



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ENERGETICA**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**ANALISI SPERIMENTALE DI UNA MACCHINA BISTADIO
REVERSIBILE OPERANTE A CARICHI RIDOTTI IN MODALITA' POMPA**

RELATORE: PROF. GIORGIO PAVESI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

LAUREANDO: MANIERO ANDREA

ANNO ACCADEMICO
2013-2014

Indice

1. Sommario	pag. 5
2. Lista dei simboli	pag. 7
3. Introduzione	pag. 9
4. Stato dell'arte	pag. 15
5. Descrizione dell'impianto	pag. 17
5.1. OTF	pag. 17
5.2. Trasduttori di pressione	pag. 18
5.2.1. Primo tipo	pag. 18
5.2.2. Secondo tipo	pag. 20
5.3. Alimentatore stabilizzato	pag. 22
5.4. Sistema di acquisizione	pag. 23
5.5. Videocamera ad alta risoluzione	pag. 24
6. Analisi sperimentale	pag. 25
6.1. Caratterizzazione della curva Q-H della macchina in modalità pompa	pag. 25
6.2. Analisi del campo di pressione all'interno della macchina	pag. 29
6.2.1. 01/08/2013	pag. 33
6.2.1.1. Waterfall	pag. 33
6.2.1.2. PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$	pag. 35
6.2.1.3. Bispectra	pag. 37
6.2.1.4. PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrato	pag. 41
6.2.1.5. Wavelet	pag. 43
6.2.1.6. Crosswavelet	pag. 45
6.2.2. 09/09/2013	pag. 51
6.2.2.1. Waterfall	pag. 51
6.2.2.2. PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$	pag. 53
6.2.2.3. Bispectra	pag. 54
6.2.2.4. PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrato	pag. 55
6.2.2.5. Wavelet	pag. 57
6.2.2.6. Crosswavelet	pag. 59
6.2.3. 13/09/2013	pag. 63
6.2.3.1. Waterfall	pag. 63
6.2.3.2. PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$	pag. 65

6.2.3.3.	Bispectra	pag. 66
6.2.3.4.	PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrato	pag. 67
6.2.3.5.	Wavelet	pag. 69
6.2.3.6.	Crosswavelet	pag. 71
6.3.	Analisi del campo di moto del fluido tramite telecamera ad alta risoluzione	pag. 75
6.4.	Analisi numerica eseguita con il programma Ansys CFX	pag. 81
7.	Conclusioni	pag. 83
7.1.	Sensore 6	pag. 83
7.2.	Sensore 3	pag. 87
7.3.	Sensore 5	pag. 89
	Appendice A	pag. 93
	Appendice B	pag. 99
	Bibliografia	pag. 113
	Ringraziamenti	pag. 115

1. Sommario

Lo scopo di questa analisi è stato la ricerca delle cause che portano all'instabilità della macchina reversibile studiata, operante in modalità pompa ai carichi ridotti. Con l'ausilio di dodici microtrasduttori di pressione, inseriti all'interno di una paletta statorica, è stato possibile misurare il campo di moto del fluido attorno alla paletta stessa. L'analisi dei dati raccolti ha evidenziato che l'instabilità è dovuta alla nascita di una serie di vortici che, man mano che crescono, vanno a ostruire il canale statorico e, una volta ostruito totalmente, il vortice si estingue. Poi un altro canale viene interessato da questo fenomeno (lo stesso accade agli altri vortici).

Altre ricerche, svolte dalla stessa Università di Padova, avevano messo in luce che la frequenza portante di questa instabilità era riconducibile a $St = 0.666$. Le altre eventuali frequenze trovate erano combinazioni non lineari delle frequenze fondamentali ($St = 1$, $St = 0.071$ e $St = 0.666$).

Nel corso di questa analisi si è scoperto che anche $St = 0.333$, in alcuni casi, è una frequenza portante dell'instabilità e non una combinazione non lineare di altre frequenze.

Una seconda analisi video condotta ai carichi ridotti, ha confermato la presenza di una instabilità che si presenta sottoforma di uno stallo rotante: un vortice non stazionario nel tempo e nella posizione. Questi risultati sono stati poi confrontati con un'analisi numerica eseguita con il programma di calcolo Ansys CFX.

Il confronto ha confermato i risultati ottenuti nella prova sperimentale.

2. Lista simboli

larghezza	B	[m]
diametro	D	[m]
raggio	R	[m]
frequenza	f	[Hz]
prevalenza pompa	h	[m]
densità fluido	ρ	[kg/m ³]
costante gravitazionale	g	[m/s ²]
intervallo di tempo di riferimento	Δt	[s]
rendimento in funzione della portata	$\eta(Q)$	[-]
rendimento di carica (charge)	η_c	[-]
rendimento di scarica (discharge)	η_d	[-]
rendimento del sistema	η_s	[-]
indici di frequenza	k,l	[-]
velocità di rotazione	n	[rpm]
numero dei segmenti di un segnale	N	[-]
numero pale	n_b	[-]
velocità specifica	n_q	[m ^{0.75} s ^{-1.5}]
numero caratteristico	ω_s	[-]
portata	Q	[l/s]
portata nominale	Q_{des}	[l/s]
portata relativa	$Q_{rel} = Q / Q_{des}$	[-]
numero di Strouhal	$St = \pi D_2 f / n_b U_2$	[-]
velocità periferica	U	[m/s]
trasformata di Fourier del segnale x(t)	X(f)	
trasformata di Fourier del segnale y(t)	Y(f)	
trasformata wavelet	W(s,n)	
crosswavelet spectrum	$W_{xy}(s,n)$	
trasformata crosswavelet	$WC_{xy}(s,n)$	
costante corrispondente alla finestra di Hanning	W_H	[-]
wavelet madre	$\Psi(t)$	
power spectrum del segnale x(t)	G_{xx}	[Pa ²]
angolo palare di uscita	β	[deg]
angolo palare di ingresso	α	[deg]

3. Introduzione

Con l'avvento delle fonti rinnovabili, ora più che mai, c'è bisogno di un efficace sistema di controllo della rete nazionale in grado di adattarsi sia alle variazioni di carico sia all'aleatorietà della produzione di energia da alcune fonti particolari (pensiamo all'aleatorietà del vento o del sole). Con queste premesse è facile intuire che un buon sistema di controllo deve essere in grado di adattarsi il più velocemente possibile a queste variazioni e questa esigenza si traduce in sistemi di produzione di energia sempre più veloci.

Come spesso accade in questi casi, le condizioni operative di maggior comfort per l'uomo sono le condizioni operative più critiche per le centrali. Infatti una centrale, qualsiasi essa sia, ha il massimo rendimento e la massima durata (vita dei componenti) in condizioni nominali mentre le variazioni di carico sono viste come sollecitazioni che mettono alla prova la centrale stessa e ne riducono la vita media dei componenti.

Ogni centrale ha un suo tempo di avviamento e di regolazione (più alto è il tempo di avviamento di una centrale più alto sarà il tempo di regolazione e quindi basso grado di modulazione dell'energia prodotta):

- le centrali più lente sono le centrali termoelettriche e nucleari: queste centrali ci mettono anche alcuni giorni per andare a regime (grosse centrali che vanno scaldate lentamente) e quindi sono adatte a fornire l'energia base, non la modulazione del carico.

- le centrali turbogas sono centrali abbastanza veloci in quanto riescono ad arrivare a pieno carico in circa mezzora. Questa caratteristica rende queste centrali adatte alla modulazione del carico.

- le centrali idroelettriche sono le centrali più veloci (5-10 minuti per arrivare a regime da ferme) e sono anche quelle che risentono meno della parzializzazione del carico e delle continue accensioni o spegnimenti.

Oltre all'aspetto pratico, bisogna tener conto dell'aspetto economico della produzione di energia: infatti le centrali più lente (termoelettrico e nucleare) sono anche le centrali che utilizzano combustibili più economici. Le centrali turbogas, funzionando a metano, hanno un costo dell'energia prodotta sensibilmente più elevato. L'ideale ancora una volta è la centrale idroelettrica che, essendo alimentata da una fonte rinnovabile, ha costo variabile di produzione dell'energia nullo.

Altro grande problema riguarda l'incapacità di poter immagazzinare grandi quantitativi di energia elettrica: da qui la necessità che il sistema di controllo della rete elettrica sia efficiente in quanto tutta l'energia che viene prodotta viene consumata nel medesimo istante.

I dispositivi in grado di svolgere questa operazione sono le batterie che, oltre ad un costo elevato, hanno una capacità ridotta e un rendimento non unitario (i convertitori AC/DC e DC/AC hanno $\eta < 1$, ma anche la batteria stessa non riesce ad immagazzinare tutta l'energia di carica $\eta_c < 1$ e di questa energia immagazzinata riesce a fornirne solo una parte $\eta_d < 1$).

Un altro modo di immagazzinare energia elettrica è quella di convertirla in energia meccanica nuovamente. È questo il principio alla base delle centrali idroelettriche provviste di sistema di pompaggio: l'acqua, che viene fatta scendere dal bacino di monte a quello di valle per produrre energia, viene pompata nuovamente nel bacino di monte consumando energia elettrica. La produzione di energia viene eseguita nelle fasce orarie di maggior richiesta mentre il pompaggio viene effettuato durante i momenti di bassa richiesta (durante la notte).

