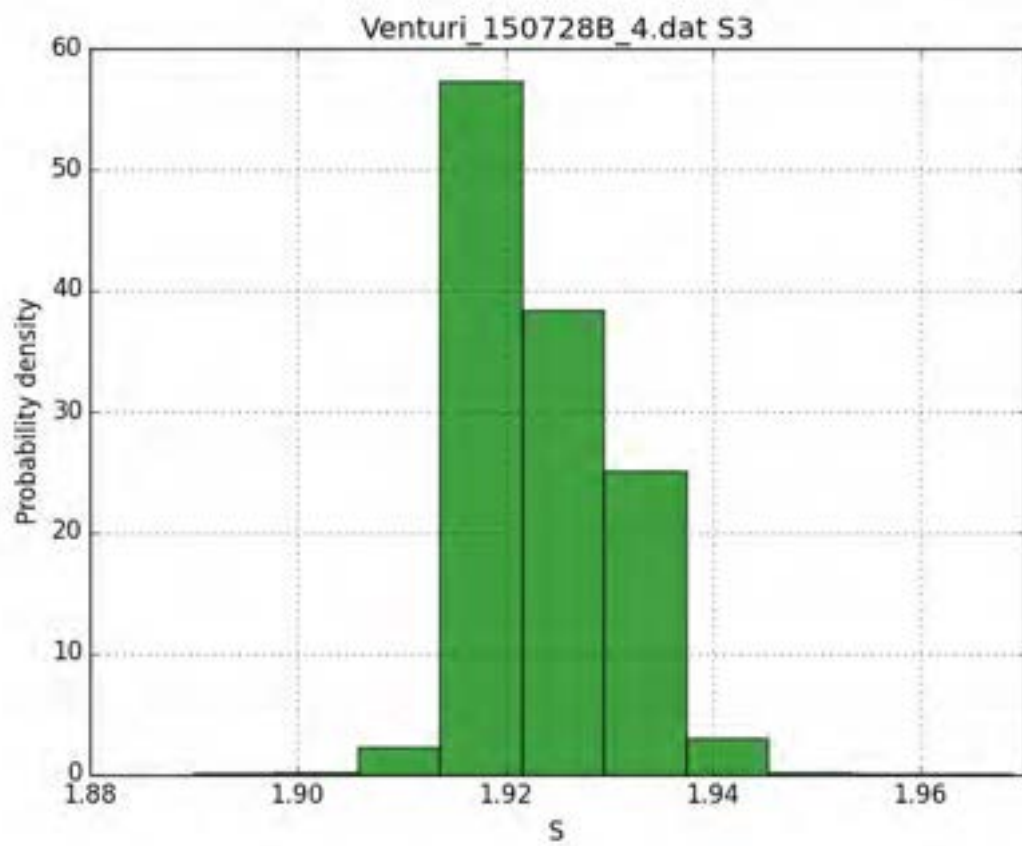


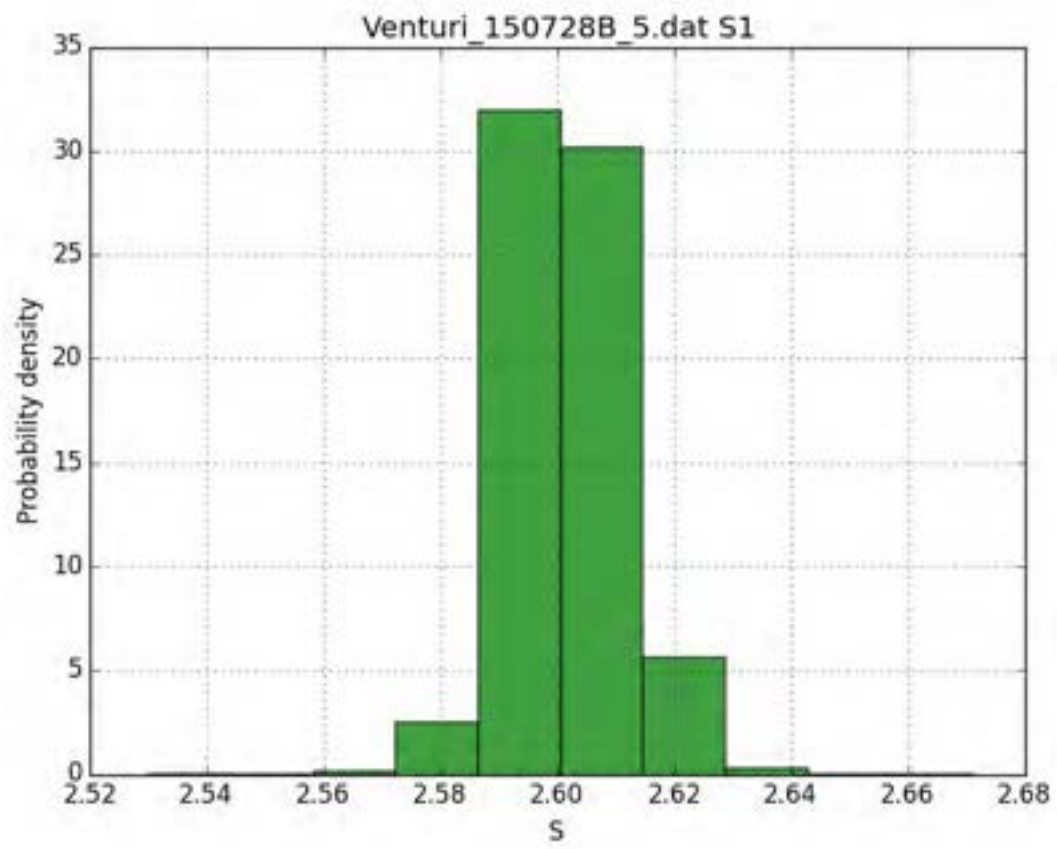


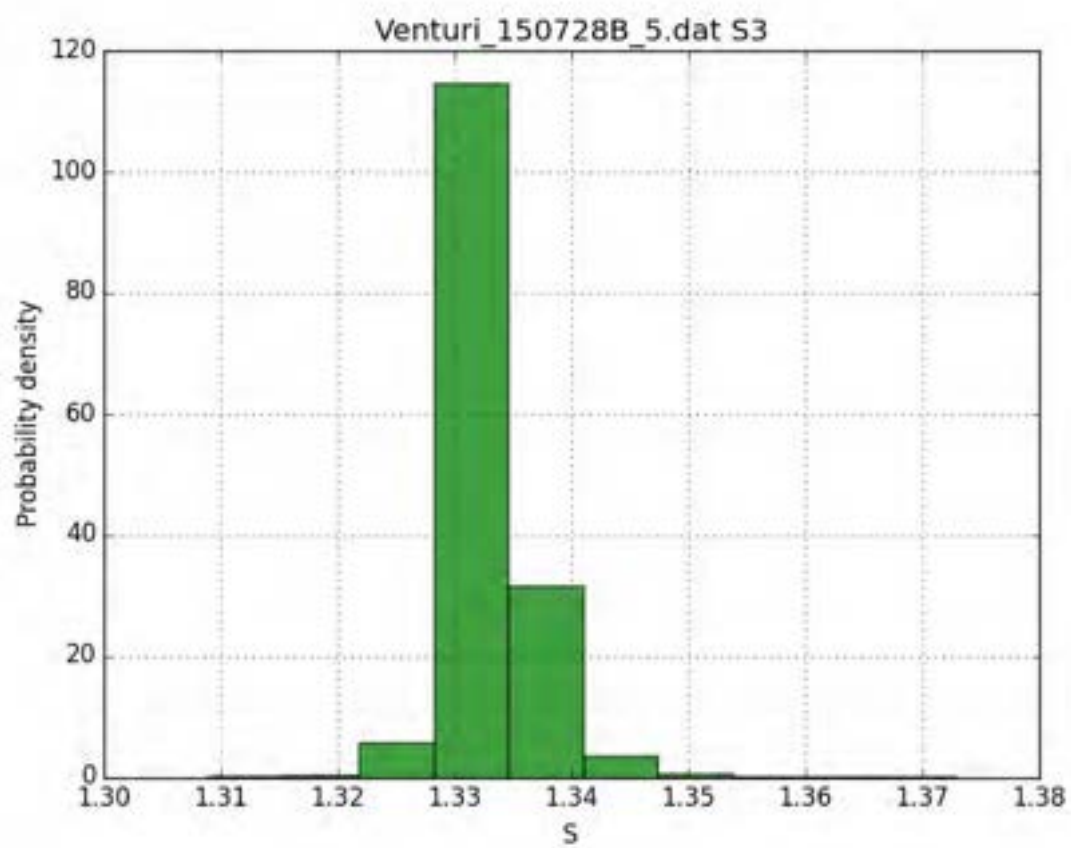
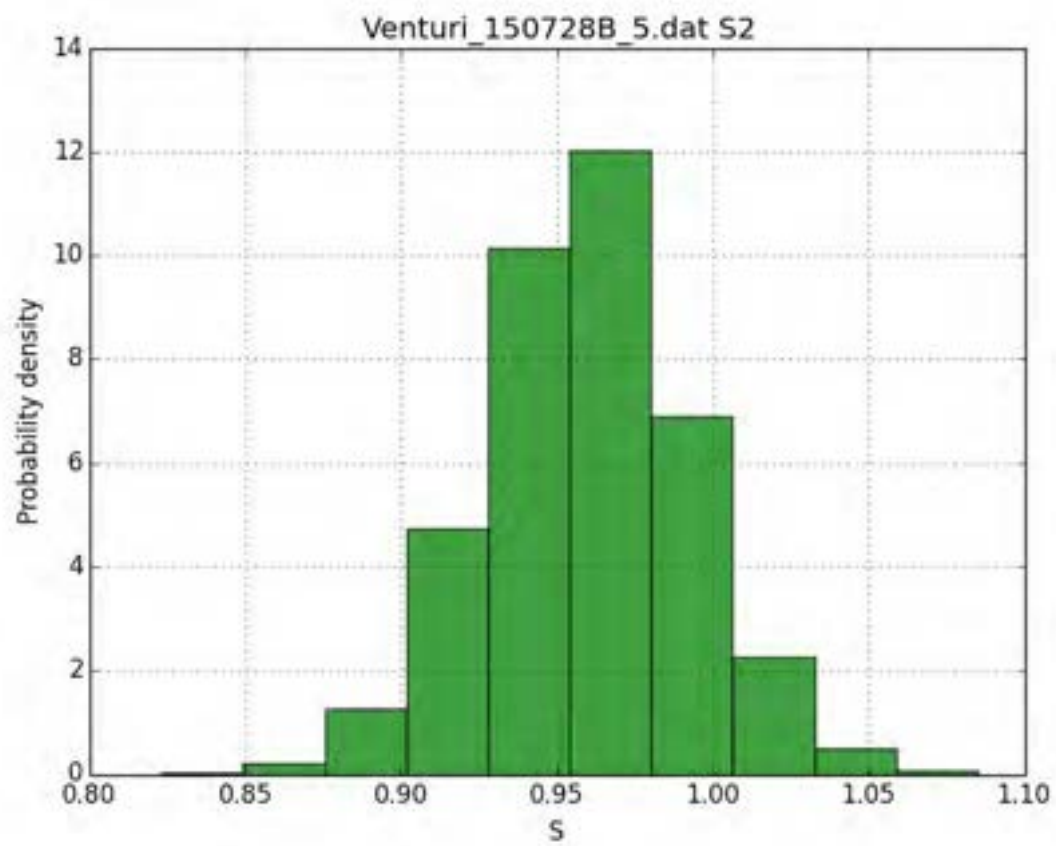


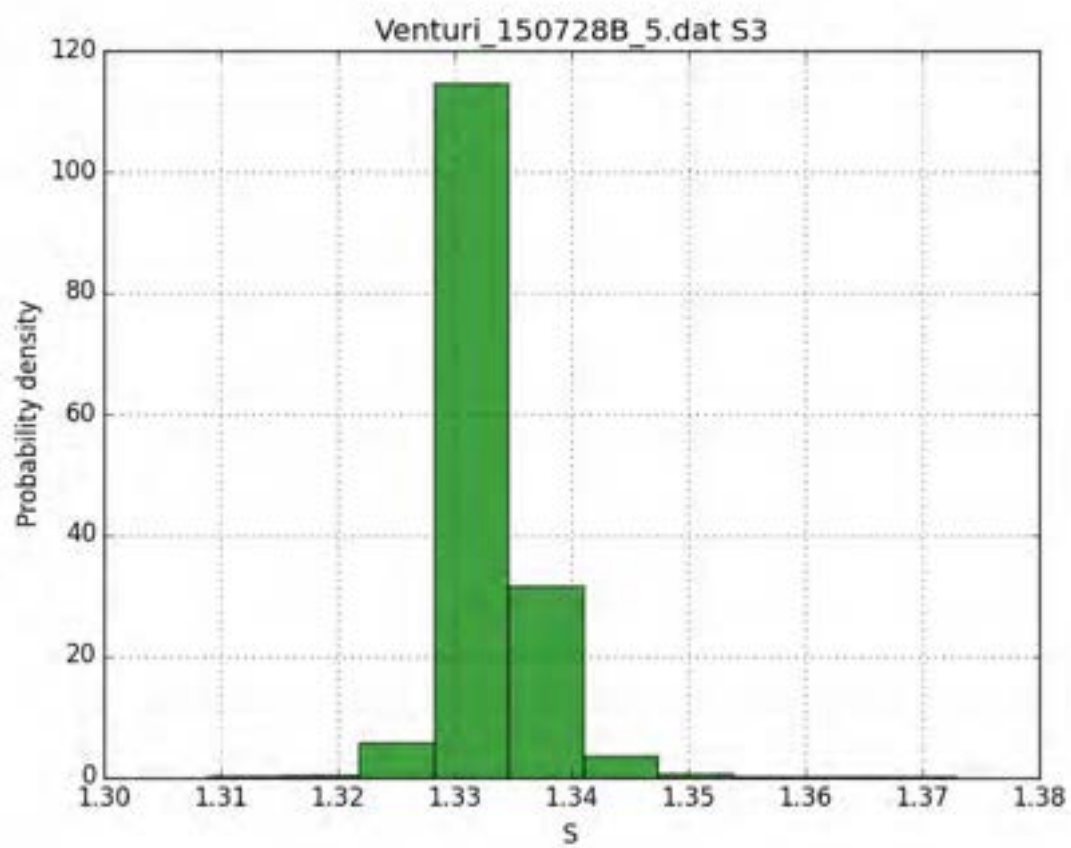
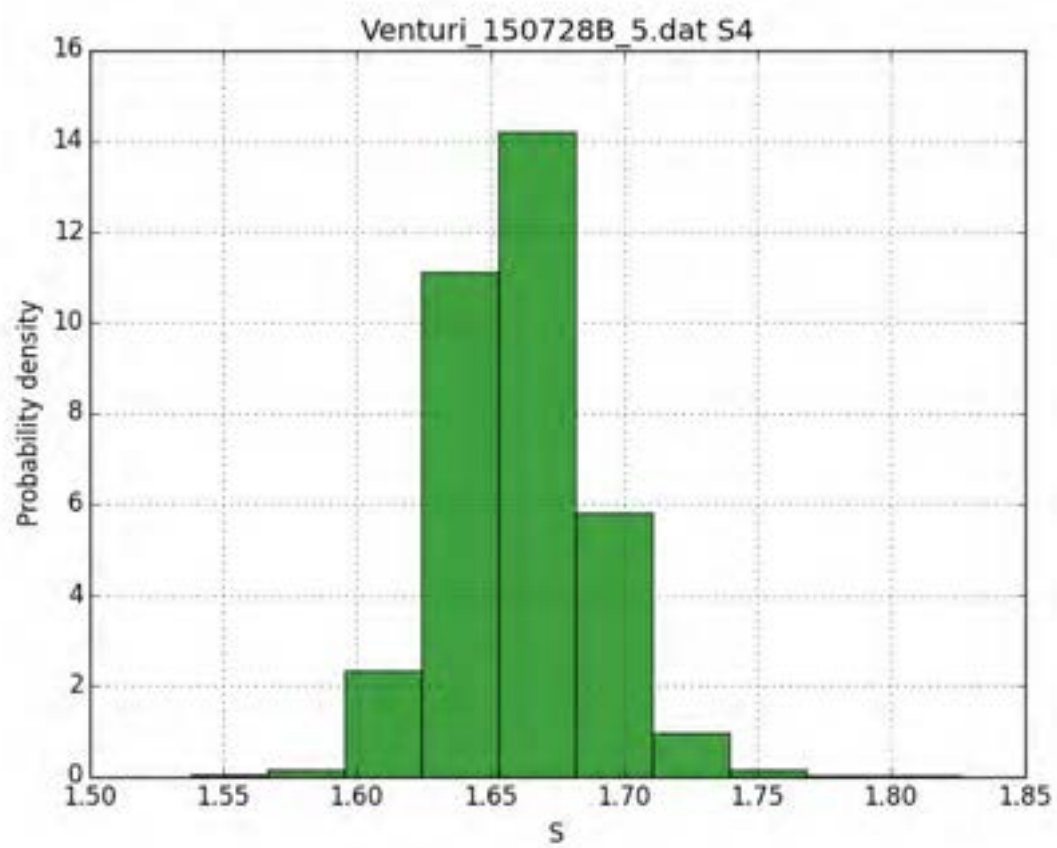


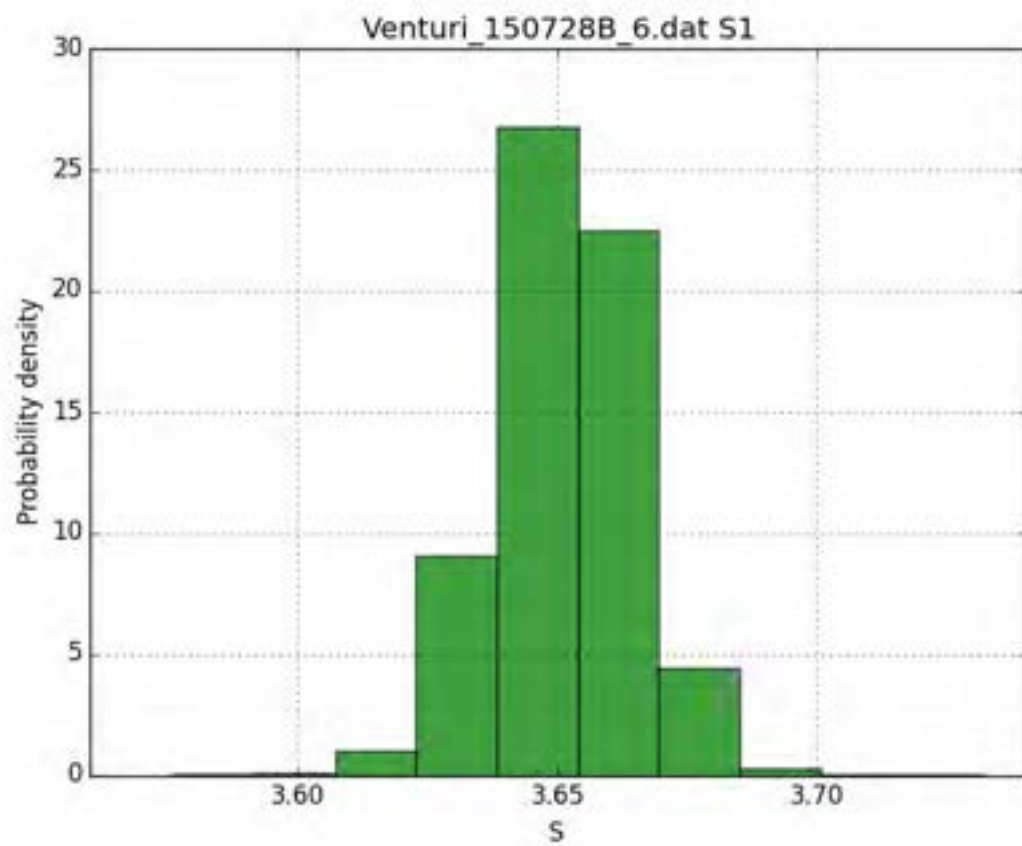
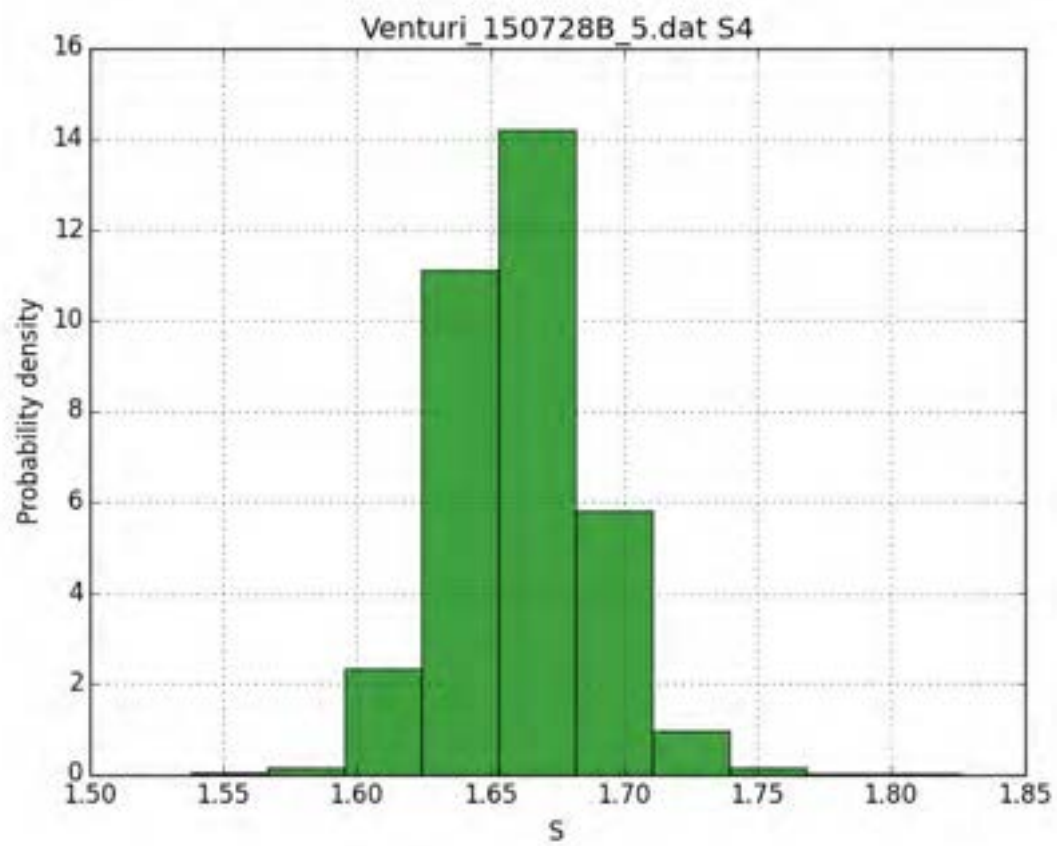


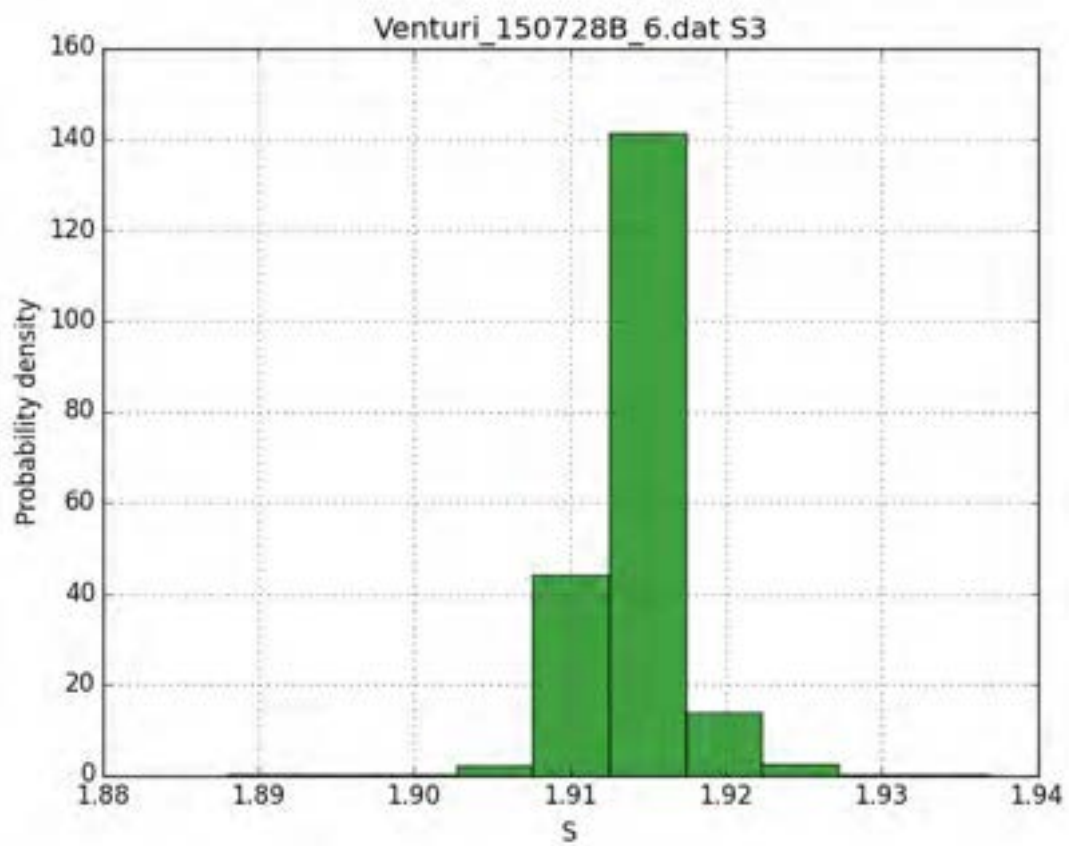
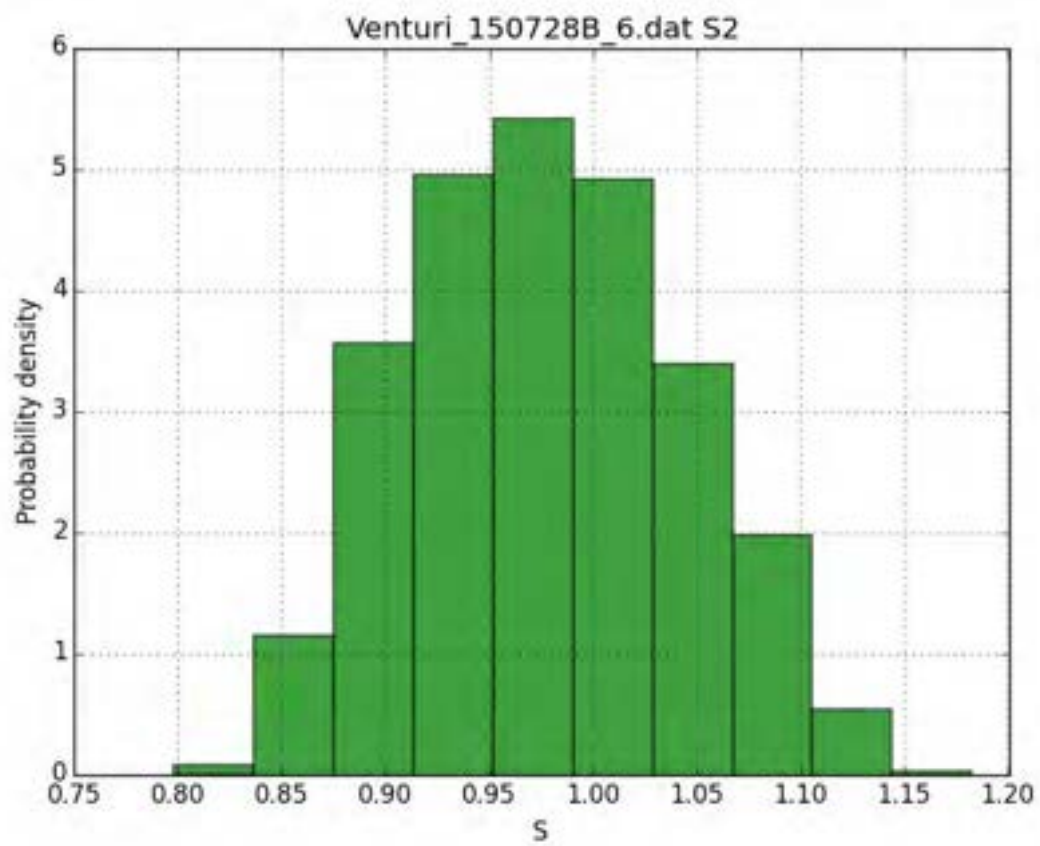


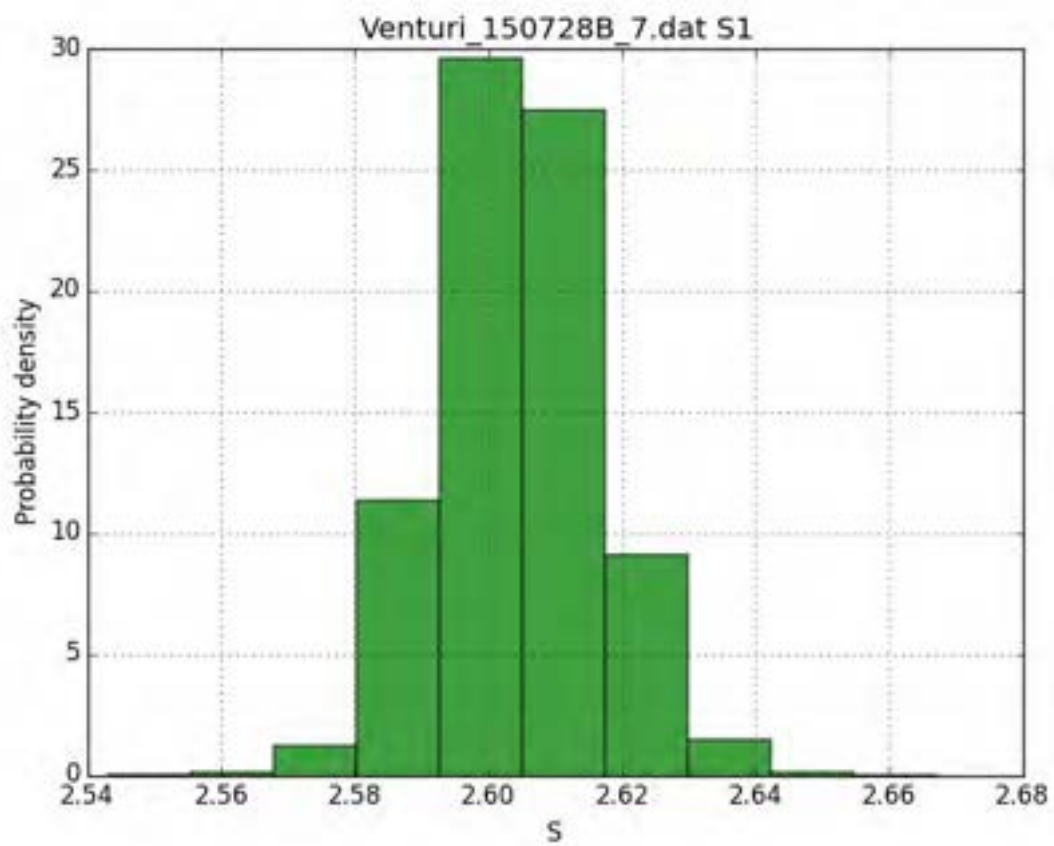
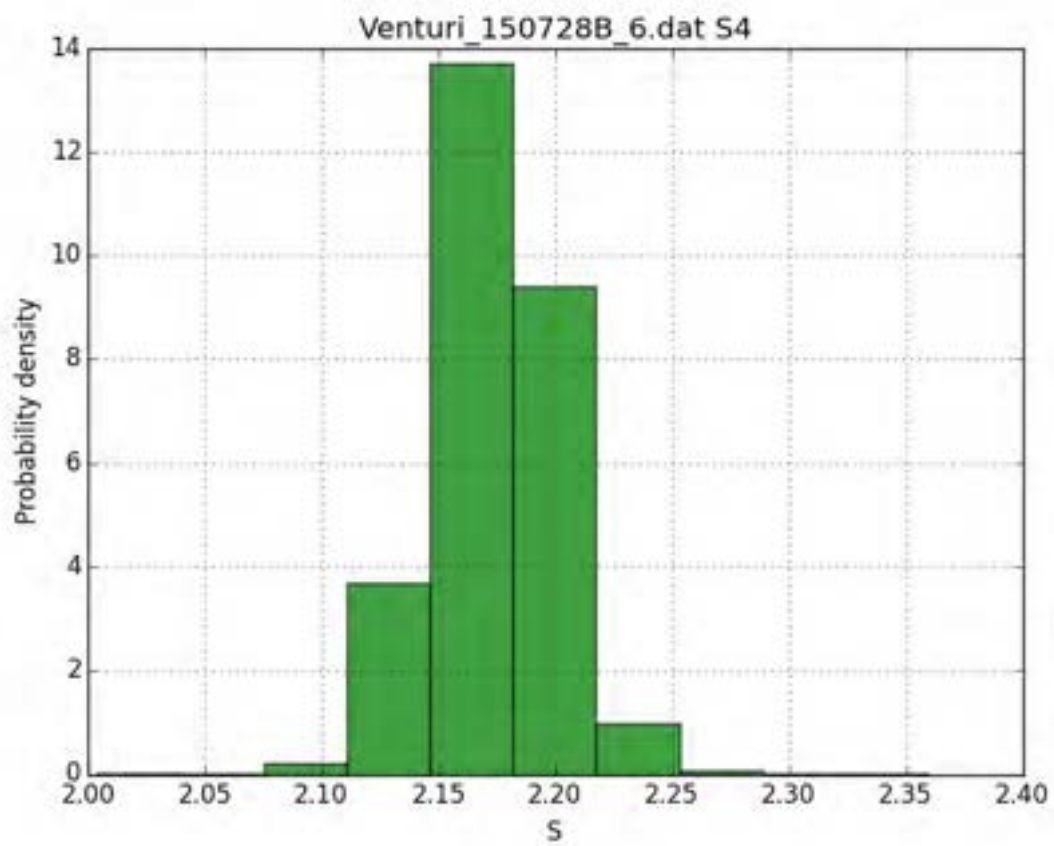


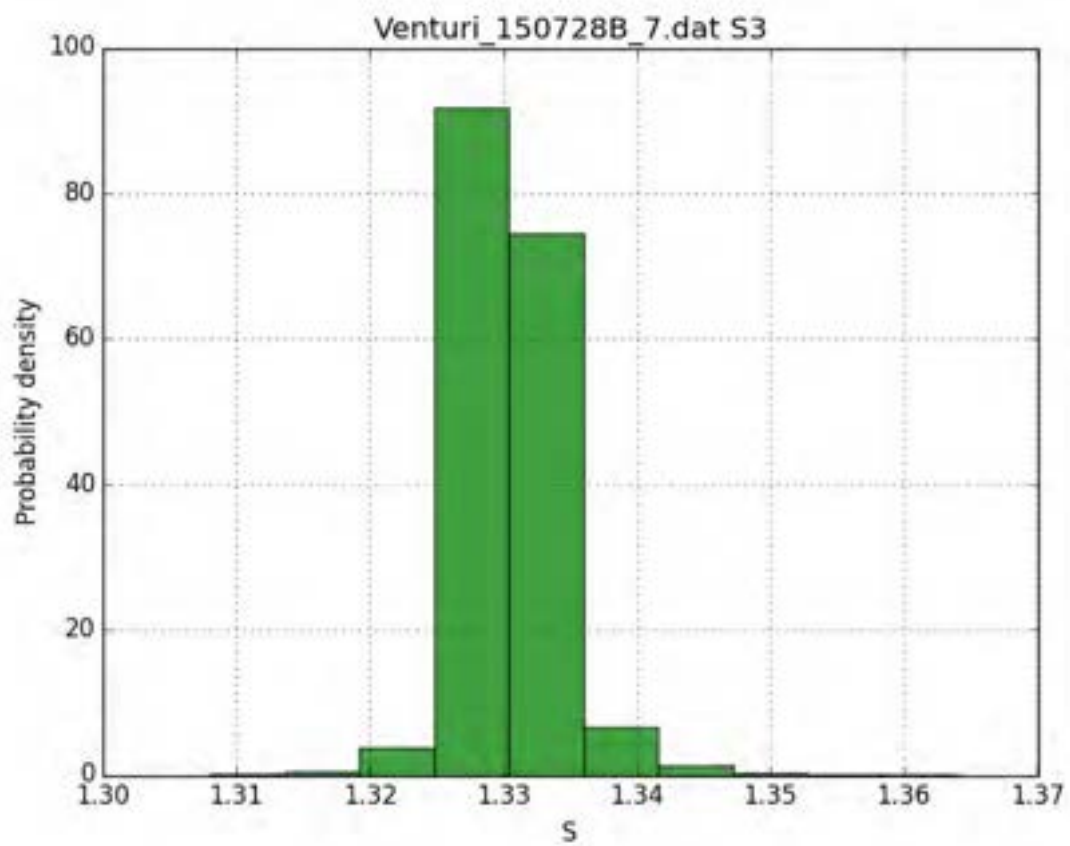
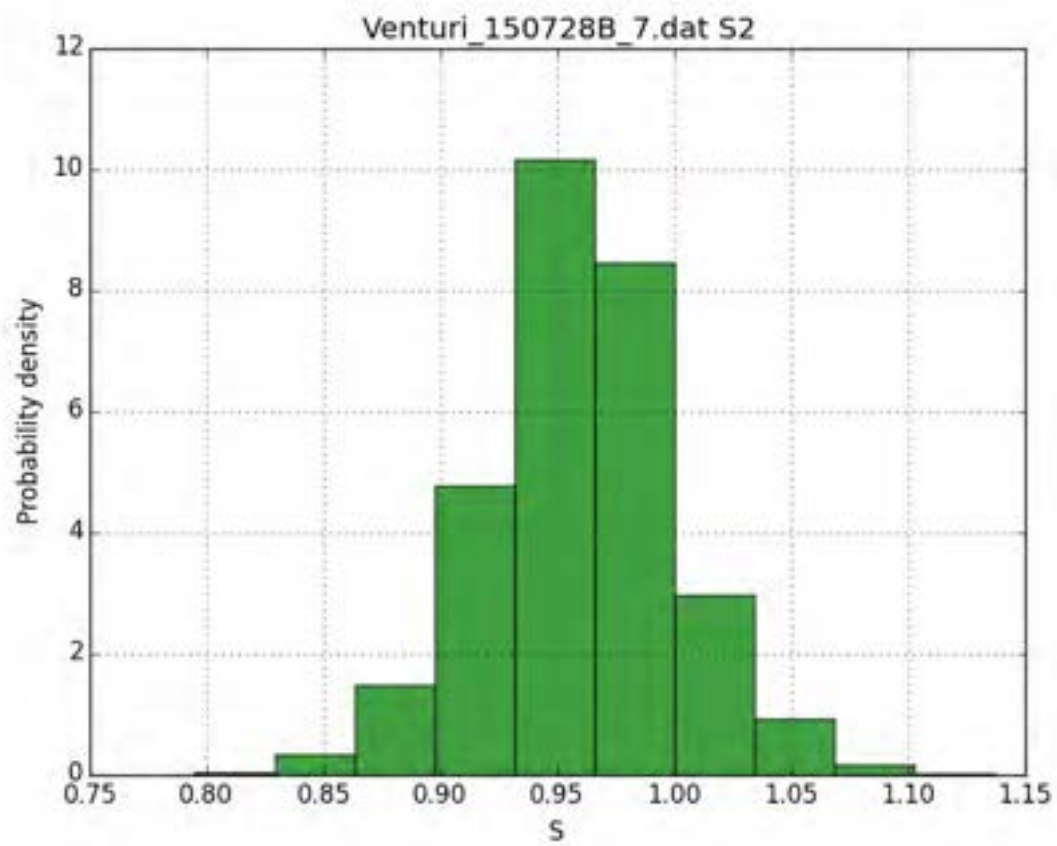