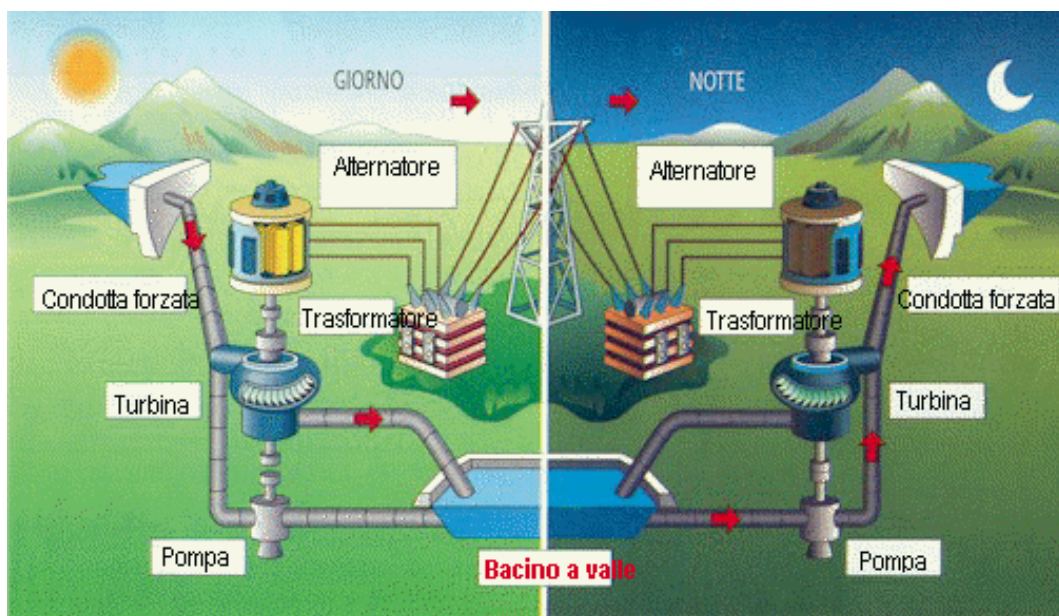
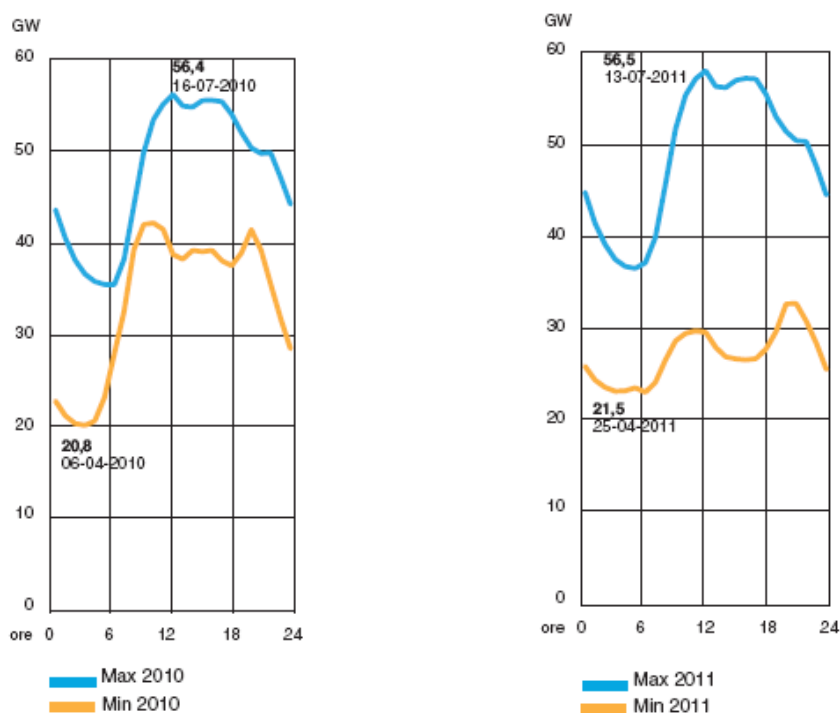


Fig. 3.1 – Schema di funzionamento di una centrale idroelettrica provvista di sistema di pompaggio



N.B. : Dati al netto dell'assorbimento per servizi ausiliari e pompaggio.

Nel 2011, la massima **potenza richiesta dal sistema elettrico nazionale**, è stata pari a 56.474 megawatt, registrata il 13 luglio alle ore 12, superiore dello 0,1% rispetto al picco del 2010 (56.425 megawatt, 16 luglio 2010). Nell'anno i valori di picco mensile si sono mantenuti, con qualche eccezione, sempre superiori a quelli dei rispettivi mesi del periodo precedente.

Fig. 3.2 – Assorbimento di energia elettrica dal sistema elettrico italiano

Anche in questo caso il rendimento non è unitario a causa delle perdite per attrito e dei vari rendimenti di generatore, turbine, pompe e motori (rendimento di produzione e pompaggio è circa $\eta_s \approx 0.7$, [16]) però, a differenza delle batterie, sono in grado di immagazzinare molta energia convertendola in energia meccanica e questo rende appetibile questa soluzione

A questi vantaggi non indifferenti possiamo aggiungere anche il vantaggio economico: infatti perché l'immagazzinamento sia economicamente vantaggioso io dovrei vendere l'energia prodotta a seguito del pompaggio ad un prezzo pari a

$$\epsilon = 1 / \eta_s = 1 / 0.7 = 1.4 \quad (3.1)$$

cioè un prezzo 40% maggiorato. Come si vede dalla fig. 3.2, la richiesta di energia varia notevolmente a seconda delle fasce orarie, allo stesso modo varia anche il prezzo dell'energia stessa: il costo dell'energia segue la legge della domanda e dell'offerta. Nei momenti di maggior domanda (le fasce orarie giornaliere) l'energia può arrivare a costare il doppio rispetto ai momenti di bassa domanda (fasce orarie notturne). Quindi se si sfrutta l'energia prodotta di notte per immagazzinare acqua nel bacino di monte per poi produrre energia di giorno, posso vendere questa energia ad un prezzo maggiorato del 100% (ben al di sopra del 40% imposto come limite inferiore di guadagno).



Fig. 3.3 – Energia accumulata dai sistemi di pompaggio

La formula dell'energia consumata da una pompa è la seguente

$$E = \rho * g * Q * H * \eta(Q) * \Delta t \quad (3.2)$$

dove ρ è la densità dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità, H è la prevalenza della pompa (che nelle centrali con pompaggio coincide con il dislivello tra bacino di monte e valle), Δt è l'intervallo di tempo preso come riferimento, Q è la portata della pompa e $\eta(Q)$ è il rendimento in funzione della portata.

Come si può vedere dalla fig. 3.3, l'energia per i pompaggi non è costante durante la notte e durante l'anno questo significa che anche la portata varia: per sfruttare al massimo i pompaggi, la pompa dovrebbe quindi essere in grado di variare l'energia assorbita da un valore nullo a quello nominale e questo significa regolare la portata nello stesso intervallo.

Un'altra esigenza, per ridurre i costi dell'impianto, è quella di utilizzare macchine reversibili nelle centrali di pompaggio (e non due macchine dedicate come accade nei sistemi ternari): di seguito è rappresentata la girante di una turbina Francis in fase di costruzione (fig. 3.4).

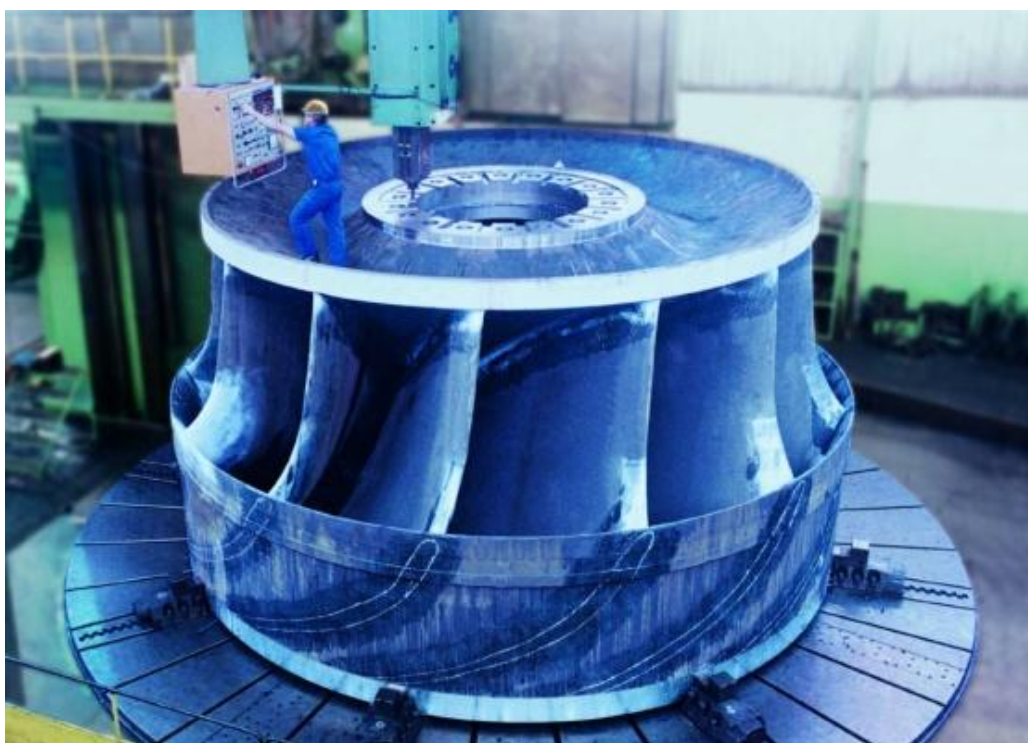


Fig. 3.4 – Turbina Francis in costruzione

Si intuisce subito come macchine di queste dimensioni abbiano un costo elevato.