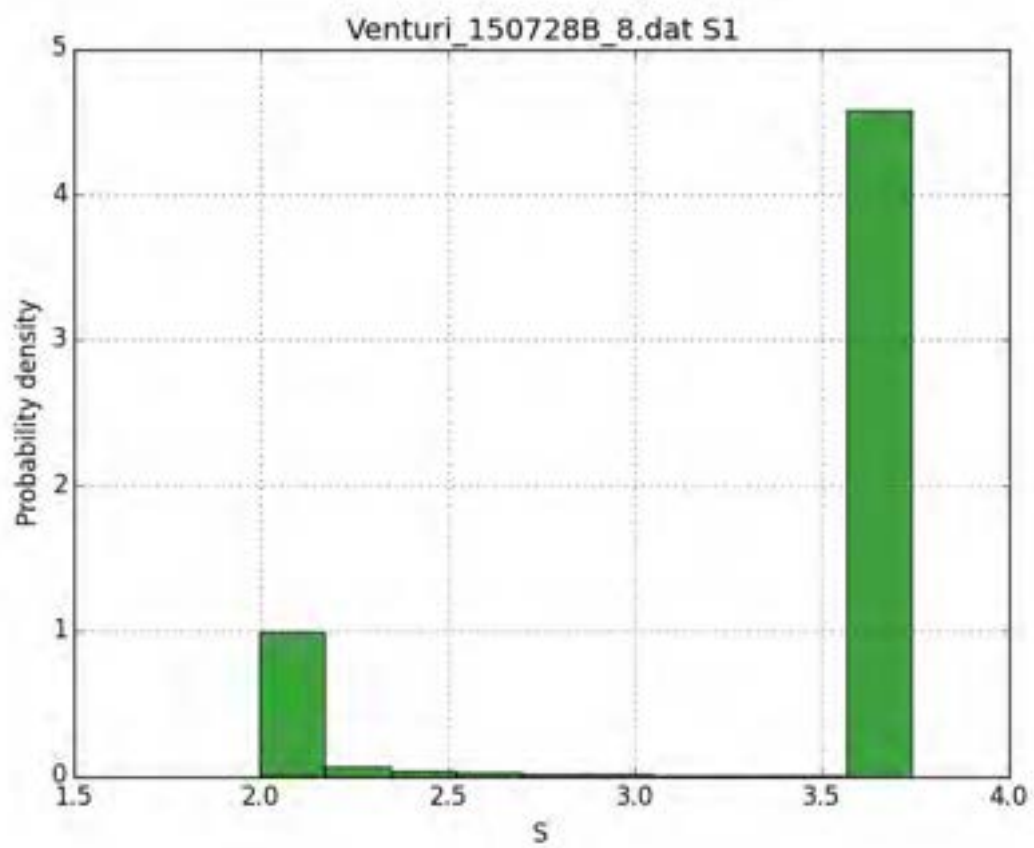
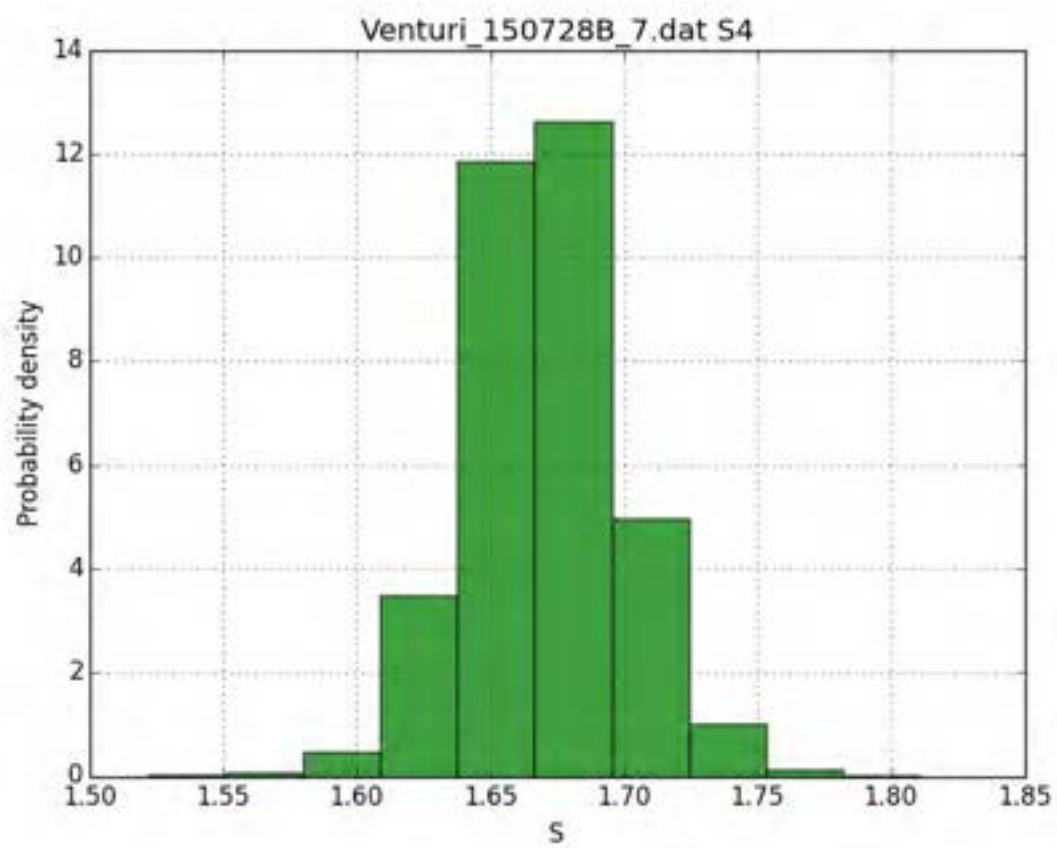


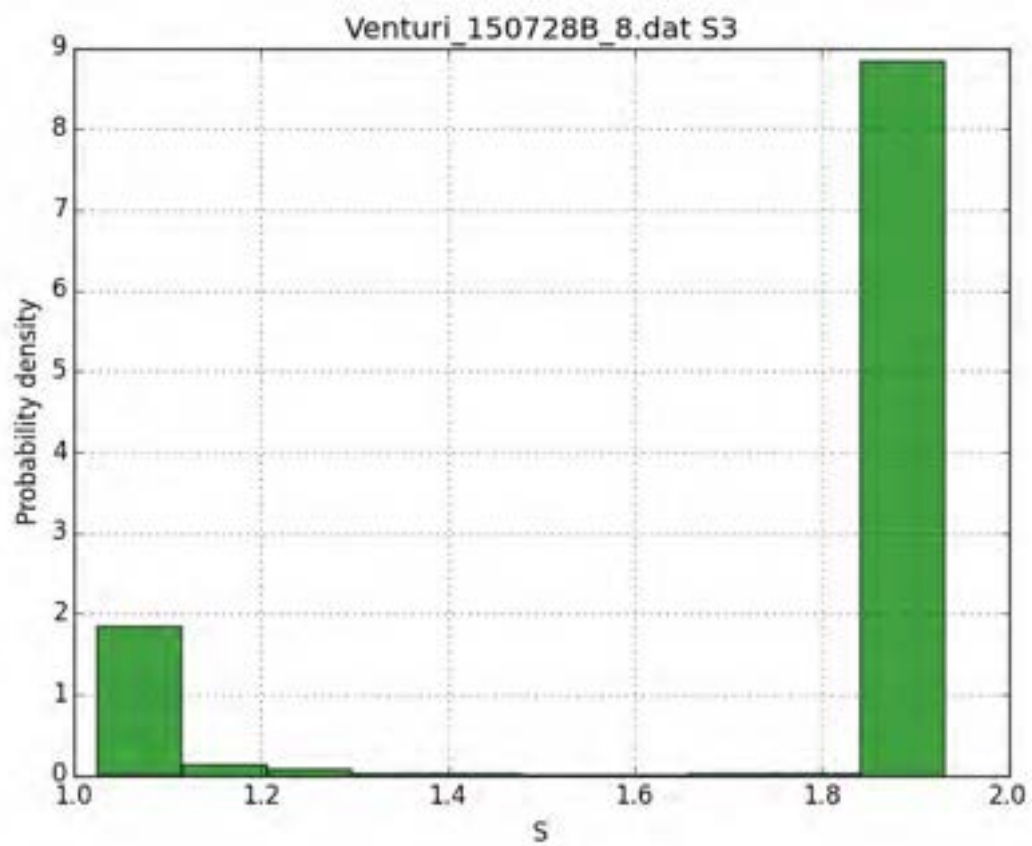
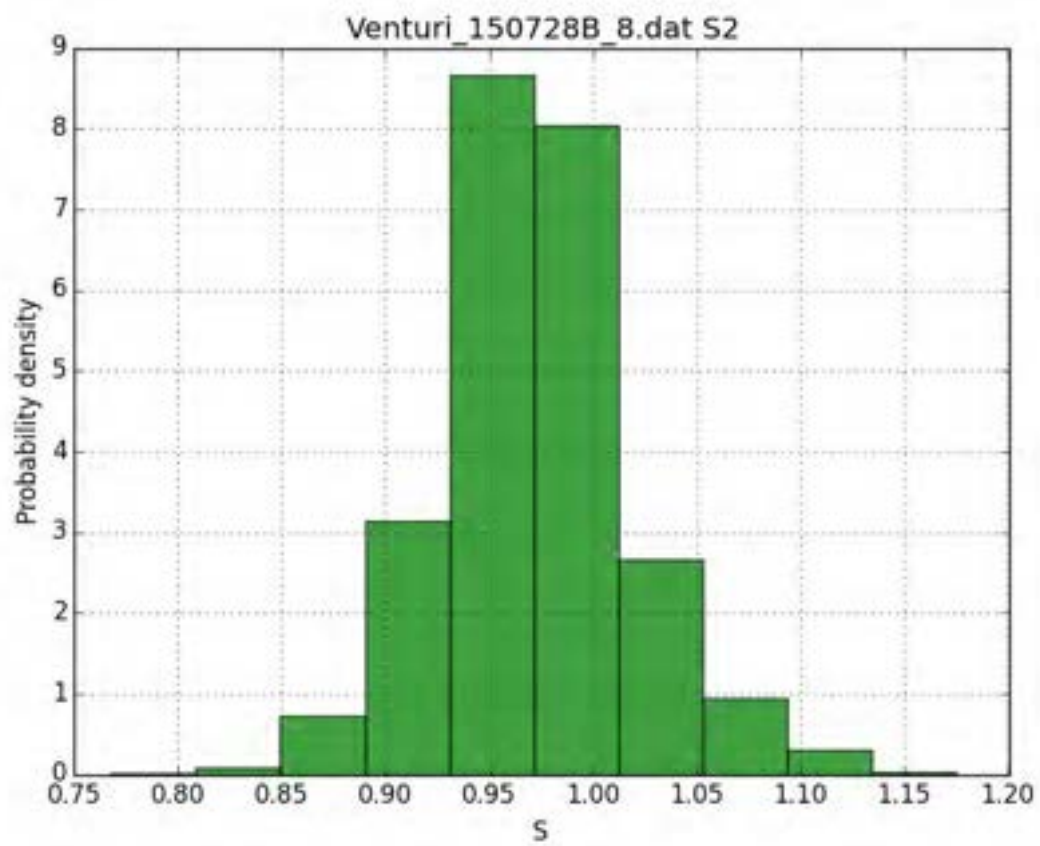


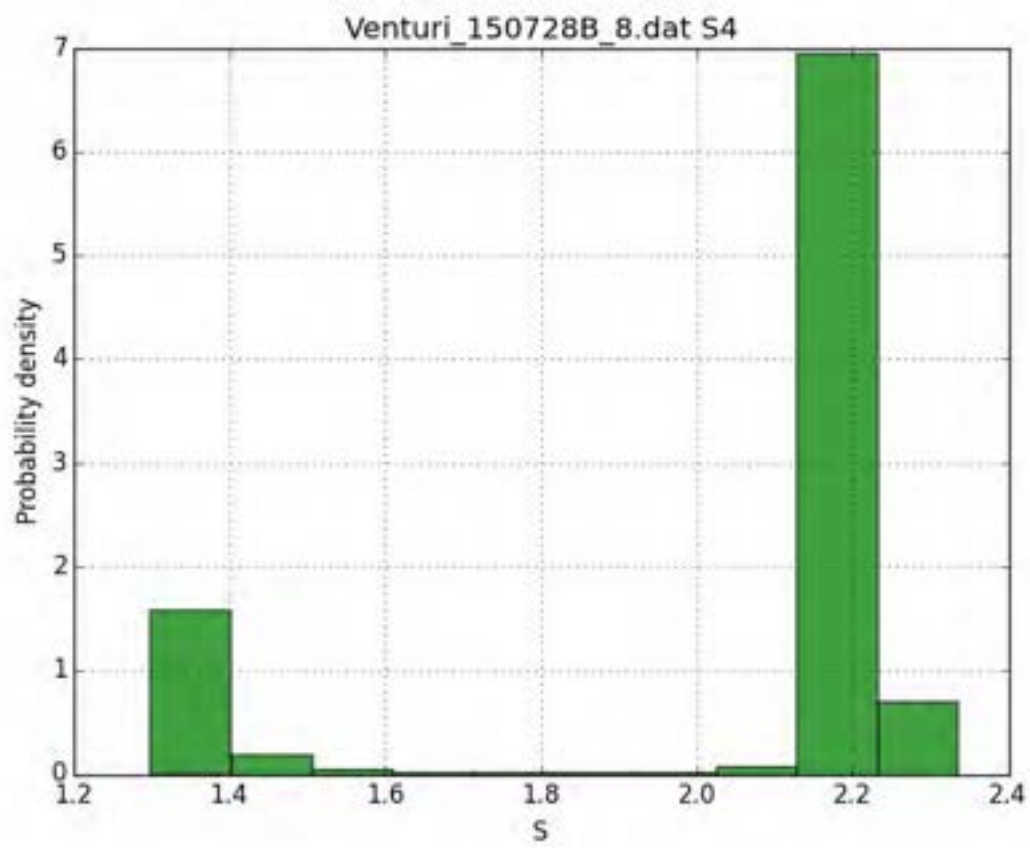








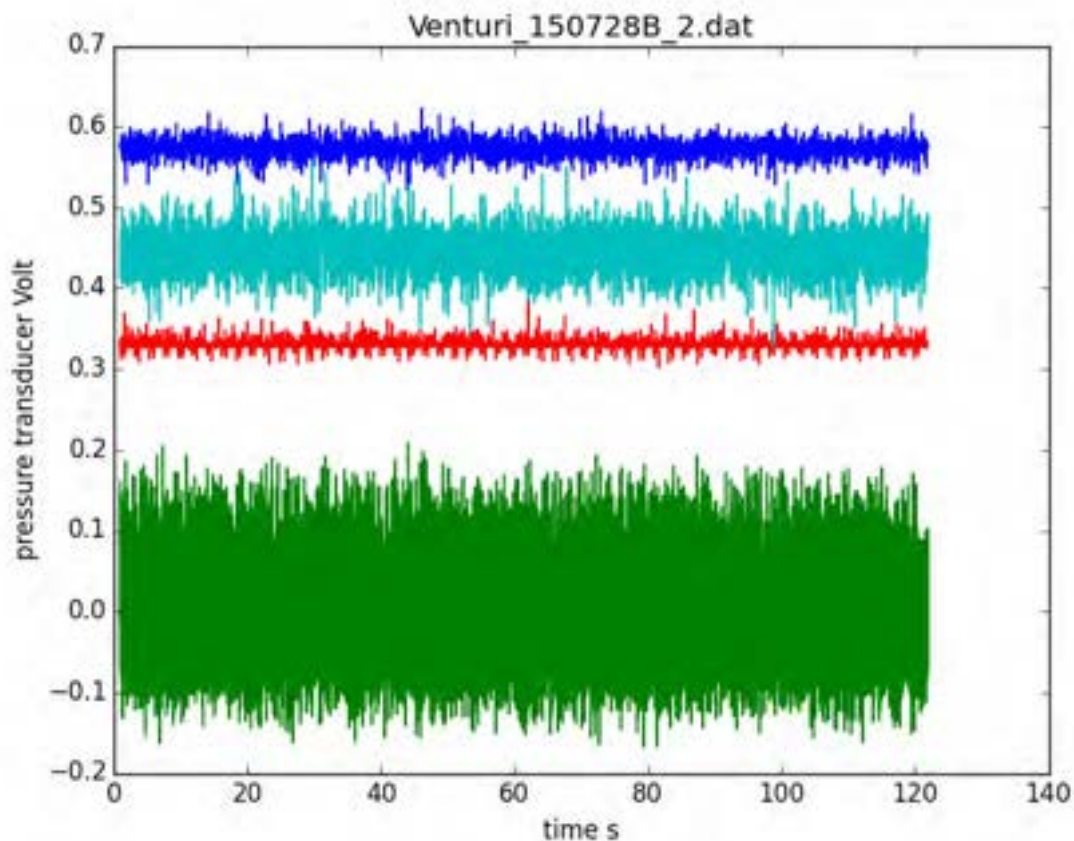




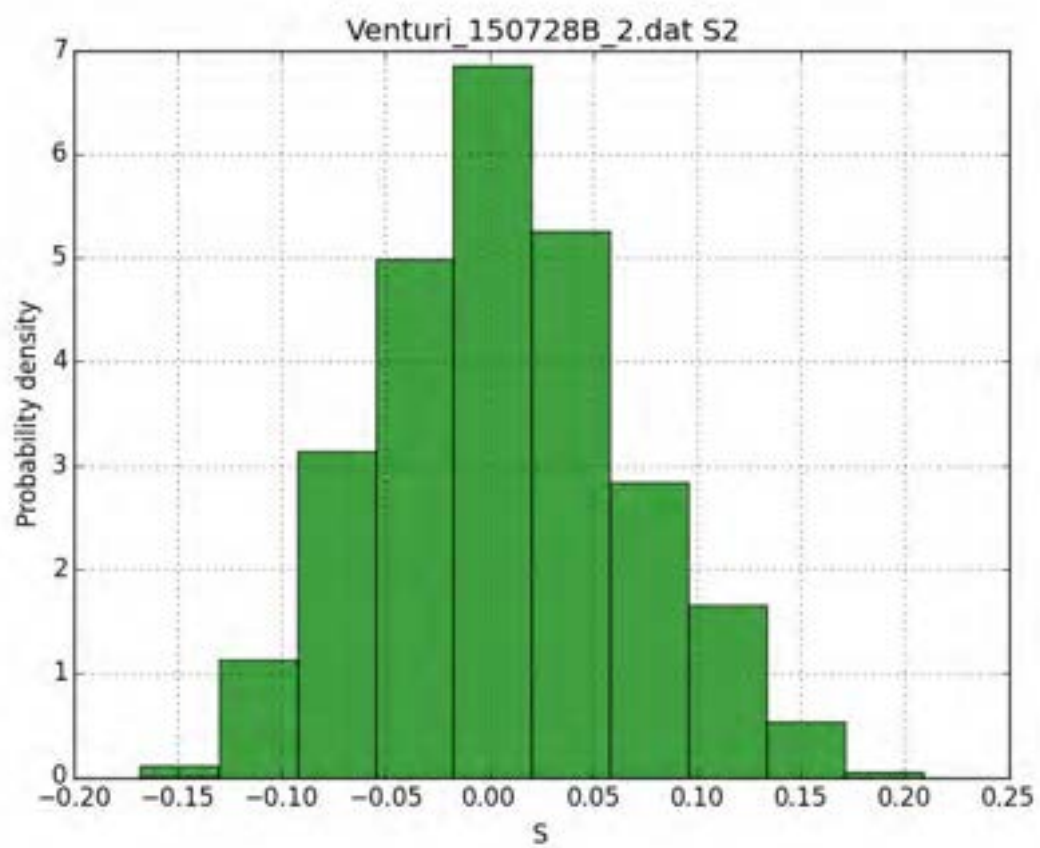
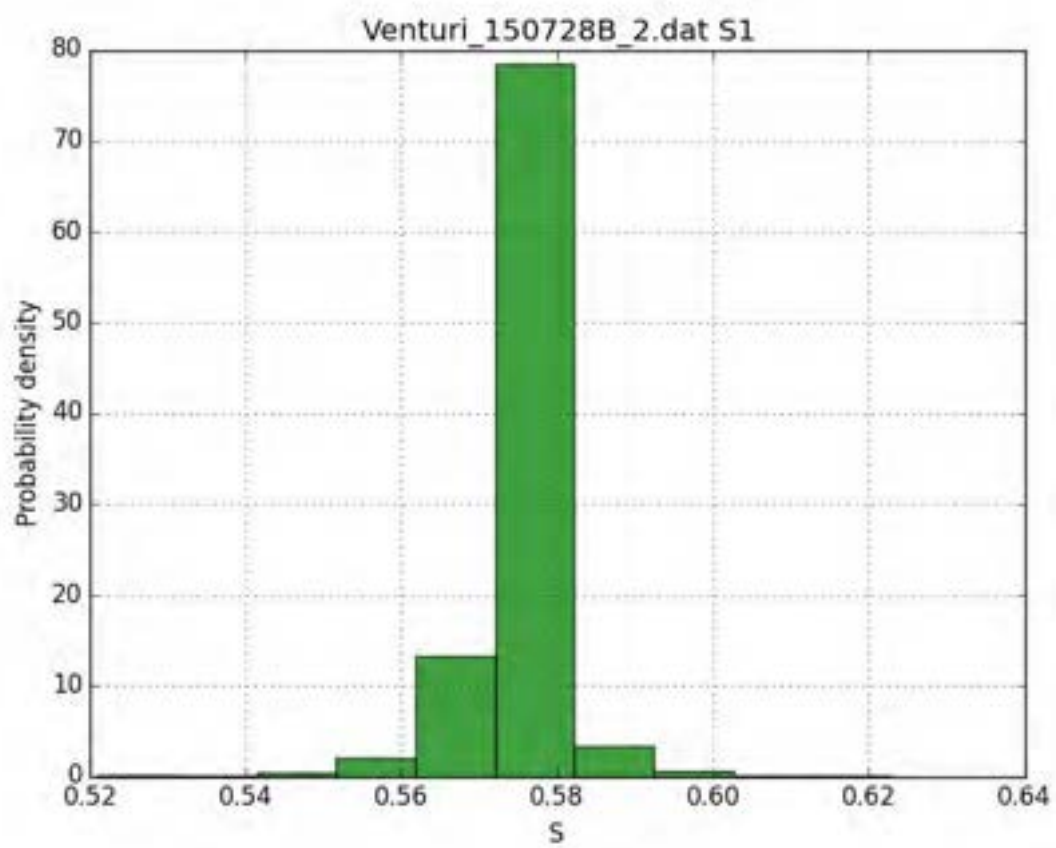
Misura delle pressioni differenziali: Analisi del segnale con riferimento alla sua variazione rispetto al segnale di zero.

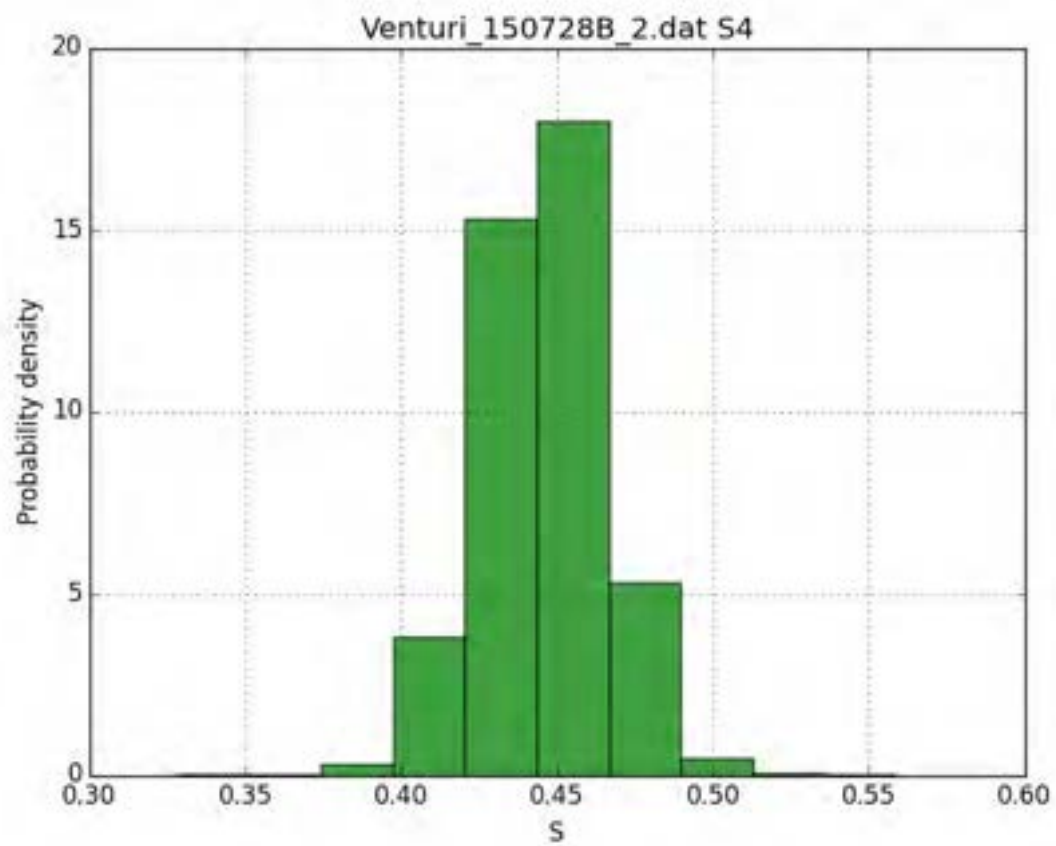
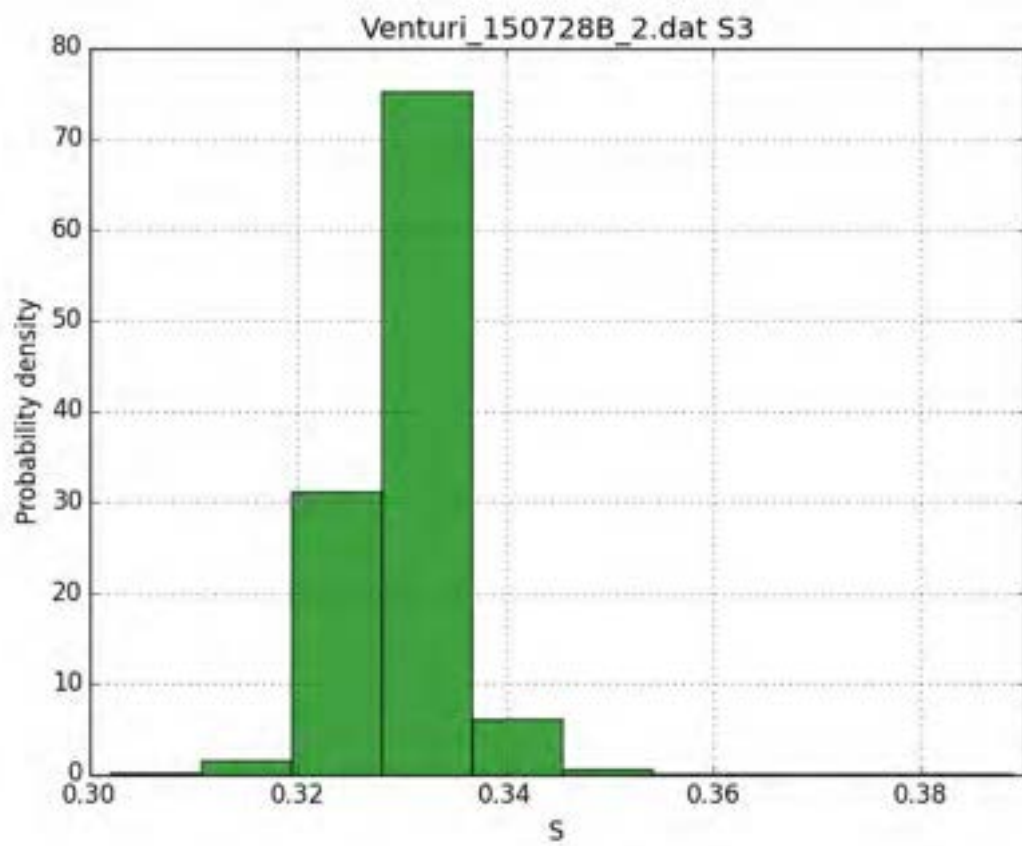
Dal punto di vista del comportamento statistico del segnale ed ai fini dell'analisi della sensibilità della catena di misura, si sono analizzati i segnali considerando la loro variazione rispetto ai segnali definiti di zero e relativi al caso di frequenza dell'inverter nulla.

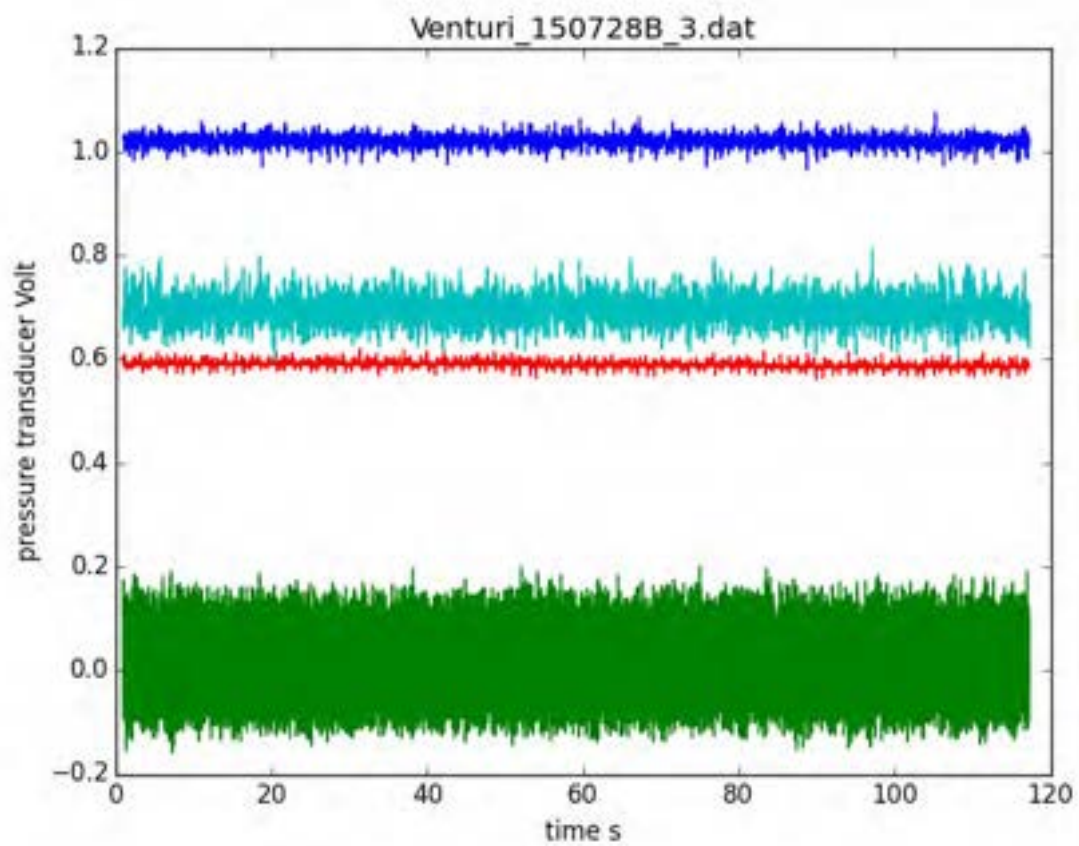
Nelle figure seguenti si riportano alcuni risultati ottenuti.



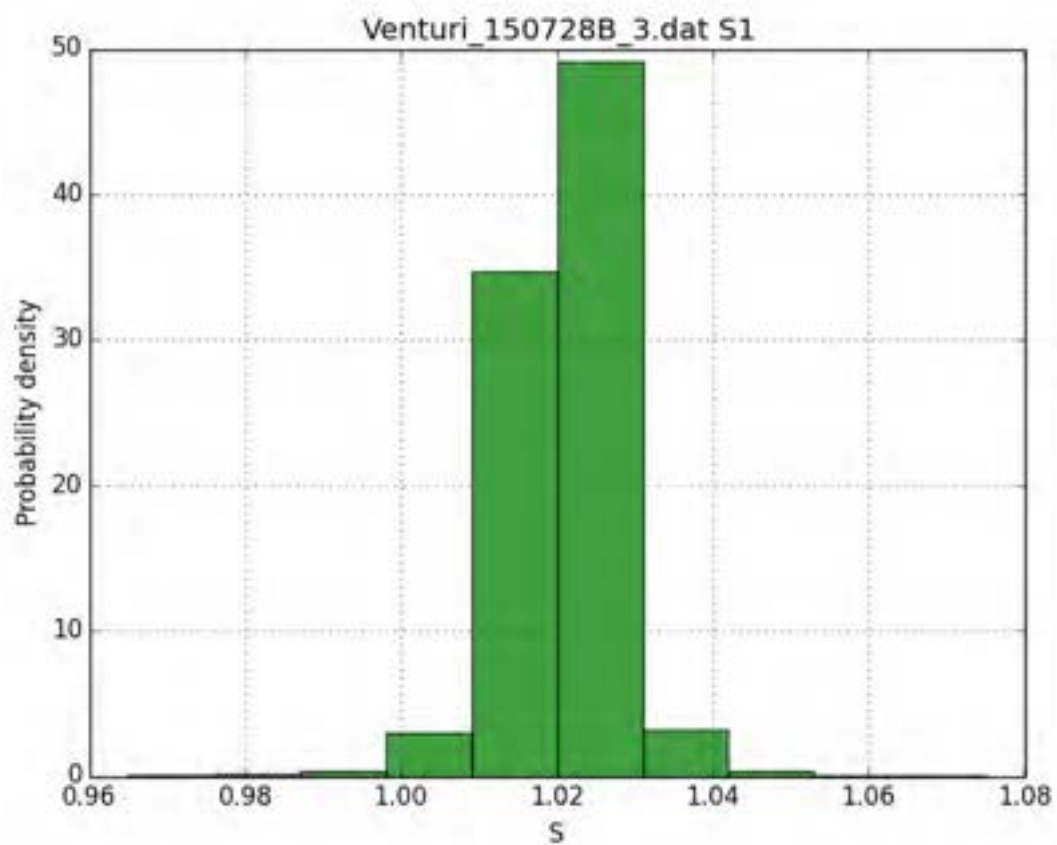
Variazioni del segnale rispetto ai segnali di zero: $f_{inv}=30$ Hz