In più le pompe hanno bisogno di un NPSH in ingresso, in generale, più elevato delle turbine e per questo motivo le pompe sono posizionate sotto le turbine.

Molte centrali idroelettriche sono scavate nella montagna (sono nate in periodo di guerra ed essendo punti strategici del paese dovevano essere protette), quindi posizionare una pompa al di sotto della turbina significa scavare maggiormente la roccia.

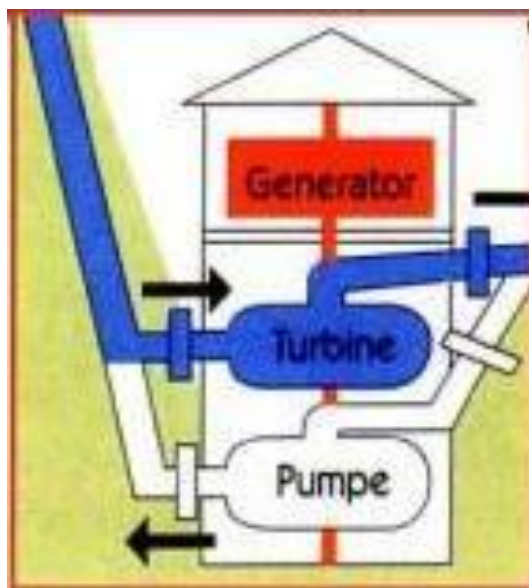


Fig. 3.5 – schema di un sistema ternario di un impianto idroelettrico provvista di sistema di pompaggio

Tutte queste motivazioni hanno condotto la ricerca, in questi ultimi trent'anni, nella costruzione di macchine reversibili aventi elevati rendimenti di conversione in grado di lavorare anche carichi ridotti (se richiesto).

La macchina su cui sono state svolte le prove (di cui si parlerà più in dettaglio nel paragrafo 5.1) è la riproduzione in scala di una macchina reversibile bistadio e biregolante attualmente in servizio nell’impianto “Luigi Einaudi”, una centrale idroelettrica in località Entracque (CN) avente come bacino di monte il lago di Chiotas e come bacino di valle il lago della Rovina situati sulle pendici del monte Argentera ad un dislivello di 1000m.

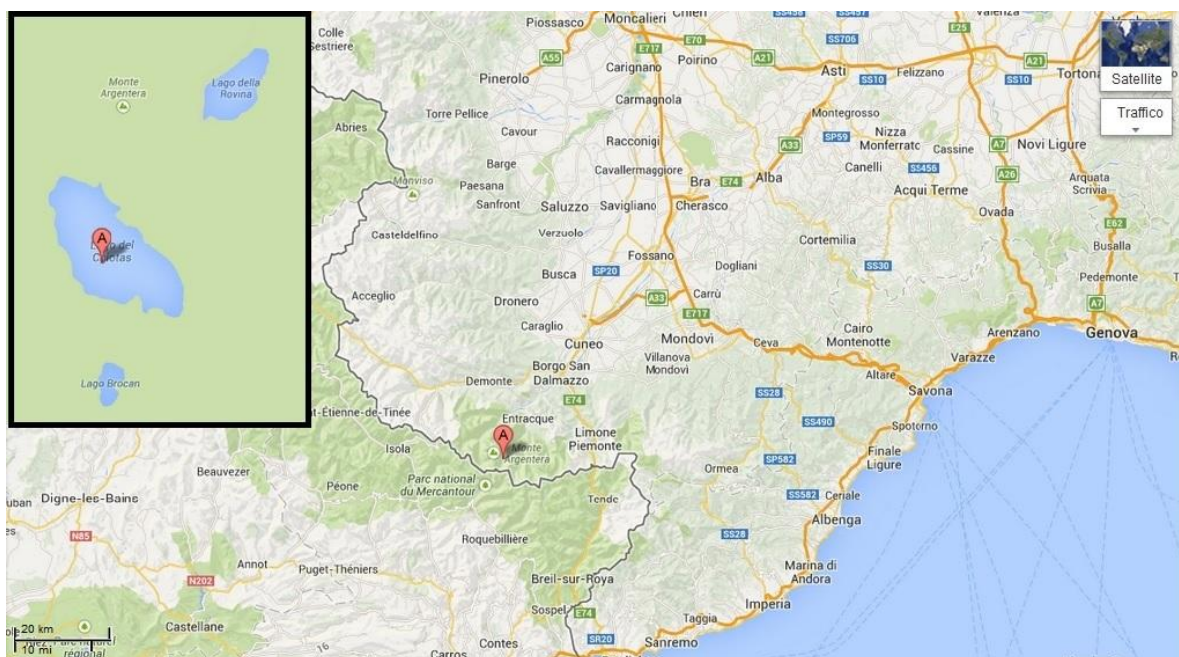


Fig. 3.6 – posizione dell’impianto idroelettrico “Luigi Einaudi”

Nel funzionamento di questa macchina ci si è accorti che ai bassi carichi si verifica un aumento del rumore e una perdita di efficienza seguita da una oscillazione di valori quali portata ed energia assorbita.

4. STATO DELL ARTE

I ricercatori, negli ultimi anni, hanno dedicato molto tempo all'analisi delle macchine reversibili alla ricerca delle motivazioni che portano a queste instabilità.

I fenomeni instabili che si verificano nelle turbomacchine, specialmente quelli dovuti all'interazione rotore-statore, hanno un'influenza negativa sulle performance della macchina in termini di efficienza, vibrazioni, rumore e pressioni pulsanti. Questa influenza negativa aumenta maggiormente in condizioni di fuori progetto.

Negli anni passati, svariate ricerche sono state condotte per studiare questi fenomeni concentrandosi sui meccanismi di generazione del rumore, andando a studiare il contenuto spettrale del rumore stesso potendo così ottenere informazioni sulle cause che lo generano.

La fig. 4.1 mostra l'andamento della pressione media all'interno della macchina, che sarà oggetto di studio in questa tesi, ed è il risultato di un'analisi condotta dal prof G. Ardizzon, docente dell'università di Padova.

Si può notare come in prossimità di $Q_{rel} = 0.6$ ci sia una notevole riduzione della pressione media.

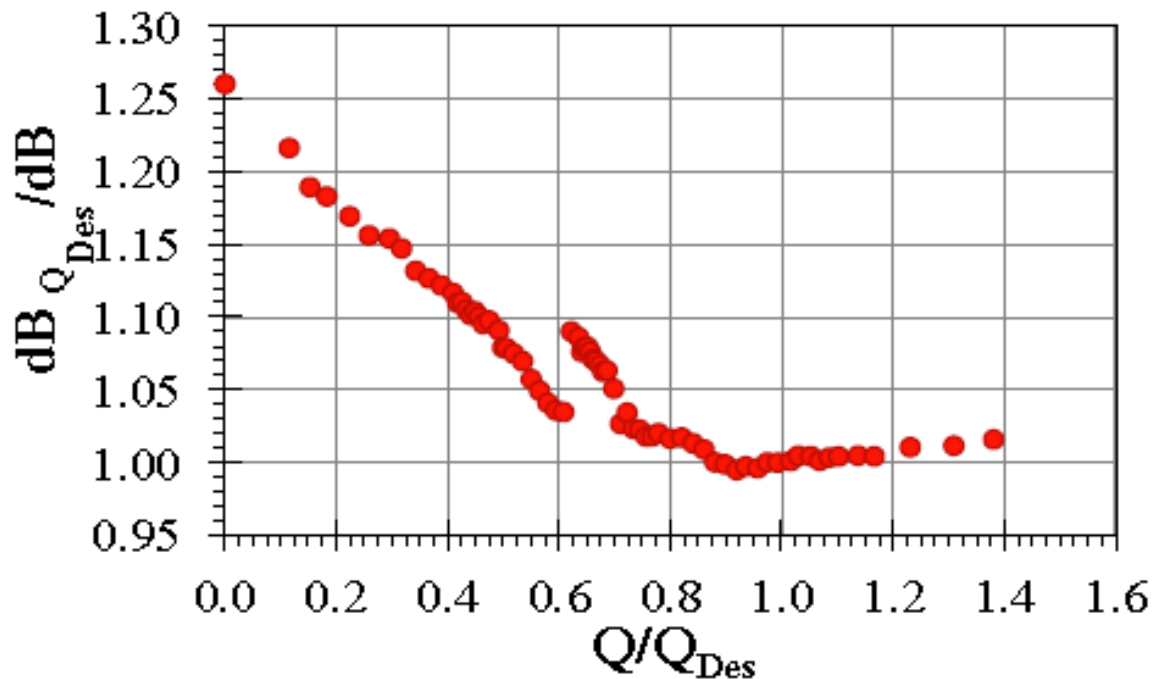


Fig. 4.1 – Andamento della pressione media in funzione della portata

Il secondo grande problema affrontato dai ricercatori in questi anni è stato rappresentare in modo chiaro ed esplicativo i risultati ottenuti. I due metodi che alla fine sono stati ritenuti i più adatti sono l'analisi di Fourier (e quindi un'analisi nel dominio della frequenza) e l'analisi tempo-frequenza con l'utilizzo delle wavelet.

La stessa Università di Padova si è impegnata in questa ricerca, pubblicando numerosi articoli pubblicati principalmente da G. Pavesi e G. Cavazzini ([2], [3], [4], [5], [7]) nei quali sono state raggiunte le seguenti conclusioni:

- In una turbomacchina sono presenti vari tipi di instabilità causate da tipi di interazioni diverse.
- Lo spettro è dominato da tre frequenze:
 - o $St = 1$ (che corrisponde a 70Hz), BPF (blade passage frequency).
Questa interazione non riguarda il fluido ma è dovuta dall'interazione statore-rotore
 - o $St = 0.071$ (che corrisponde a 5Hz), frequenza di fluttuazione del sistema idraulico.
Questa conclusione è avvalorata dal fatto che l'ampiezza del picco è indipendente dalla variazione di portata e dal tempo. In più questo picco era presente anche a macchina ferma. Per avvalorare la tesi è stata misurata la frequenza di oscillazione del serbatoio e delle condutture con un accelerometro osservando che la frequenza è confrontabile.
Si è capito quindi che la presenza di questa frequenza è da attribuirsi alle fluttuazioni dell'acqua all'interno del serbatoio.
 - o $St = 0.666$ (che corrisponde a 46.5Hz), frequenza dominante dell'instabilità.
Questa instabilità viene associata alla nascita di vortici e ricircoli all'interno della macchina.
La teoria dello stallo è stata confermata anche da altri ricercatori quali Krause[11], Sinha [12], Sano [13] e [15], Guleren e Pinarbasi [14].
- L'interazione statore-rotore(BPF) e le fluttuazioni del sistema idraulico, combinate tra loro, generano un complesso sistema pulsante di pressioni, a causa di combinazioni non lineari nello spettro.
- La struttura non è costante nel tempo ma cambia in modo pulsante.
- Tutti gli altri picchi presenti nello spettro sono combinazioni non lineari ed interazioni dei tre picchi sopracitati.

5. Descrizione dell'impianto

5.1. OTF

L'esperimento è stato condotto sulla "Open Turbomachinery Facility" (OTF), una macchina reversibile avente la cassa in plexiglass trasparente che rende possibile la visione all'interno della macchina anche mentre è in funzione.

L' OTF è la riproduzione in scala dello stadio di bassa pressione di una macchina bistadio reversibile della hydroart ($n = 600 \text{ rpm}$, $n_q = 37.5 \text{ m}^{0.75} \text{ s}^{-1.5}$, $\omega_s = 0.7$) che la stessa azienda ha fornito all'università di Padova per studiarne il comportamento ai carichi ridotti. Lo stadio di bassa pressione della macchina (in figura compreso tra i segmenti rossi) è composto da girante (in azzurro), dal canale di ritorno (in giallo) e dal distributore (la parte bianca compresa tra girante e canale di ritorno).

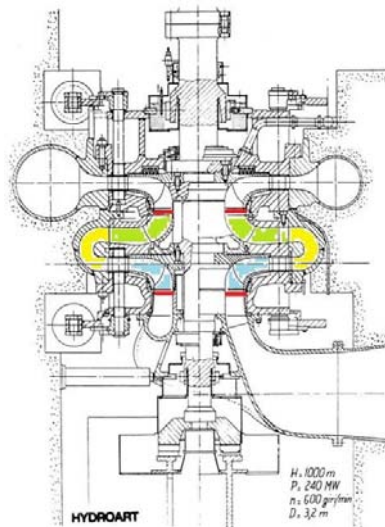


Fig. 5.1 – macchina bistadio reversibile della hydroart

L' OTF è stata usata per testare l'influenza di svariati parametri in studi precedenti sia in modalità turbina che in modalità pompa. La girante, che ha una struttura 3D per migliorare il rendimento, è stata precedentemente modificata per rimuovere le sorgenti di rumore causate dall'interazione tra rotore e statore così da rendere la configurazione girante-diffusore assialsimmetrica.



Fig. 5.2 – OTF

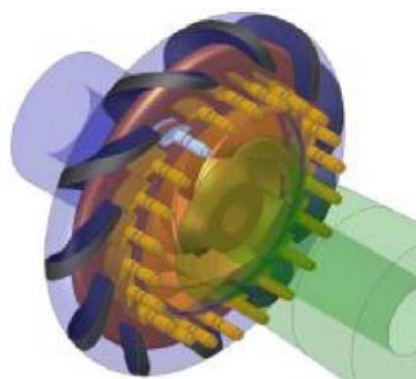


Fig. 5.3 – Modello 3D dell'OTF

Nella tabella 5.1 sono riportate le dimensioni dell' OTF

Girante				
D ₂ (mm)	B ₂ (mm)	n _b	β _{2c} (°)	φ _{des}
400	40	7	26.5	0.125
Distributore				
D ₃ (mm)	B ₃ (mm)	n _b	α _{3c} (°)	λ (°)
410	40	22	21.8	0.125
Canale di ritorno				
D ₄ (mm)	B ₄ (mm)	n _b	α _{2c} (°)	
516	40	11	30	

Tabella 5.1 – dimensioni della OTF dell'università di Padova

Il sistema idraulico è composto da una pompa esterna che alimenta un serbatoio, l'OTF e una valvola in uscita per controllare la portata. Il serbatoio delle dimensioni di 1.8 x 1.5 x 2.5 m³ è dotato di sfioratore così da mantenere l'altezza dell'acqua (e quindi la pressione idrostatica in ingresso della turbina) pressoché costante. Ai fini del nostro esperimento il livello d'acqua nel serbatoio verrà considerato costante.

5.2. Trasduttori di pressione

I sensori utilizzati per svolgere la prova si possono dividere in due gruppi:

- Sensori utilizzati per leggere i valori medi
- Sensori utilizzati per misurare le fluttuazioni dei valori

5.2.1. Primo tipo

I trasduttori di pressione, appartenenti al primo gruppo, sono di tre tipologie differenti

- Trasduttore di pressione relativa WIKA, tipo 891.13.500, che lavora in un range di pressioni da -1 ÷ 1 bar. Questo trasduttore è posizionato sulla tubatura in ingresso della girante.
- Trasduttore di pressione assoluto PHILIPS, tipo 9404 215 60161, che lavora in range di pressioni da 0 ÷ 2.5 bar. Questo trasduttore è posizionato sullo scarico della girante.
- Trasduttore di pressione differenziale WIKA, tipo PD-23/8666, che lavora in un range di portate da 0 ÷ 1.6 bar connesso a monte e a valle di un boccaglio corto.



Fig. 5.4 – trasduttori di pressione assoluta, relativa, differenziale

I trasduttori sono collegati a alla tubatura principale tramite dei tubicini di gomma. L'attacco alla tubatura avviene in quattro punti posti a 90° di distanza per fare sì che il sensore misuri la pressione media su tutta la sezione della tubatura (così da evitare che la misura venga falsata da eventuali anomalie di pressione locali).



Fig. 5.5 – sistema di collegamento tra tubatura e trasduttori

Per eliminare eventuali bolle dai tubicini di gomma sono state previste delle valvole a T per sfiatare il circuito. L'alimentazione dei primi due trasduttori è di 28V DC mentre per l'ultimo l'alimentazione è di 12V DC.

L'interfaccia tra trasduttori e il dispositivo di acquisizione è stata eseguita con un connettore configurabile della National Instruments modello CA-1000.

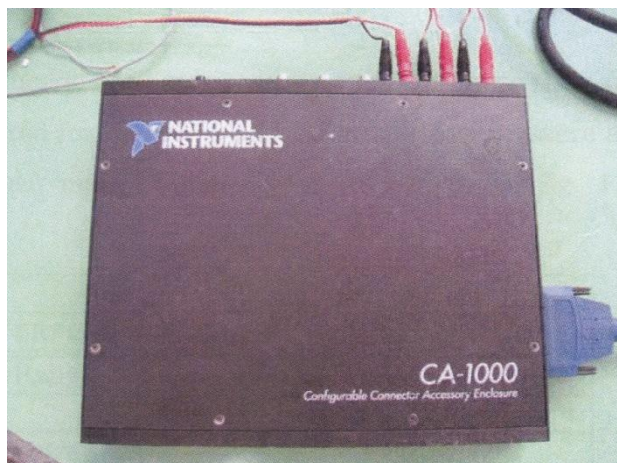


Fig. 5.6 – NI CA-1000

In questo connettore sono state inserite delle resistenze da $1k\Omega$ e da $5k\Omega$ per convertire l'output dei sensori (pin neri e rossi nella foto) di pochi milliampere di corrente in tensione, in accordo con le caratteristiche del dispositivo di acquisizione.