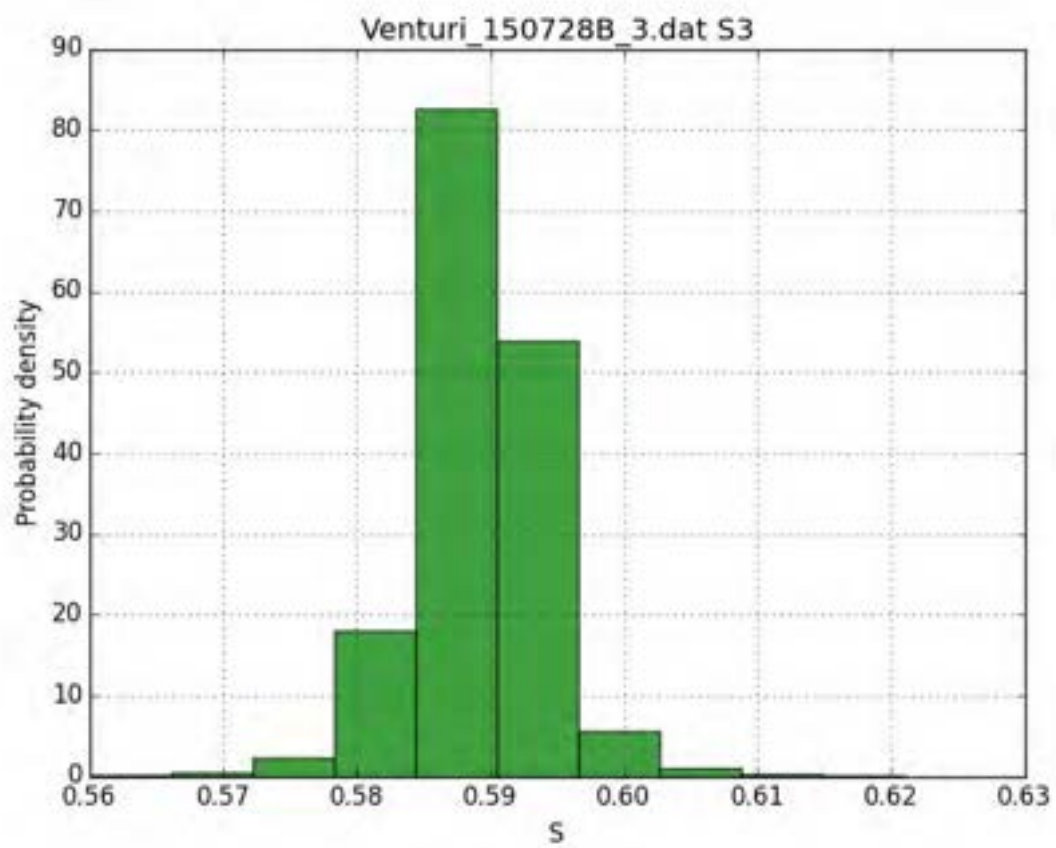
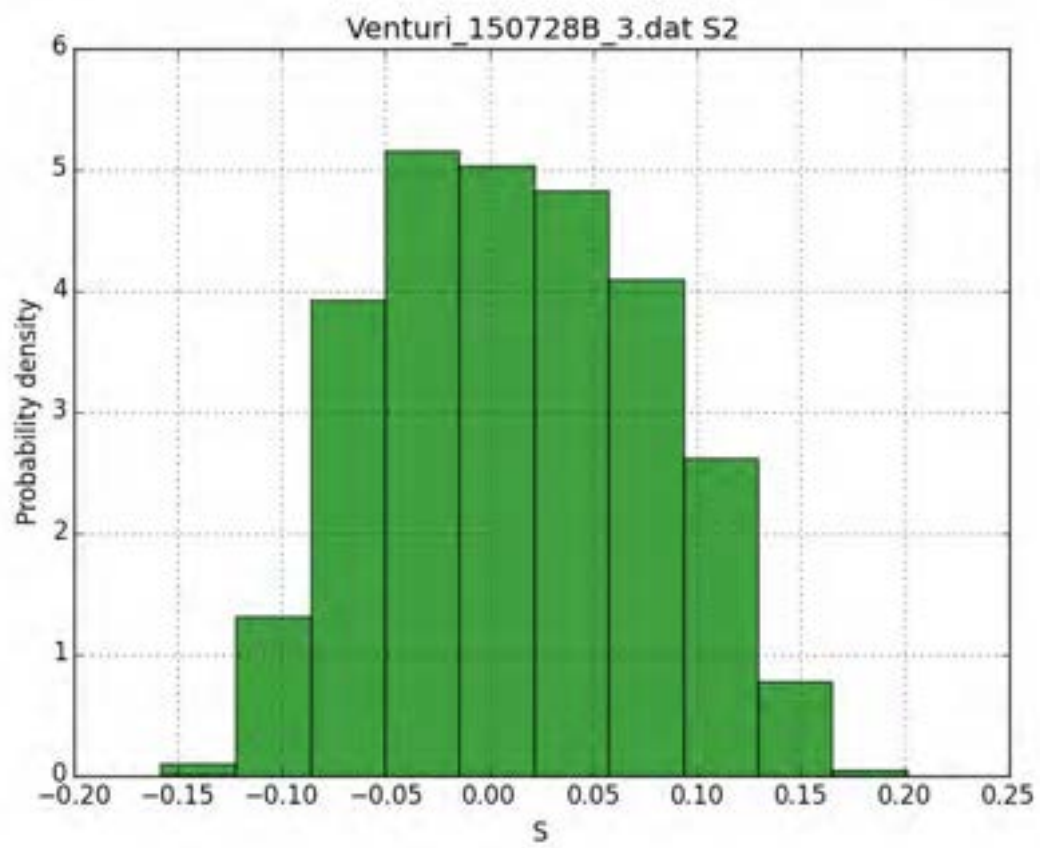


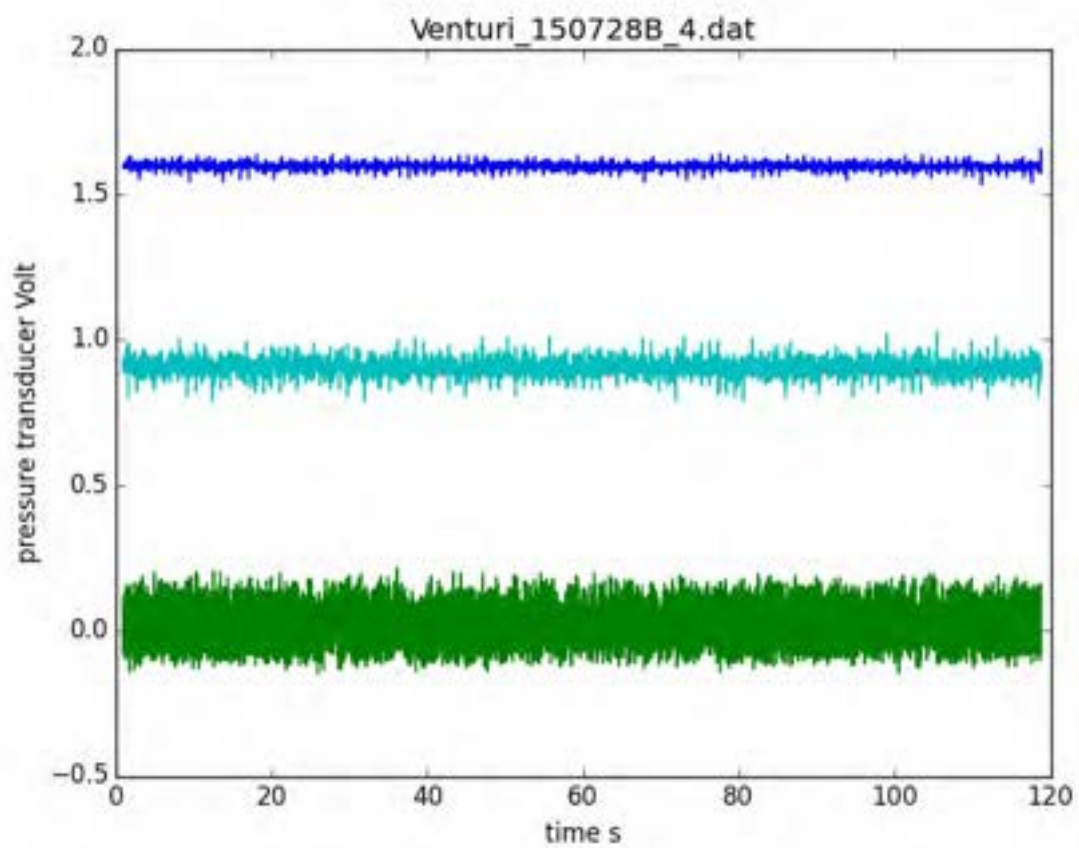
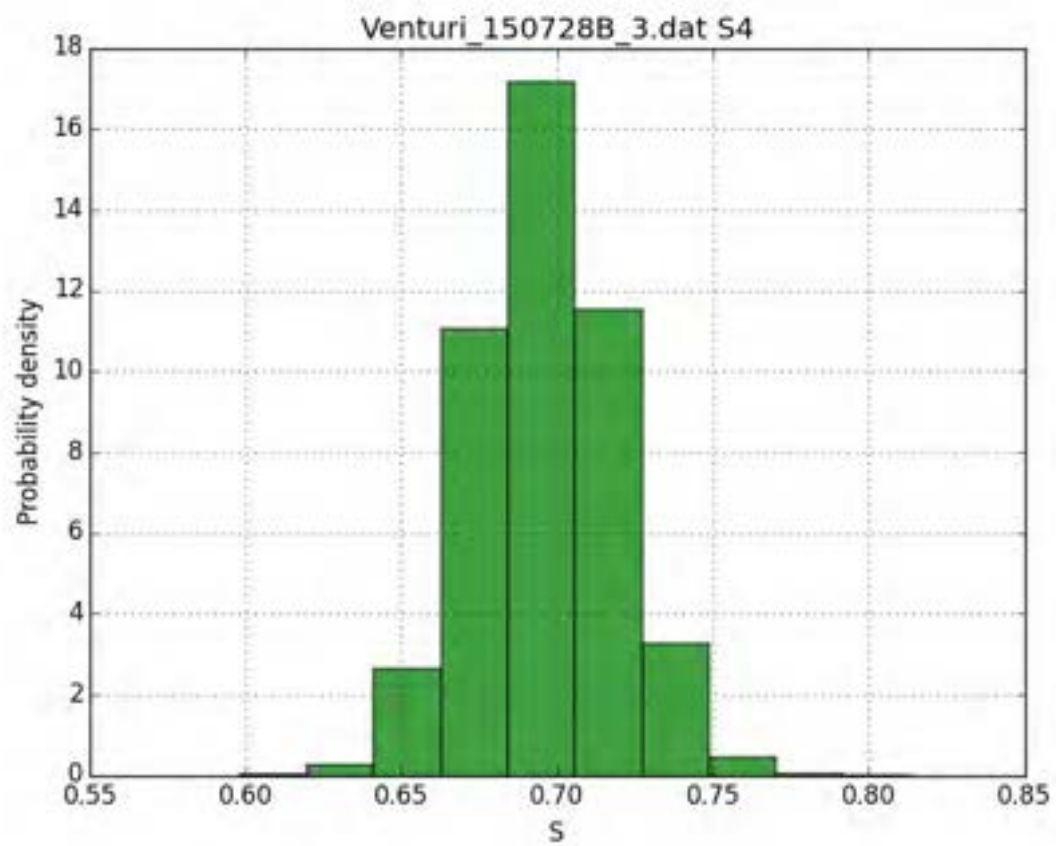




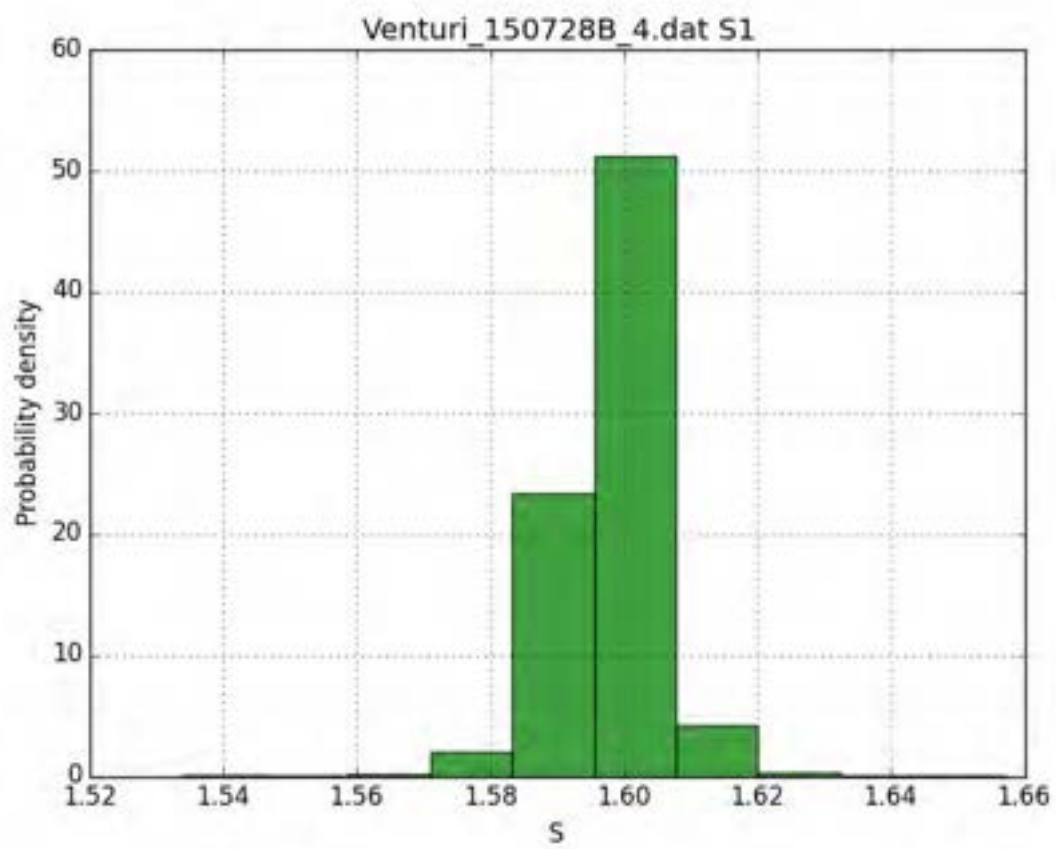
Variazione dei segnali rispetto allo zero per $f_{inv}=40$ Hz

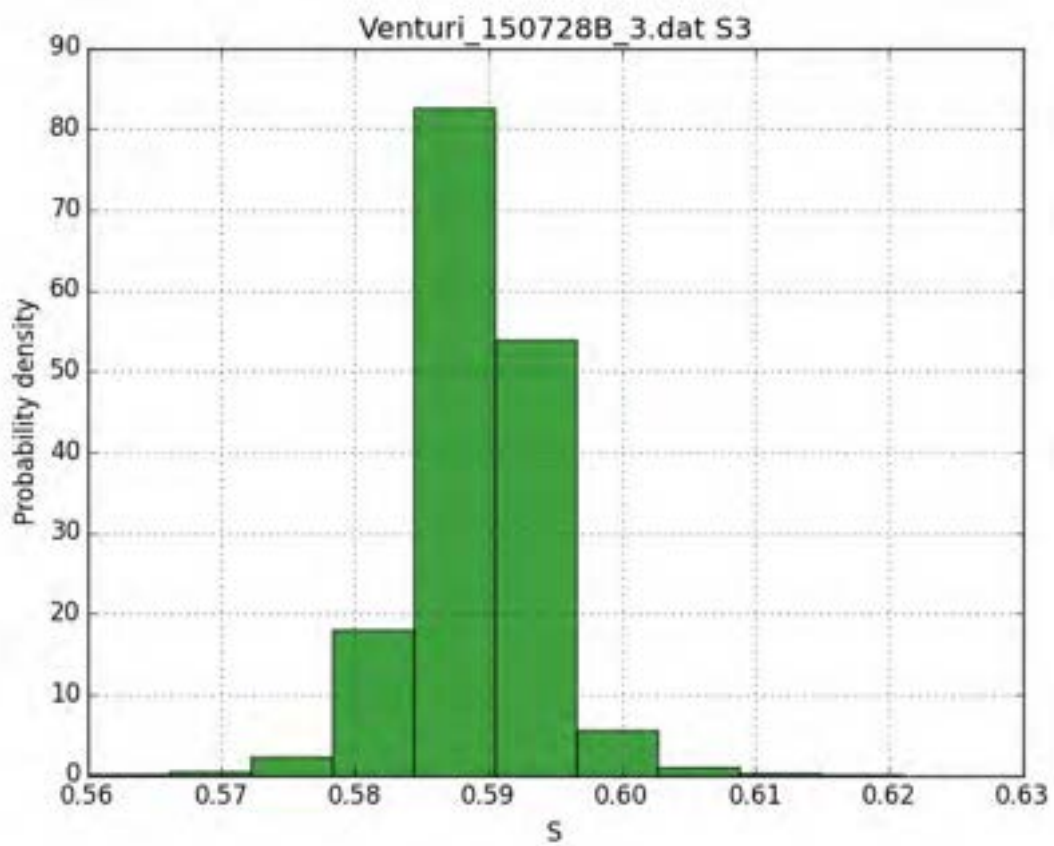
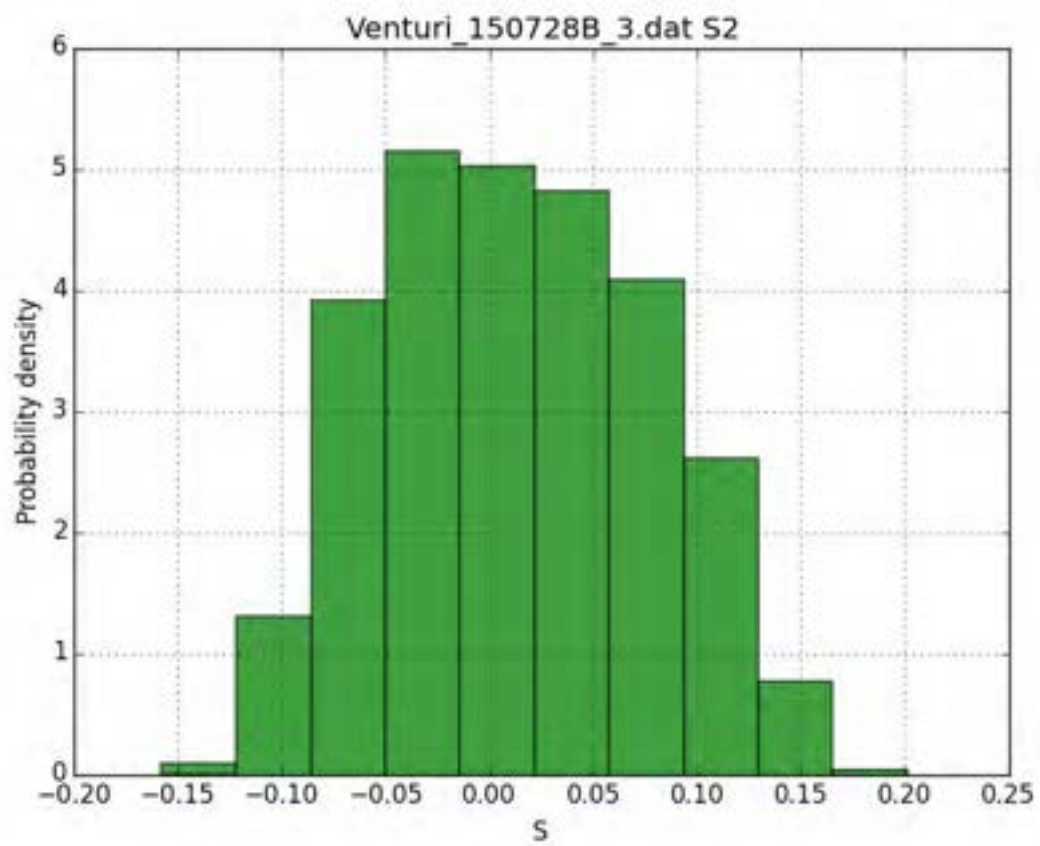


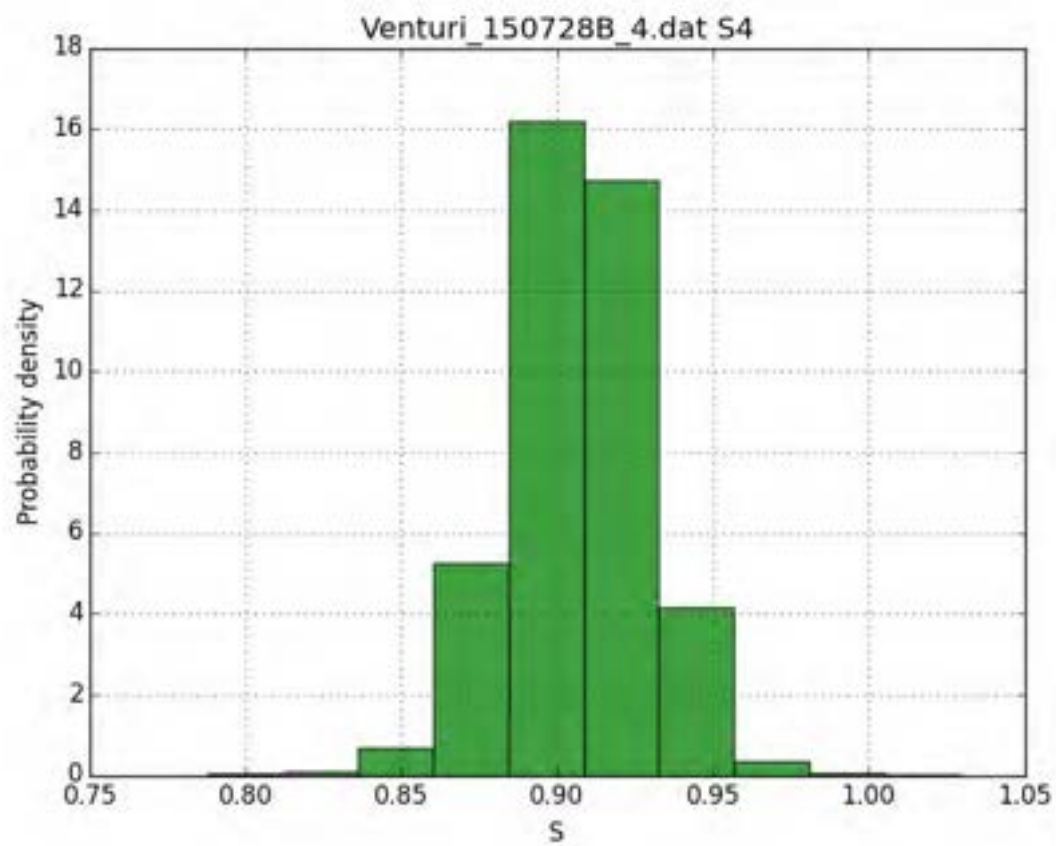
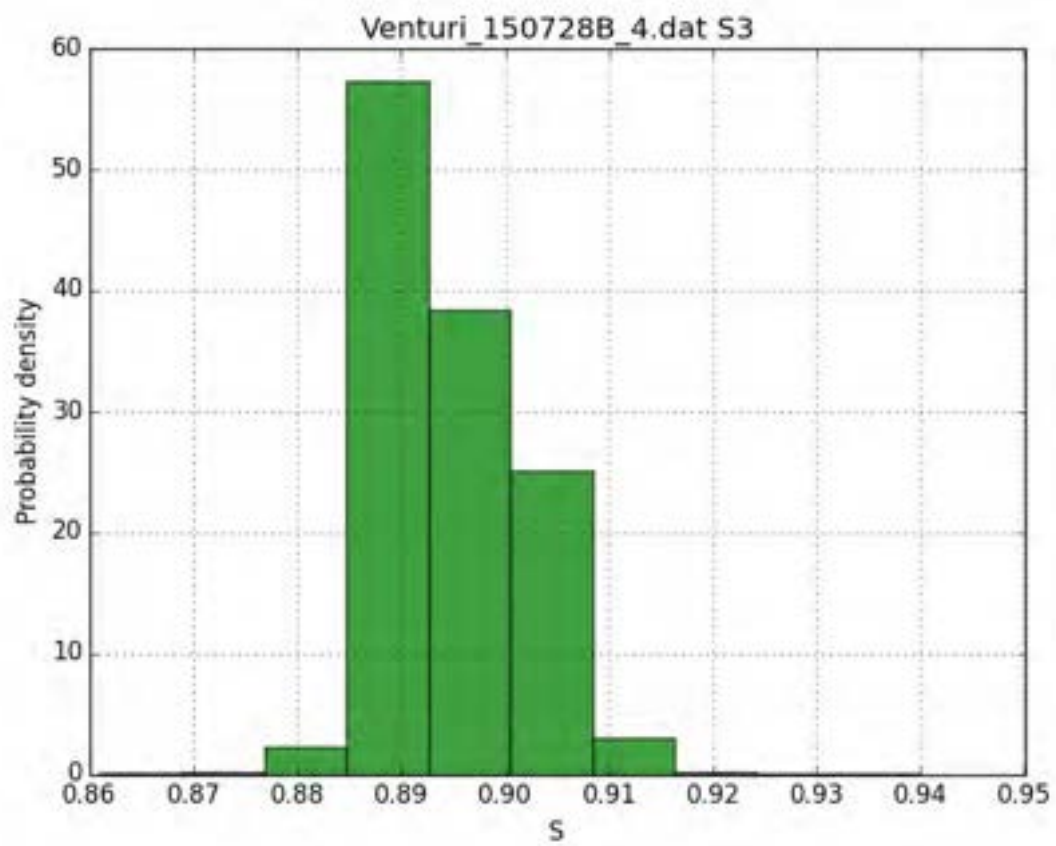


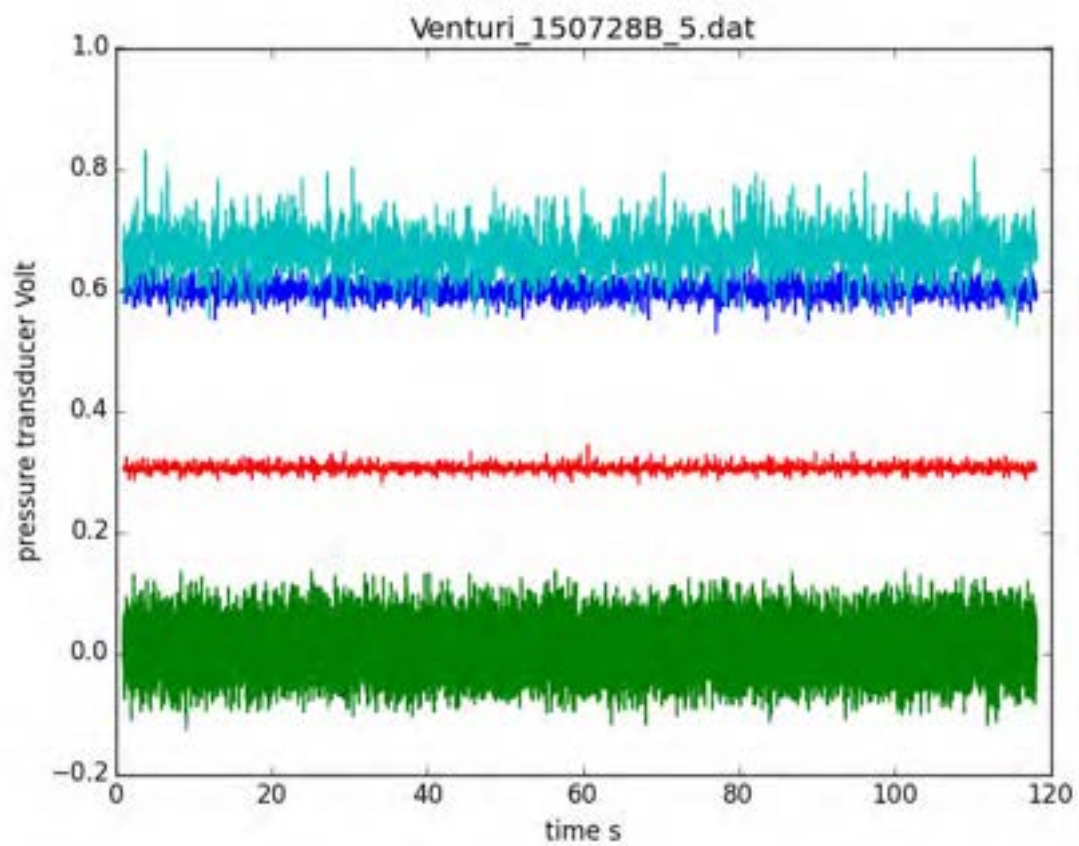


Variazione dei segnali rispetto allo zero per $f_{inv}=50$ Hz

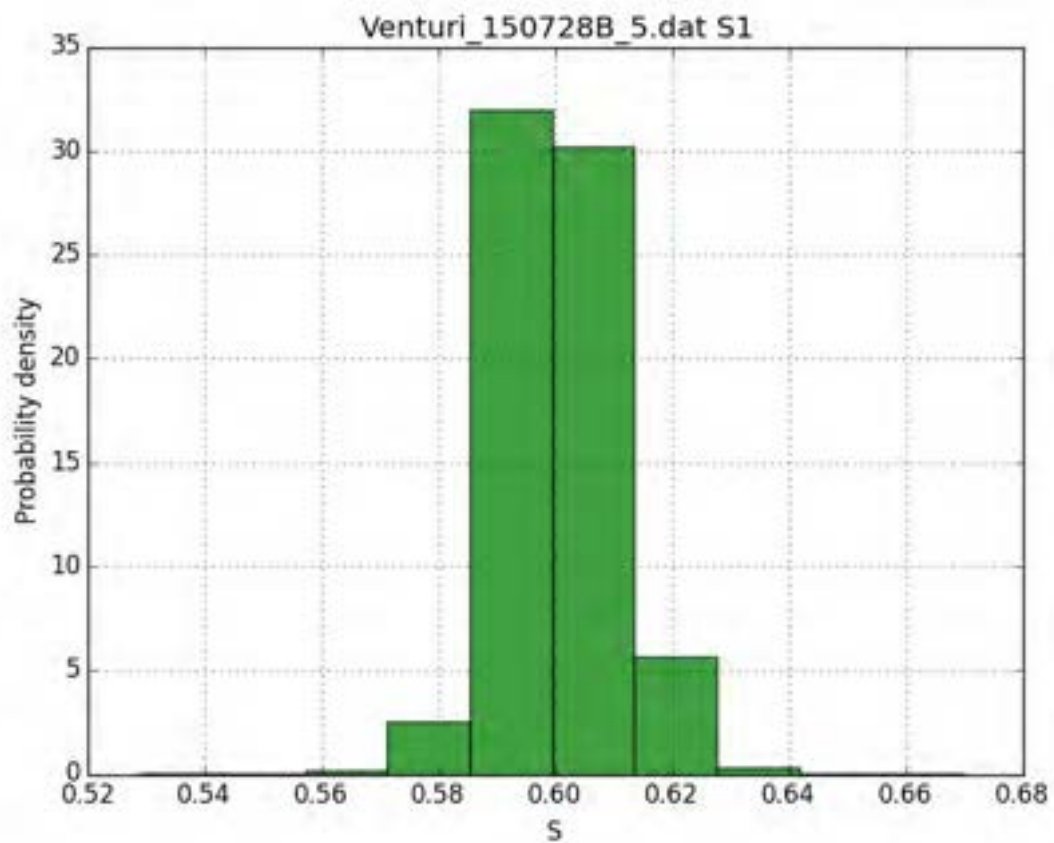


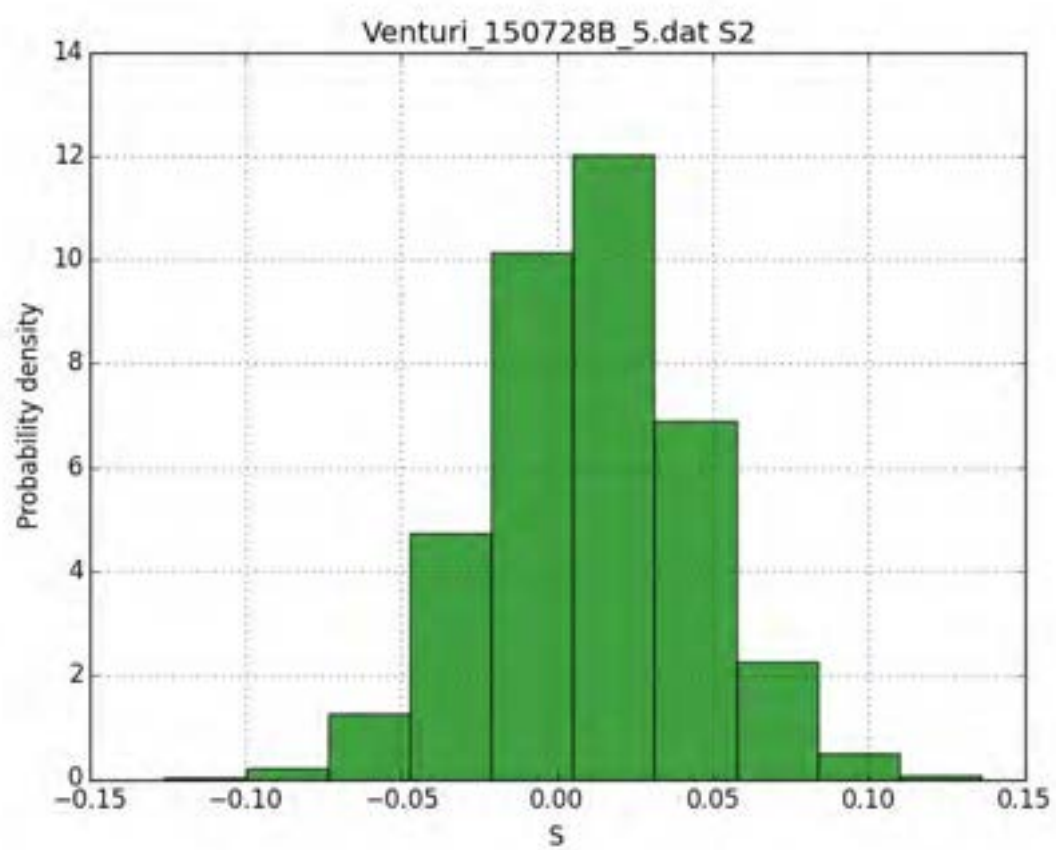


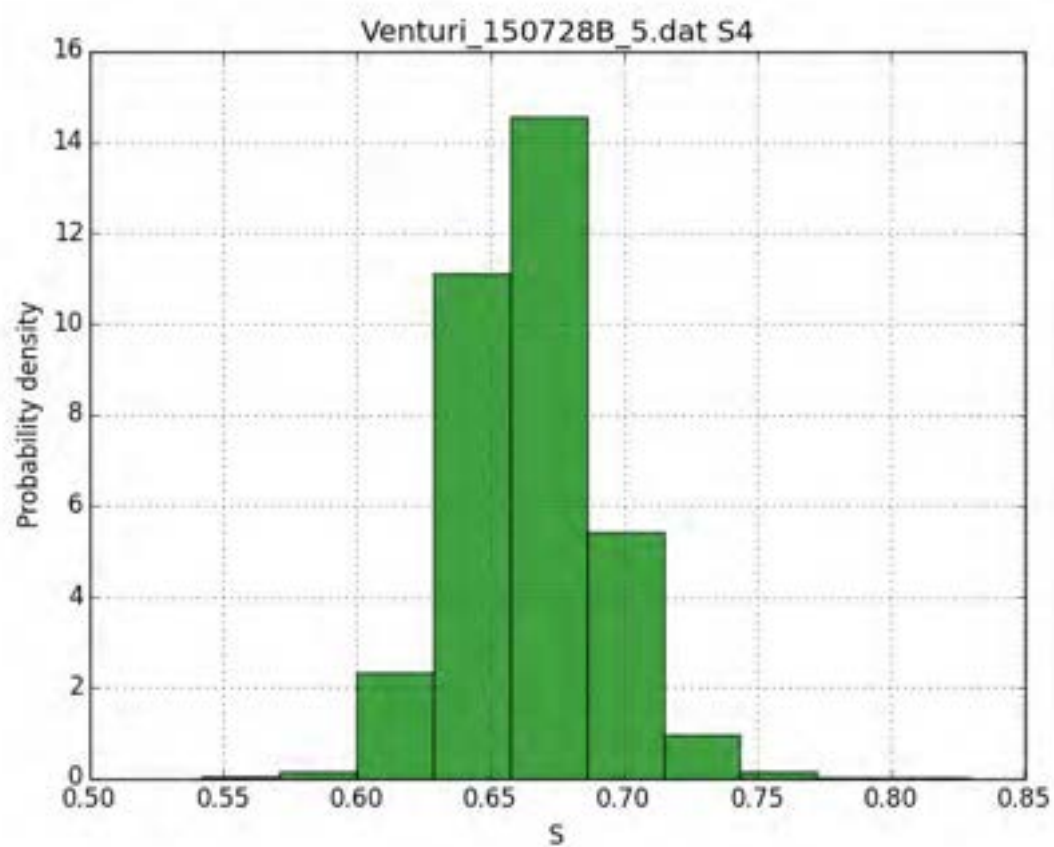
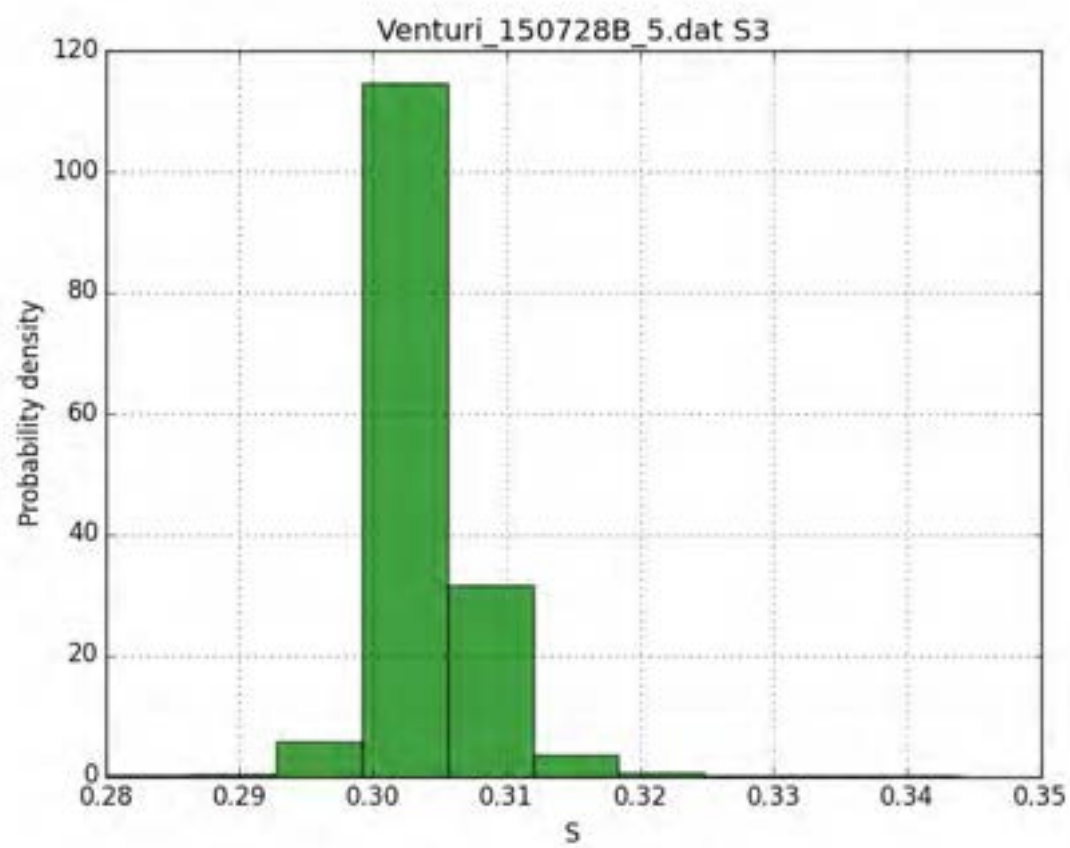