5.2.2. Secondo tipo

I trasduttori di pressione del secondo gruppo, costruiti dalla KULITE SEMICONDUCTORS, sono stati posizionati all'interno di una paletta distributrice.



Fig. 5.7 – micro-trasduttori della KULITE SEMICONDUCTORS

Questi micro-trasduttori sono in grado di misurare il campo di pressioni attorno la paletta. Lavorano in un range di pressioni comprese tra $0\div3.5$ bar e hanno una tensione di alimentazione di 10V DC.

La disposizione e la sensibilità di questi trasduttori sono riportati di seguito

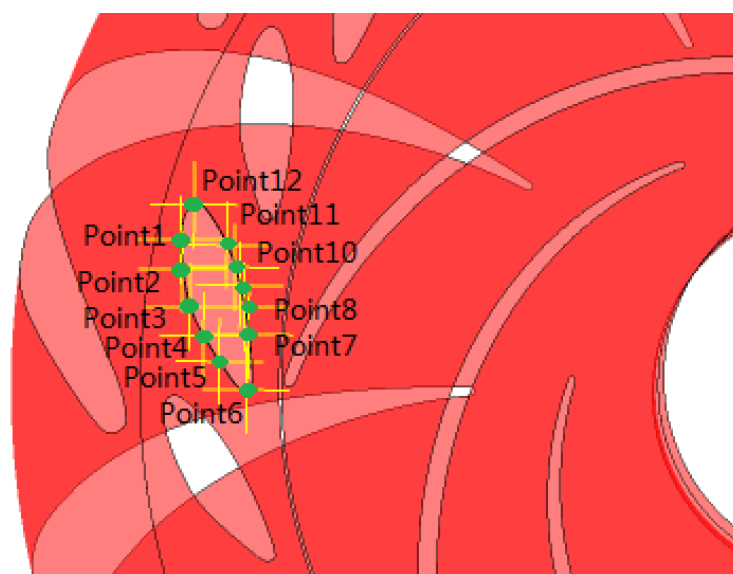


Fig. 5.8 – posizione dei trasduttori all'interno della paletta

Ogni punto corrisponde ad un sensore

Point number	Sensor number	Sensitivity
point1	110	28.586 mV / bar
point2	7677-4-299	58.276 mV / bar
point3	117	28.491 mV / bar
point4	99	28.617 mV / bar
point5	116	28.420 mV / bar
point6	7677-4-297	50.088 mV / bar
point7	118	28.509 mV / bar
point8	46	26.150 mV / bar
point9	192	2857.639 mV / bar
point10	7677-4-307	58.276 mV / bar
point11	113	28.374 mV / bar
point12	44	26.194 mV / bar

Tabella 5.2 – Sensibilità dei micro-trasduttori di pressione

5.3. Alimentatore stabilizzato

I micro-trasduttori sono stati alimentati con un alimentatore stabilizzato della “Thurlby Thandar Instruments” QL355T.



Fig. 5.9 – alimentatore stabilizzato serie QL

Dalle seguenti caratteristiche:

PSU, TRIPLE 35V 5A + 5V 1A PRECISION	
Power Supply Output Type:	Adjustable
No. of Outputs:	3
Output Voltage Max:	35V
Power Rating:	105W
Plug Type:	Euro, UK
External Depth:	300mm
External Length / Height:	171mm
External Width:	282mm
Height:	160mm
Length:	290mm
Load Regulation:	0.01%
Mounting Type:	Bench
Output Current:	5A
Output Current Nom - Output 2:	3A
Output Current Nom - Output 3:	500mA
Output Voltage:	35V
Output Voltage Nom - Output 2:	15V
Output Voltage Nom - Output 3:	6V
Power Supply Type:	Bench
Supply Voltage:	230V
Supply Voltage Typ:	115V AC, 230V AC
Weight:	10.5kg

Tabella 5.3 – scheda tecnica dell'alimentatore stabilizzato QL355T

5.4. Sistema di acquisizione dati

I segnali di pressione, forniti dalle varie tipologie di sensori, sono state acquisite tramite due differenti sistemi di acquisizione.

I trasduttori del primo gruppo, quelli che misurano i valori medi, furono acquisiti con il dispositivo della National Instruments, modello 6070E che ha le seguenti caratteristiche

National Instruments 6070E	
Risoluzione	12 bits
Massima frequenza di campionamento	1.25 MS / s
Input range	± 0.5 a $\pm 10V$
Output range	$\pm 10V$

Tabella 5.4 – scheda tecnica del dispositivo NI 6070E

I trasduttori del secondo gruppo sono stati acquisiti con il dispositivo della stessa azienda, modello 4472 che ha le seguenti caratteristiche

National Instruments 4472	
Risoluzione	24 bits
Massima frequenza di campionamento	102.4 MS / s
Input range	± 0.5 a $\pm 10V$

Tabella 5.5 – scheda tecnica del dispositivo NI 4472

Entrambi i dispositivi sono stati montati su una work station della National Instruments, modello NI PXI-1042



Fig. 5.10 – NI PXI-1042

che ha le seguenti caratteristiche

National Instruments PXI-1042	
Processore	1266 MHz
Hard-disk	20 Gb
RAM	128 Mb
Sistema operativo	Windows 2000 professional
Software per l'elaborazione dati	Labview 7.0

Tabella 5.6 – scheda tecnica del dispositivo NI PXI-1042

Prima di svolgere le misurazioni è stato necessario calibrare i trasduttori di pressione.

5.5. Videocamera ad alta definizione

Per eseguire l'ultima parte dell'esperimento si è ricorso all'utilizzo di una videocamera della "Photron" ad alta risoluzione



Fig. 5.11 – Videocamera ad alta risoluzione della "Photron"

dalle seguenti caratteristiche:

Lens mount	C mount
Imaging sensor	Progressive scan 1/3-inch CCD, square pixels
Recording media	IC memory (SD-RAM)
Recording capacity	128MB: 543 full frames, 2.2 seconds 256MB: 1,087 full frames, 4.3 seconds 384MB: 1,631 full frames, 6.5 seconds 512MB: 2,175 full frames, 8.7 seconds
Framing rates	Full frame: 30, 60, 125, 250 fps
	Partial frame: 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000 fps
	Frame rate availability dependant on model
Pixel resolution	Full frame: 512 x 480 pixels
	Partial frame: 512 x 240; 256 x 240; 256 x 120 pixels 128 x 120; 128 x 80; 128 x 34 pixels
	Note: Pixel resolution depends on framing rate (see Table 3).
Grayscale	Monochrome: 8 bits (256 steps) Color: R, G, B 8 bits each (24 bits color, 256 steps)
Playback rates	1, 2, 4, 8, 15, 30 fps
Electronic shutter	1/frame rate; 1/500; 1/1000; 1/2000; 1/3000; 1/5000; 1/10000; 1/20000; 1/40000; 1/65000; 1/80000; 1/100000; 1/120000 second Note: Shutter speed availability depends on framing rate (see Table 4).
Trigger input (TTL) Trigger input	TTL +5 V positive going (Contact) Switch contact Sync output
Sync Output	Vertical sync signal (master) to drive other FASTCAM-PCI slaves boards (Negative 3.3 Vp-p)
Sync input	Vertical sync signal (negative 3.3 Vp-p)
Output signal 1	Vertical sync output+5V TTL, negative
Output signal 2	Asynchronous random reset timing signal +5V TTL, positive
Power	From the PCI bus (+3.3V; +5.0V; -12V)
Ambient temperature	0 to 35 degrees Celsius (32 to 95 F), no condensation
Power consumption	+3.3 V: 2 A; +5.0 V: 2 A; -12 V: 0.5 A (32.6 watts)
Dimensions	Camera head: 160(6.3") W x 330(13")D x 180(7.1")H mm
	PCI board: 312(12.6") W x 106(4.2")H x 16(0.6")T mm (PCI full size standard)
Weight	Camera head: 1.1 kg (2.4 lbs) (including 6-meter camera cable)

Tabella 5.7 – scheda tecnica della videocamera FASTCAM

In particolare il modello FASTCAM-PCI 1k, a disposizione del laboratorio, riesce ad acquisire video con 500 fps dalle dimensioni di 512 x 240 pixel.

6. Analisi sperimentale

L'esperimento, condotto sull'OTF, è stato diviso in varie parti. L'analisi sperimentale, eseguita in laboratorio, è stata condotta in parallelo con un'analisi numerica eseguita con il programma di calcolo Ansys CFX (che non fa parte di questa tesi ma di cui verranno proposti alcuni risultati per compararli con i risultati ottenuti dall'analisi sperimentale).

L'analisi sperimentale a sua volta è suddivisa in tre parti:

- Caratterizzazione della curva Q-H della macchina in modalità pompa (curva caratteristica).
- Analisi del campo di pressione all'interno della macchina ed elaborazione dei dati.
- Analisi del campo di moto del fluido tramite telecamera ad alta risoluzione.
- Analisi numerica eseguita con il programma Ansys CFX (solo risultati).

Di seguito verranno descritte le varie prove e verranno proposti i risultati ottenuti.