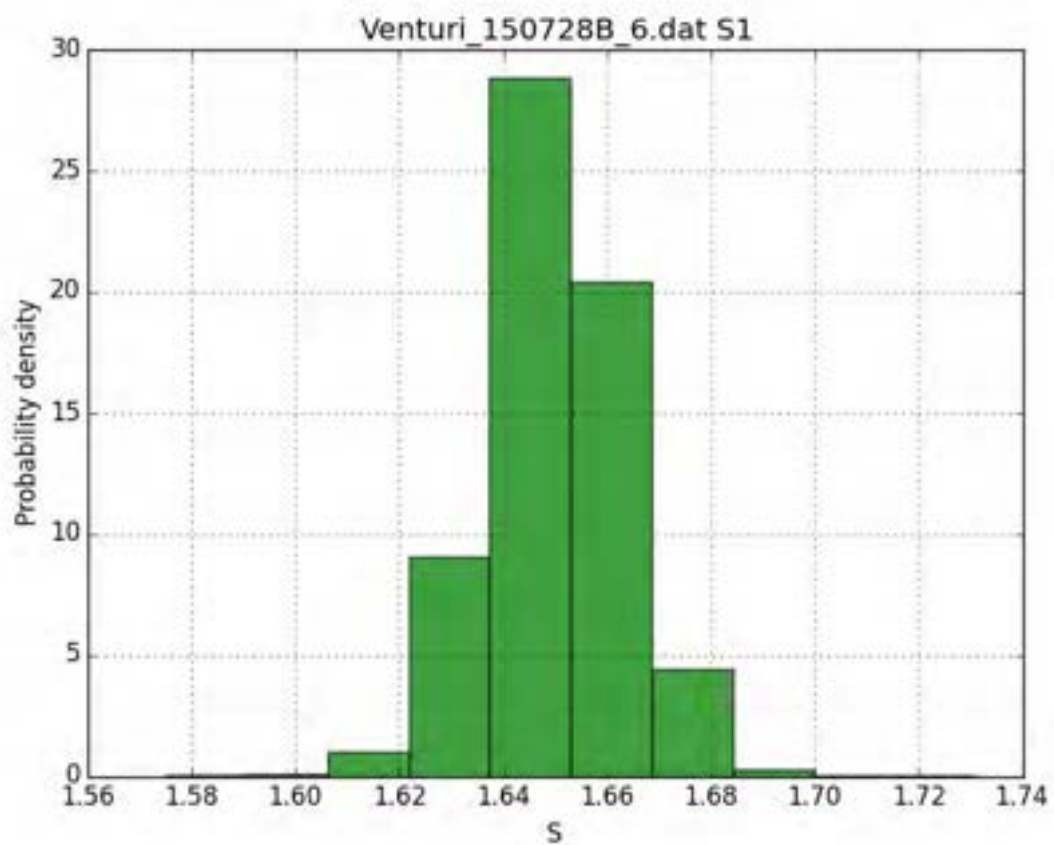
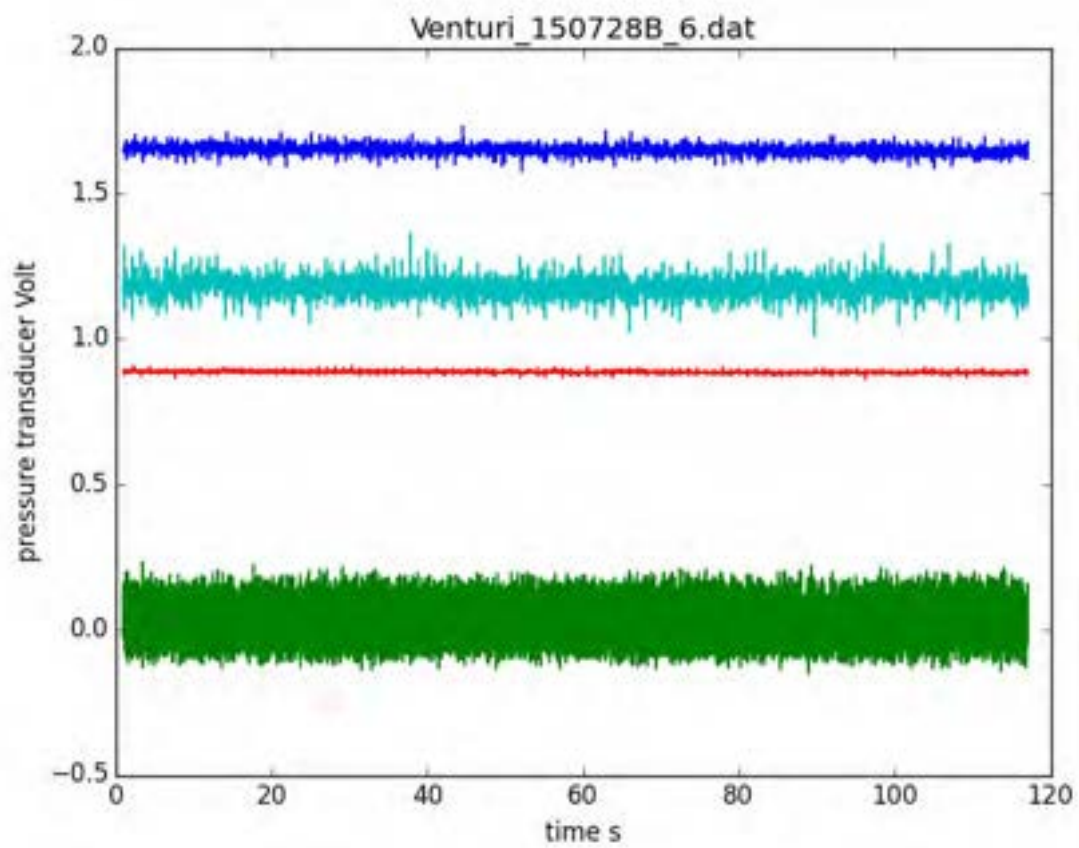


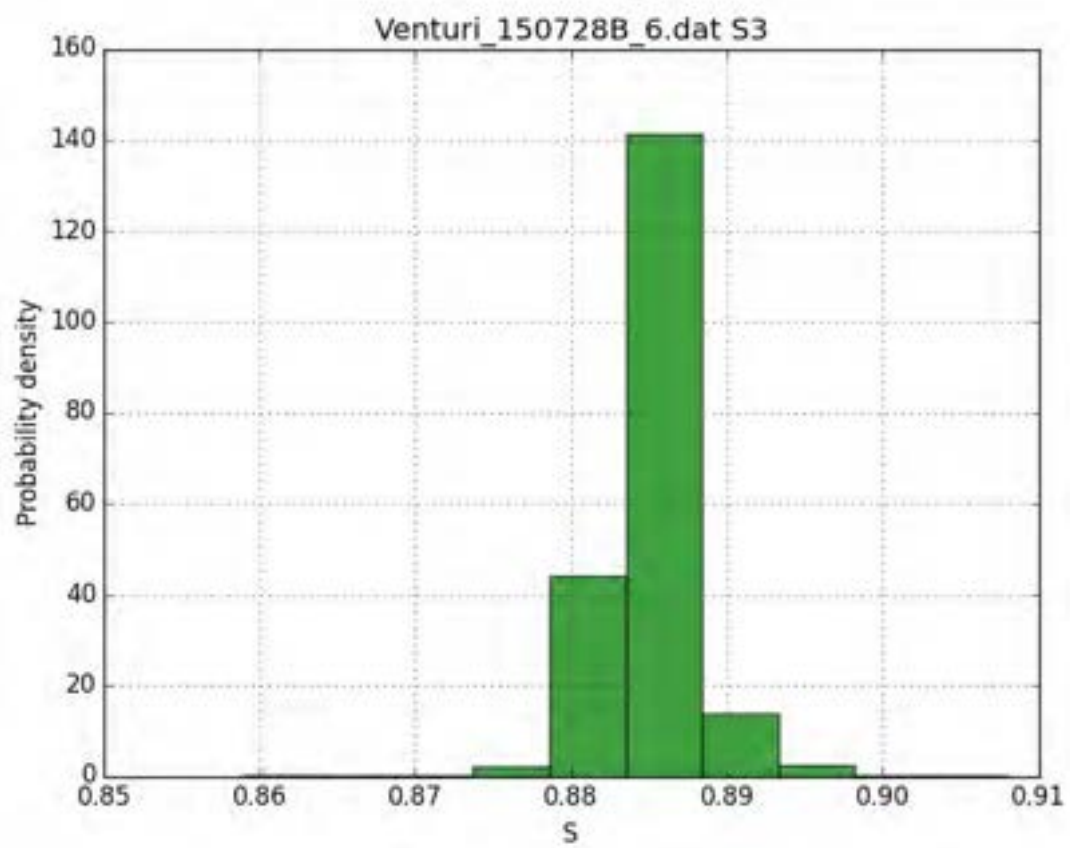
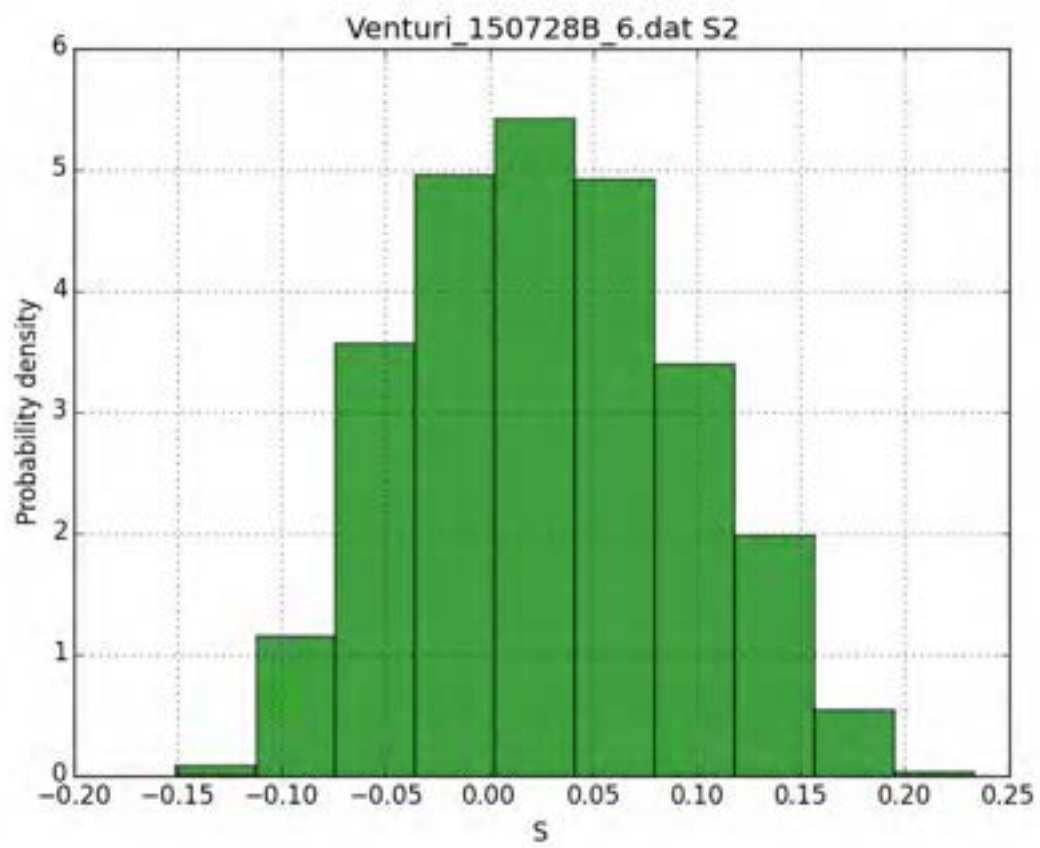
Segnali per $f_{inv}=30$ Hz e $QI=65$ kg/h

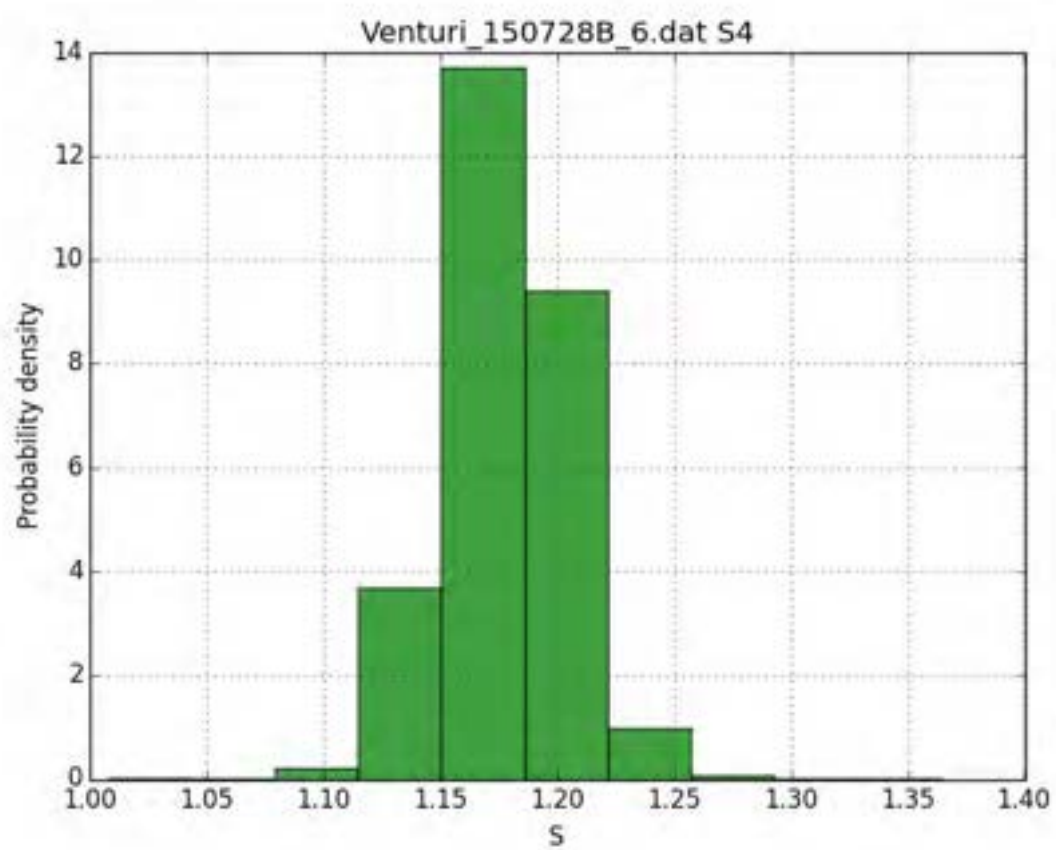


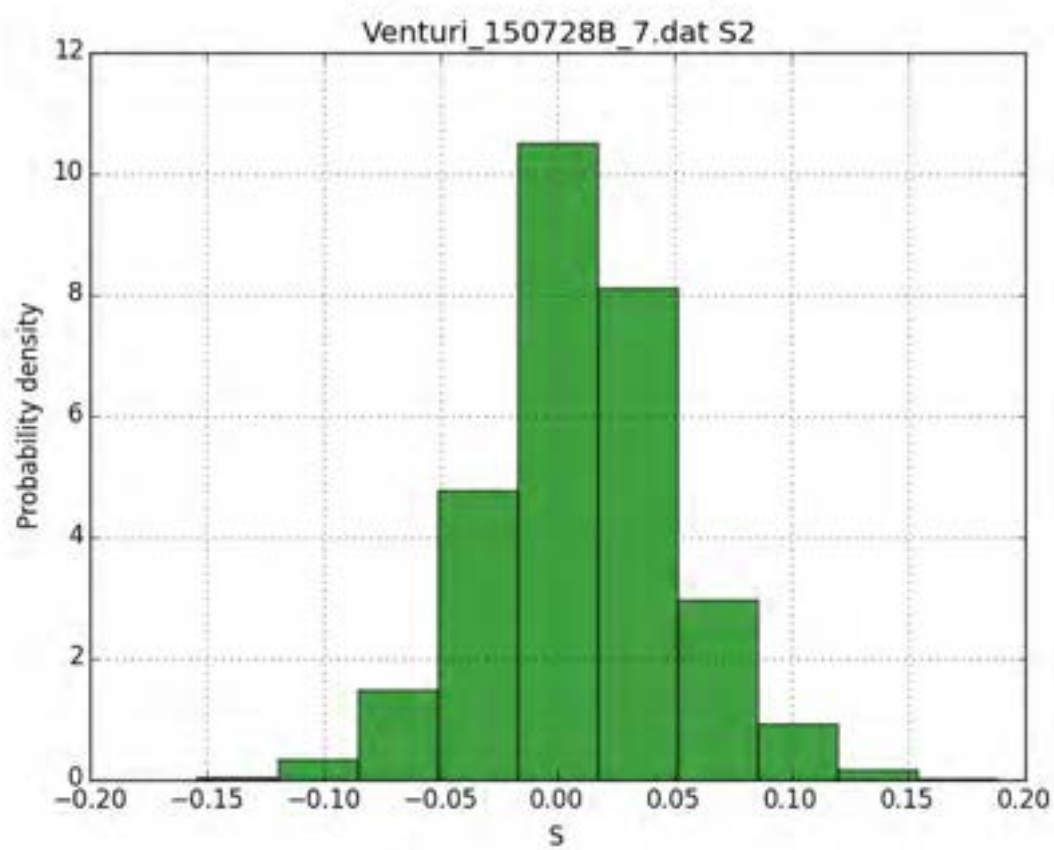
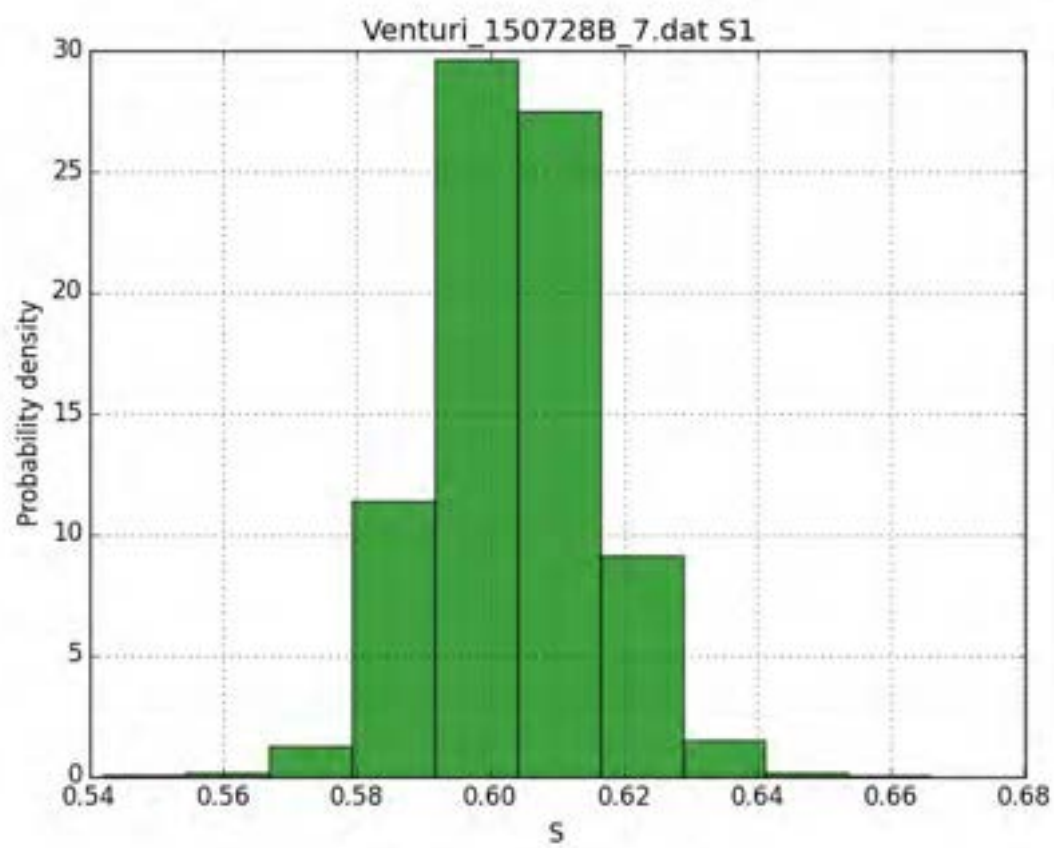


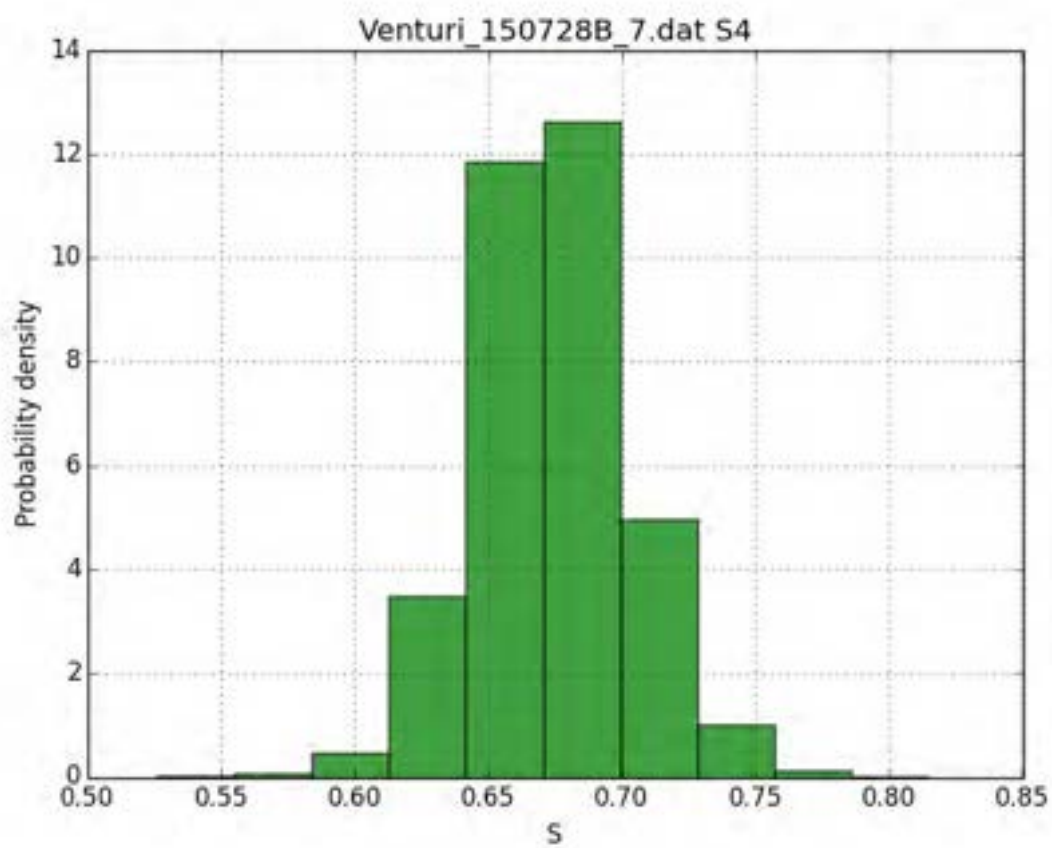
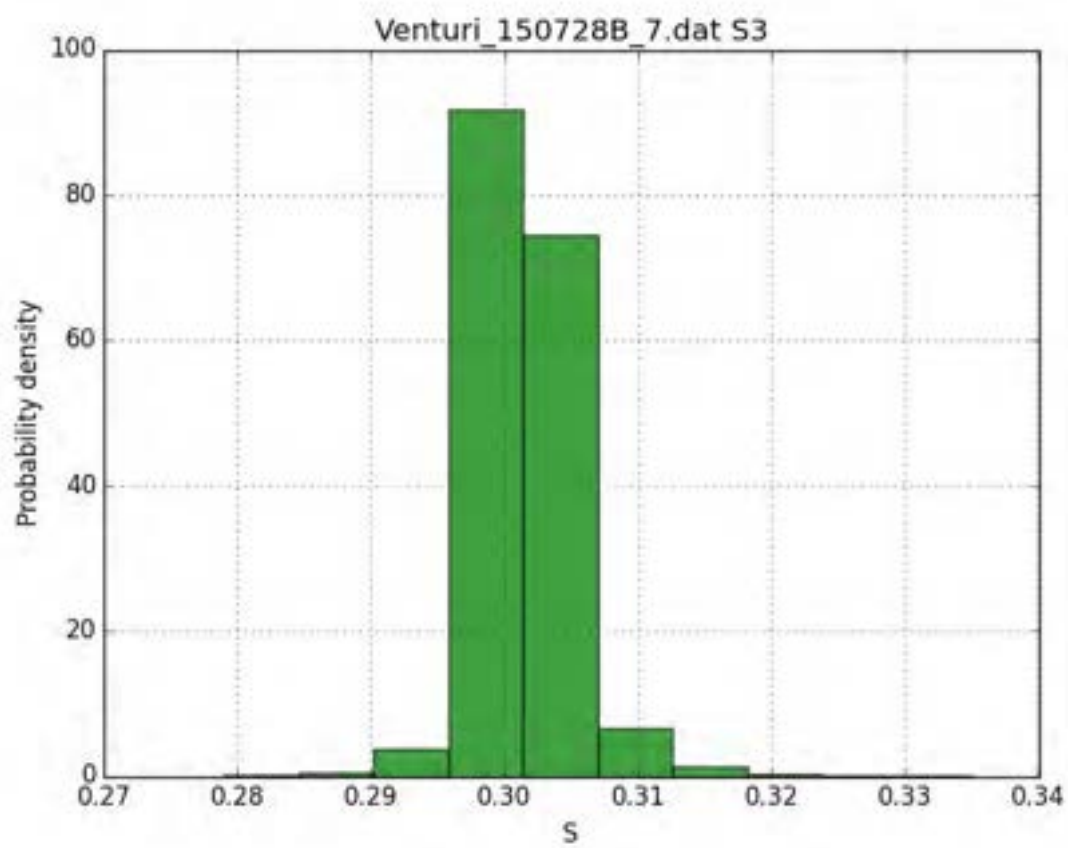












Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

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

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

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

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

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

Pubblicazioni più recenti

- 1) Bertani C., Grosso D., Malandrone M., Panella B., Air-Water Two-Phase Flow in a Horizontal T-Junction: Flow Patterns, Phase Separation and pressure Drops, Proc. XXIX Congresso UIT sulla Trasmissione del Calore, Torino, 20-22 Giugno 2011, Vol. unico, pp. 95-100, Publ. ETS Pisa, ISBN 978- 88467- 3072-5
- 2) De Salve M., Monni G., Panella B., Turbine Flow Meter And Drag-Disk In Air-Water Flow, Proc. XXIX Congresso UIT sulla Trasmissione del Calore, Torino, 20-22 Giugno 2011, Vol. unico, pp. 107-112, Publ. ETS Pisa, ISBN 978- 88467- 3072-5
- 3) De Giorgi L. C., De Salve M., Panella B., Thermal Hydraulics in the ADS Windowless Target Equipped with Internal Guide Vanes, Proc. XXIX Congresso UIT sulla Trasmissione del Calore, Torino, 20-22 Giugno 2011, Vol. unico, pp. 359, 365, Publ. ETS Pisa, ISBN 978- 88467- 3072-5
- 4) Dulla S., Ravetto P., Panella B., Experiments on the ADS innovative nuclear reactor target at Politecnico di Torino, M&C2011, Rio de Janeiro, Brazil May 2011, pp. 8, 2011, ISBN: 9788563688002
- 5) Castiglia F., Giardina M., Morana G., De Salve M., Panella B., Relap5 Simulation of Two-Phase Flow Experiments in Vertical Helical Tubes, In: Proc. ICONE 19, JSME (JPN), 19th International Conference on Nuclear Engineering, Chiba (Japan) May 16-19, 2011, pp. 7, 2011, ISBN: 9784888982047
- 6) Bertani C., Malandrone M., Panella B., Experimental Study on Two-phase Flow in a Horizontal Impacting T-Junction, Proc. 30th UIT Heat Transfer Conference, Società Editrice Esculapio, Bologna 25- 27 June 2012, Vol. Unico, pp. 157- 162, 2012, ISBN: 9788874885091
- 7) De Salve M., Monni G., Panella B., Randaccio C., Electrical Capacitance probe Characterization for Vertical Annular Air-Water Flow Investigation, In: Proc. HEFAT2012, 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malta July 16-18, pp. 9, 2012, pagine da 267 a 275
- 8) De Salve M., Giraudo M. G., Panella B., Experimental Study of Air-Water Two-Phase Flow in Parallel Helically Coiled Pipes, In: Proc. 30th UIT Heat Transfer Conference, Società editrice Esculapio (ITA), 30th UIT Heat Transfer Conference, Bologna 25-27 June 2012, pp. 6, 2012, pagine da 171 a 176, ISBN: 9788874885091
- 9) De Salve M., Monni G., Panella B., Horizontal Air-Water Flow Characterisation With a Wire Mesh Sensor, In: Proc. 30th Uit Heat Transfer Conference, Società editrice Esculapio (ITA), 30th UIT Heat Transfer Conference, Bologna 24-27 June 2012, pp. 6, 2012, pagine da 177 a 182, ISBN: 9788874885091
- 10) Castiglia F., Giardina M., Morana G., De Salve M., Panella B., Analyses of single- and two-phase flow pressure drops in helical pipes using a modified RELAP5 code, *Nuclear Engineering and*

- Design*, 250 (2012) p. 585–591, ISSN: 0029-5493, DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.008
- 11) De Giorgi L.C. , De Salve M., Panella B., ADS Windowless Spallation Target Design: an Experimental and Computational Approach, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 106, pp. 622 - 625, ISSN: 0003-018X, June 24–28, 2012 Chicago, American Nuclear Society, 2012
 - 12) De Salve M., Giraudo M.G., Panella B., Use of RELAP5MOD3.3 Code to Get Fluid Dynamic Stability Maps, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 106, pp.975-978, ISSN: 0003-018X, June 24–28, 2012 Chicago, American Nuclear Society, 2012.
 - 13) De Salve M., Monni G. and Panella B., Horizontal Air-Water Flow Analysis with Wire Mesh Sensor, Eurotherm 2012, 6th European Thermal Sciences Conference, Poitiers, 4-7 Sept. 2012, 2012 *J. Phys.: Conf. Ser.* **395** 012179, doi:10.1088/1742-6596/395/1/012179
 - 14) De Salve M., Monni G. and Panella B., A New Spool Piece for Horizontal Two-Phase Flow Measurements, Proc. 31th UIT National Heat Transfer Conference, Società Editrice Poliprint- Politecnico di Milano, Como, Italy, June 25- 27, 2013, Vol. 1, pp. 163- 172, ISBN: 97888-6493-017-6, 2014 *J. Phys.: Conf. Ser.* **501** 012011 doi:10.1088/1742-6596/501/1/012011
 - 15) Bertani C., Malandrone M., Panella B., Experimental Study on the Flow Patterns and Two-phase pressure Drops in a Horizontal Impacting T- Junction, Proc. 31th UIT National Heat Transfer Conference, Società Editrice Poliprint- Politecnico di Milano, Como, Italy, June 25- 27, 2013, Vol. 1, pp. 181- 190, ISBN: 97888-6493- 017-6, Journal of Physics: Conference Series 501 (2014) 012013 doi:10.1088/1742-6596/501/1/012013
 - 16) De Salve M., Orio M., Panella B., Single and two- phase flow fluid dynamics in parallel helical coils, Proc. 31th UIT National Heat Transfer Conference, Società Editrice Poliprint- Politecnico di Milano, Como, Italy, June 25- 27, 2013, Vol. 1, pp. 191- 200, ISBN: 97888-6493- 017-6, Journal of Physics: Conference Series 501 (2014) 012014 doi:10.1088/1742-6596/501/1/012014
 - 17) De Salve M., Monni G. and Panella B., Horizontal Two-Phase Flow Pattern Recognition, Proc. 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, June 16-20, 2013, Lisbon, Portugal, 352-Paper, pp. 6. WIT press (GBR), pp. 12, 2013, Vol. Unico, ISSN: 1746-4471, pp. 463- 474, ISBN: 9781845647346 (2013)
 - 18) De Salve M., Monni G. and Panella B., Horizontal air- water flow pattern recognition, Computational Methods in Multiphase Flow VII, WIT press, Editors Brebbia & Vorobieff, pp.463- 474, ISBN 978-1-84564- 734- 6, ISSN 1746- 4471, 2103.
 - 19) De Salve M., Monni G. and Panella B., A Model for a Spool Piece Made up of Venturi and Void fraction Flow Meter in Horizontal Flow, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 108, pp. 1013-1016, ISSN: 0003-018X, June 16–20, 2013, Atlanta, American Nuclear Society, 2013.
 - 20) G. Monni, M. De Salve, B. Panella, Internal structure and void fraction profile shape in horizontal bubbly flow, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 109, pp. 1825-1828, ISSN: 0003-018X, November 10–14, 2013, Washington, D.C., American Nuclear Society, 2013. Journal of Physics Conference Series 11/2012; 395(1):2179-. DOI:10.1088/1742-6596/395/1/012179
 - 21) Grazia Monni, Mario De Salve, Bruno Panella, and Carlo Randaccio, Electrical Capacitance obe Characterization in Vertical Annular Two-Phase Flow, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 2013, Article ID 568287, 12 pages, ISSN: 1687-6075, doi:10.1155/4262, 2013.
 - 22) G. Monni, M. De Salve and B. Panella, Two-Phase flow instrumentation for nuclear accidents simulation, Keynote lecture KN3, pp. 1-23, Proc. 32nd UIT Heat Transfer Conference, Pisa, June 23-25, 2014.
 - 23) G. Monni, M. De Salve and B. Panella, Two-Phase flow instrumentation for nuclear accidents simulation, 2014 *J. Phys.: Conf. Ser.* **547** 012001, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/547/1/012001
 - 24) C. Bertani, M. Malandrone, B. Panella, Two-phase flow pressure losses in a horizontal impacting T-junction, Paper n. 122, pp. 1-10, Proc. 32nd UIT Heat Transfer Conference, Pisa, June 23-25, 2014.
 - 25) M. Caramello, C. Bertani, M. De Salve, B. Panella, Helical coil thermal hydraulic model, Paper n. 121, pp. 1-10, Proc. 32nd UIT Heat Transfer Conference, Pisa, June 23-25, 2014, 2014 *J. Phys.:*

Conf. Ser. **547** 012034, 2014, doi:10.1088/1742-6596/547/1/012034

- 26) G Monni, M De Salve and B Panella, Horizontal two-phase flow pattern recognition, *Exp. Therm. Fluid Sci.* (2014), 0894-1777, [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.expthermflusci.2014.04.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.04.010)
- 27) Grazia Monni, Mario De Salve, Bruno Panella, Two-phase flow measurements at high void fraction by a Venturi meter, *Progress in Nuclear Energy*, 77 (2014) 167-175.
- 28) M. De Salve, D. Milani, B. Panella, G. Roveta, Nitrogen Liquefaction: a Prototype Plant, IHTC15-9416, pp. 1-13, Proc. the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15, Kyoto, Japan, August 10-15, 2014.
- 29) Monni G, De Salve M, Panella B, TWO-PHASE ANNULAR FLOW IN A VERTICALLY MOUNTED VENTURI FLOW METER, HEFAT2014, Proc. 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 14 – 16 July 2014, Orlando, Florida, pp.1-9.
- 30) Bruno Panella, Cristina Bertani, Mario De Salve, Mario Malandrone, Gas Driven Circulation in an Air-Water Loop, *International Journal of Engineering and Innovative Technology, IJEIT*, pp. 8, 2014, Vol. 4, , ISSN: 2277-3754 (2014).
- 31) M. De Salve, D. Milani, B. Panella, G. Roveta, A Laboratory Plant for Gas Liquefaction, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, World Scientific Publishing Company, ISSN: 2010-1325 ,Vol. 23, 1, p. 9, 2015.
- 32) M. Caramello, M. Gregorini, M. De Salve, C. Bertani, A. Alemberti, B. Panella, Thermal hydraulic analysis of Alfred bayonet tube steam generator, Proc. ICAPP 2015 May 03-06, 2015 – Nice (France), Paper 15173, pp. 838 – 845.
- 33) M. Caramello, M. De Salve, C. Bertani, B. Panella, Thermal hydraulic comparison of helical coil and bayonet tube steam generators for Small Modular Reactors, Proc. ICAPP 2015 May 03-06, 2015 – Nice (France), Paper 15151, pp. 41 – 48.
- 34) Marco Caramello, Cristina Bertani, Mario De Salve, Bruno Panella, Helical coil thermal-hydraulic model for supercritical lead cooled fast reactors steam generators, Proc. ASME-ATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment, 17 – 20 May, 2015, Napoli, Italy, Paper n.118, p. 6, ISBN 978-88-98273-17-1.
- 35) Panella B, De Giorgi LC, De Salve M, Bertani C and Malandrone M (2015) Thermal hydraulics of accelerator driven system windowless targets. *Front. Energy Res.* 3:32. doi: 10.3389/fenrg.2015.00032, ISSN 2296-598X, *Front. Energy Res.*, 08 July 2015.
- 36) G Monni, M Caramello, M De Salve and B Panella, Venturi flow meter and Electrical Capacitance Probe in a horizontal two-phase flow, Proc. 33rd UIT Heat Transfer Conference, L'Aquila 22-24 June 2015, 040, p 10.