6.1. Caratterizzazione della curva Q-H della macchina in modalità pompa

La caratterizzazione della curva Q-H è stata eseguita misurando simultaneamente i valori mediati di pressione in ingresso ed uscita dalla macchina e la portata (appendice A) a velocità di rotazione costante. L'acquisizione è stata effettuata utilizzando il programma Labview: questo programma è in grado di gestire grandi quantità di dati provenienti dai sensori in modo simultaneo. Un'altra caratteristica di questo programma è la possibilità di creare un'interfaccia utente in grado di visualizzare in modo semplice ed immediato i valori letti dai sensori ed eventuali risultati.

Nella seguente tabella sono riportati i parametri con cui si è svolta la prova.

The screenshot shows the LabVIEW interface for pump data acquisition. The interface is divided into several panels:

- Data Acquisition:**
 - Physical Channel:** % Dev3/a0:3
 - Minimum Value:** -10.00 V
 - Maximum Value:** 10.00 V
 - Acquisition:**
 - sample mode:** Finite
 - Buffer size:** 10000000
 - Sample Rate (Hz):** 1000.00
 - Samples per Channel:** 1000
 - Acquisition Time:**
 - 0.50 second**
 - Number of Acquisitions:** 100
 - 750.064 Atmospheric [mm Hg]**
- Transducer Data:**
 - Flow Meter:**
 - Nosepiece:** 164.95 d [mm] 258 D [mm]
 - 0.050023 Transducer Sensitivity [bar/V]**
 - 0.00435695 Offset**
 - Inlet Pressure Transducer:**
 - Code Transducer:** VIKA S514
 - 0.3833 Transducer Sensitivity [bar/V]**
 - 1.523 Offset [bar]**
 - 0 Elevation [mm]**
 - 0 Distance [mm]**
 - Outlet Pressure Transducer:**
 - Code Transducer:** Philip 8918
 - 0.1582 Transducer Sensitivity [bar/V]**
 - 0.46 Offset [bar]**
 - 0 Elevation [mm]**
 - 0 Distance [mm]**
 - Torque:**
 - Code Transducer:** Kistler 4503A200W0000C00
 - 40.0045 TorqueSensitivity [Nm/V]**
 - 0.014639 Offset**
- Pump Data:**
 - Test rotation velocity [rpm]:** 600
 - Scrittura Dati:**
 - Home Directory:** C:\HydroArt\Pumping\Experimental Test\Performance
 - Nome Files Acquisizione:** Test_600rpm
 - Excel File:** ON
 - Date:** 1/18/01
 - Time:** 11:32 AM
 - Name Operator:** X
 - Test Notes:**
 - Description:** Acquisizione della curva caratteristica Pompa:

Fig. 6.1.1 – schermata del programma dove impostazione parametri per la lettura della portata

Di seguito viene riportata l'interfaccia utente del programma utilizzato per l'acquisizione di portata, pressione a monte e a valle della macchina e prevalenza (dato deducibile dalla differenza di pressioni)

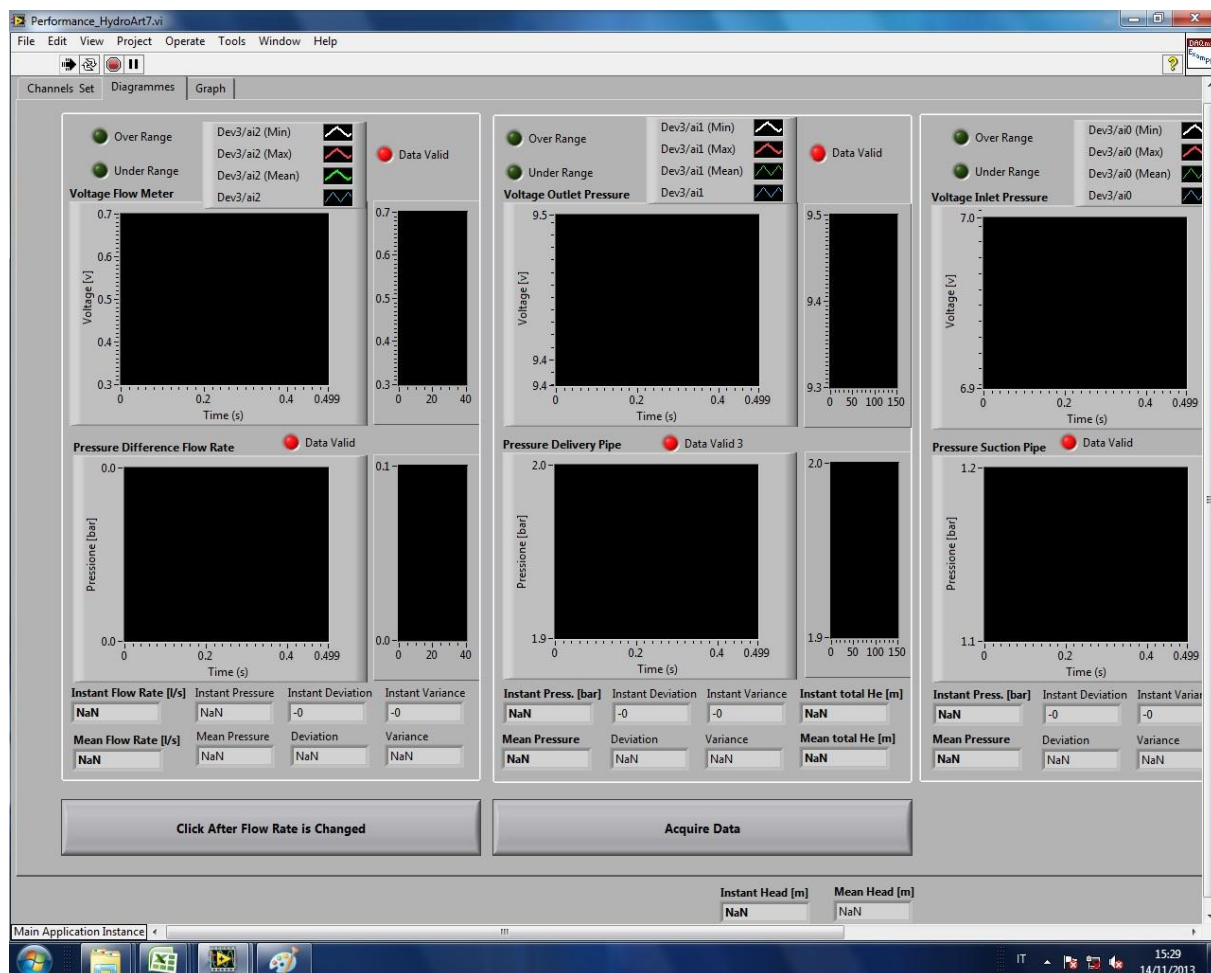


Fig. 6.1.2 – interfaccia utente del programma per la lettura della portata

Per ogni portata è stata fatta la media dei valori letti in 100 acquisizioni (di 0.5 secondi l'una): ciò significa che ogni lettura ha una durata di 50 secondi. Questo procedimento serve per ottenere un valore medio non influenzato dalle oscillazioni istantanee causate dalle fluttuazioni del sistema idraulico. È intuibile come all'aumentare delle acquisizioni la media risulti più accurata (perché eseguita su più valori) ma allora stesso tempo aumenti il tempo di acquisizione: 50 secondi per ogni lettura è stato valutato come ottimo compromesso tra l'accuratezza della lettura e il tempo impiegato per l'acquisizione. Lo stesso procedimento è stato ripetuto per tutto il campo di portate ottenendo così la seguente curva.

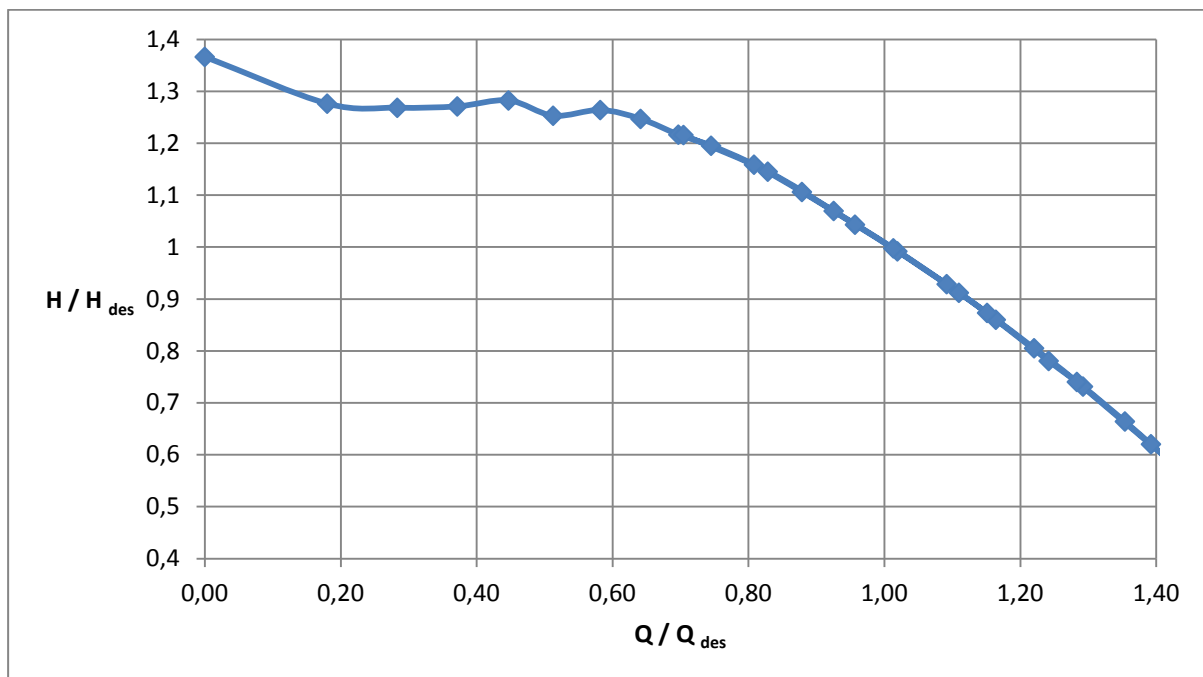


Fig. 6.1.3 – curva caratteristica della macchina

Nonostante siano stati usati i valori medi per costruire questa curva, si può osservare come la fascia di portate compresa tra $0,3 Q_{des}$ e $0,7 Q_{des}$ abbia due segmenti con pendenza positiva (zone instabili di funzionamento).

Nella fig. 6.1.4 viene proposto un ingrandimento della zona di instabilità per osservare in dettaglio l'andamento della curva.

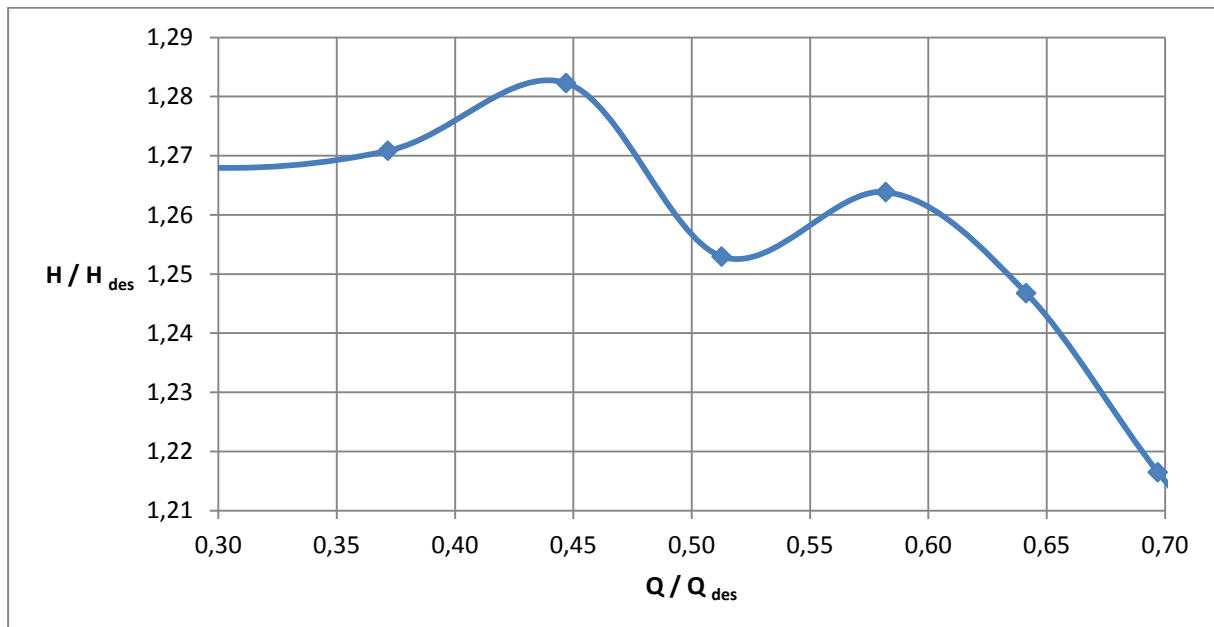


Fig. 6.1.4 – dettaglio della curva caratteristica della macchina

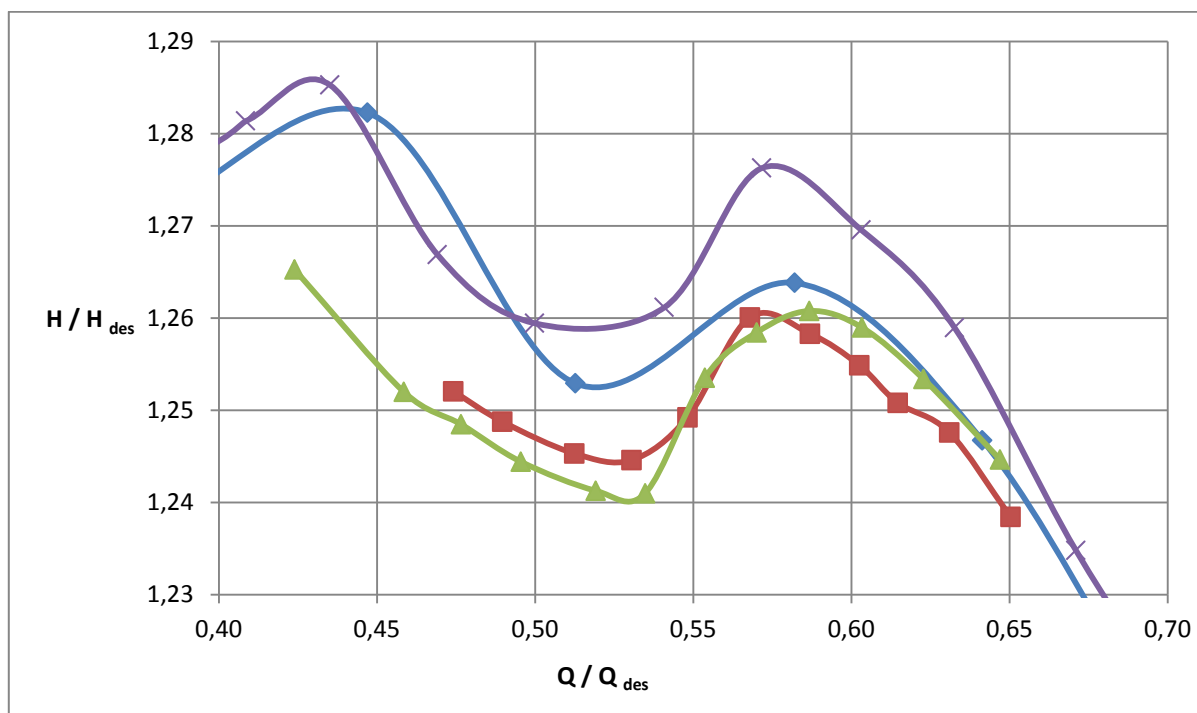


Fig. 6.1.5 – dettaglio delle curve caratteristiche della macchina acquisite in diverse giornate di prove

Nella fig. 6.1.5 sono riportate le curve caratteristiche rilevate in giornate di prova diverse. Si nota come l'instabilità della macchina non influisce solo sulla pendenza della curva ma anche sulla ripetitività della curva stessa. Per questa motivazione il confronto tra i dati deve essere fatto a livello qualitativo e non quantitativo.

Lo scopo della prova successiva, l'analisi del campo di pressioni all'interno della macchina, sarà proprio quello di cercare le cause che generano questa instabilità. Proprio per questo motivo la ricerca di fenomeni instabili, e quindi la raccolta dati, verrà concentrata principalmente in questa fascia di portate.

6.2. Analisi del campo di pressione all'interno della macchina

Utilizzando nuovamente labview, è stato possibile eseguire l'acquisizione dei dati letti dai dodici microtrasduttori in modo simultaneo potendo così ricostruire il campo di pressioni, e di conseguenza il campo di moto del fluido, all'interno di un canale statorico (canale delimitato da due palette statoriche). Ovviamente essendo i segnali in ingresso diversi dal caso precedente, utilizzando un dispositivo diverso (prima acquisivo i segnali di pressione dai traduttori di pressione del primo tipo utilizzando il dispositivo NI 6070E, ora invece l'acquisizione dei dodici microtrasduttori avviene con il dispositivo NI 4472) ed avendo uno scopo diverso, il programma di analisi dati dovrà necessariamente essere diverso da quello utilizzato per la curva caratteristica. L'interfaccia utente del programma di acquisizione dati dai dodici microtrasduttori è riportata di seguito:

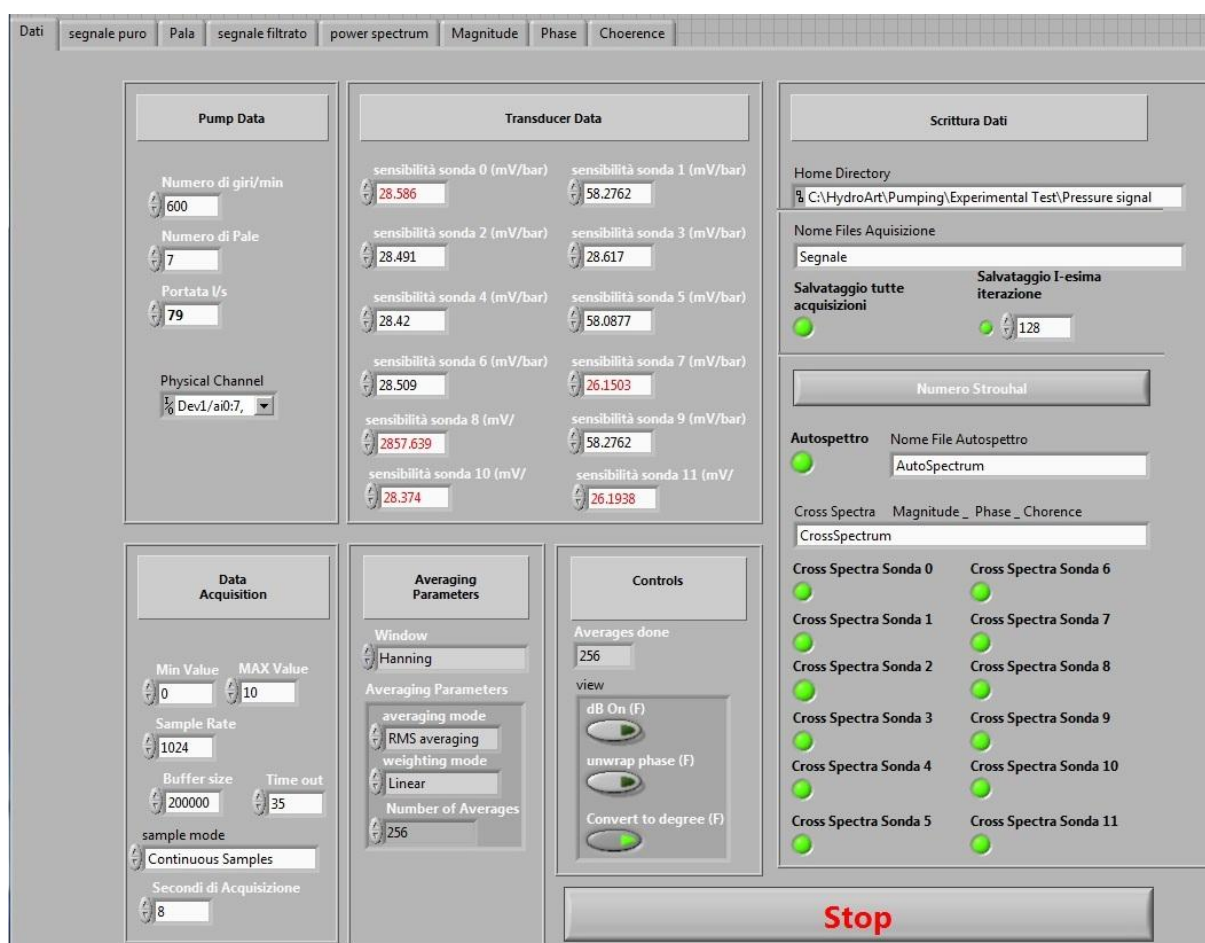


Fig. 6.2.1 - schermata del programma dove impostazione parametri per la lettura dei trasduttori di pressione

Durante la prova pratica, l'utilizzo di questo programma è imprescindibile dal primo: infatti mentre il secondo programma acquisisce solo i dati dei microtrasduttori di pressione, è necessario utilizzare il primo programma per la lettura della portata (e quindi per la regolazione dell'impianto). Il dato della portata viene poi inserito dal secondo programma, in fase di salvataggio, nel nome del file. Il nome del file è essenziale per il programma di analisi dati (scritto con Matlab) il quale risale alla portata al quale è stata effettuata la prova dal nome del file stesso. Del programma di analisi dati verranno proposti in questa tesi solo i risultati.

Per ogni portata analizzata, sono state fatte 256 acquisizioni di 8 secondi l'una, potendo così creare una matrice contenente i 256 segmenti di tempo e i segnali dei 12 micro-trasduttori.

Per scegliere il numero di acquisizioni adatto è stato preso il numero di acquisizioni minimo, che se aumentato non cambiava significativamente il risultato dell'analisi dati ottenendo nel nostro caso 256 acquisizioni. Successivamente questi segmenti sono stati analizzati con una sovrapposizione (overlapping) del 50% ottenendo così un numero doppio di segmenti. I dati sono stati filtrati con la finestra di Hanning (appendice B) per impedire il fenomeno dell'aliasing ed eventuali perdite di errori.

I segnali di pressione sono stati analizzati sia in frequenza che in tempo-frequenza utilizzando rispettivamente il PSP (Power Spectral) e la WT (Wavelet Transform) (appendice B).

Il PSP si basa sulla DFT (Discrete Fourier Trasform) che permette di analizzare in frequenza un segnale, scomponendolo nelle varie componenti in frequenza. Il PSP si determina con la seguente equazione:

$$G_{xx}(f) = \frac{1}{N W_H} \sum_{k=1}^N [X_k^*(f) X_k(f)] \quad (6.1)$$

Dove N è il numero di segmenti in cui il segnale viene diviso (nel nostro caso N = 256), W_H è una costante corrispondente alla finestra di Hanning, $X_k(f)$ è la DFT del k-esimo segmento del segnale x mentre $X_k^*(f)$ è il complesso coniugato della DFT. L'analisi in frequenza di un segnale consente di trovare e analizzare i componenti dello spettro ma non permette di assegnare un valore temporale a queste componenti.

Per fornire informazioni sull'evoluzione temporale di queste componenti si è utilizzata la WT avente la seguente equazione:

$$W(s, n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \left(\sqrt{\frac{2\pi s}{\delta t}} \Psi_0^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t} \right) \quad (6.2)$$

Dove X_k è la DFT del segnale x_n , k è l'indice di frequenza, N è la lunghezza della serie di dati, s è la scala wavelet, δt è l'intervallo di campionamento del segnale, n è l'indice temporale localizzato, $\Psi_0^*(s\omega_k)$ è il complesso coniugato della trasformata di Fourier scalata con la "wavelet madre" $\psi(t)$, ω_k è la frequenza angolare (se $k \leq N/2$ allora $\omega_k = 2\pi k/N\delta t$, se $k \geq N/2$ allora $\omega_k = -2\pi k/N\delta t$). $\sqrt{2\pi s/\delta t}$ è un fattore di normalizzazione per ottenere un risultato ad energia unitaria per ogni scala. La scelta della corretta wavelet madre dipende da molti fattori (Farge [17]). In questo caso è stata scelta come wavelet madre la "Morlet wavelet complessa" con $2\pi f_0 = 6$, questo per avere un buon bilanciamento tra tempo e frequenza e ritornare come informazioni sia ampiezza che fase.

Per determinare la relazione tra due segnali di pressione $x(t)$ e $y(t)$ nel dominio tempo-frequenza, è stata usata la WC (wavelet cross-correlation), definita da Li [18], avente la seguente formula:

$$WC_{x,y}(s, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} W_x^*(s, b) W_y(s, b + \tau) db \quad (6.3)$$

Dove τ è il ritardo tra i due segnali, W_y è la WT del segnale $y(t)$, W_x^* è il complesso coniugato della WT del segnale $x(t)$, b è la location e s è la scala. In particolare, per due segnali di pressione campionati x_n e y_n con le relative trasformate wavelet $W_x(s, n)$ e $W_y(s, n)$, il crosswavelet spectrum è definito come

$$W_{xy}(s, n) = W_x(s, n) W_y^*(s, n) \quad (6.4)$$

Dove $W_y^*(s, n)$ è il complesso coniugato della $W_y(s, n)$.

In fine, per una rappresentazione più agevole dei risultati, si è scelto di utilizzare in numero di Strouhal

$$St = \frac{\pi D_2 f}{n_b U_2} \quad (6.5)$$

un numero adimensionale per esprimere la frequenza in relazione alla distanza pala-pala e la velocità periferica della macchina. Il vantaggio è riconducibile al fatto che il numero di Strouhal è adimensionale e quindi svincolare i risultati ottenuti dalla frequenza.

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi dei dati acquisiti in diverse giornate di test. A causa del carattere estremamente instabile del fenomeno studiato, i dati dovranno essere necessariamente letti in modo qualitativo e non quantitativo: infatti giorni adiacenti potevano offrire anche risultati molto diversi sia in termini di ampiezza che in termini di campo delle portate interessate: nonostante queste incertezze, i dati raccolti evidenziano in modo chiaro il fenomeno studiato.

Per ogni serie di dati saranno proposti i seguenti grafici:

- Waterfall: l'insieme dei PSP letti da un trasduttore ad ogni portata.
- PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$: vengono riportati in un grafico i valori del PSP relativo alle sole frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ in tutto il campo di portate.
- Bispecta: analisi non lineare dei dati ottenuti per verificare se le frequenze visualizzate nel PSP sono frequenze fondamentali o se sono una combinazione non lineare di frequenze fondamentali.
- PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrato: vengono riportati in un grafico i valori del PSP relativo alle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ ma solo nelle portate in cui queste frequenze sono state individuate come frequenze fondamentali. In caso contrario il valore viene posto uguale a zero.
- Wavelet: grafico che mostra l'analisi wavelet solo delle portate significative
- Crosswavelet: grafico che mostra la relazione tra due segnali di pressione e la loro fase. Permette di capire la coerenza del segnale stesso in base all'andamento della fase.

Per ottenere delle analisi coerenti, è necessario confrontare tra loro dati acquisiti nella stessa giornata di prove. Per questa ragione, nei prossimi capitoli, verranno proposte le analisi dati suddivise per giorni di acquisizione.

6.2.1. Dati 01/08/13

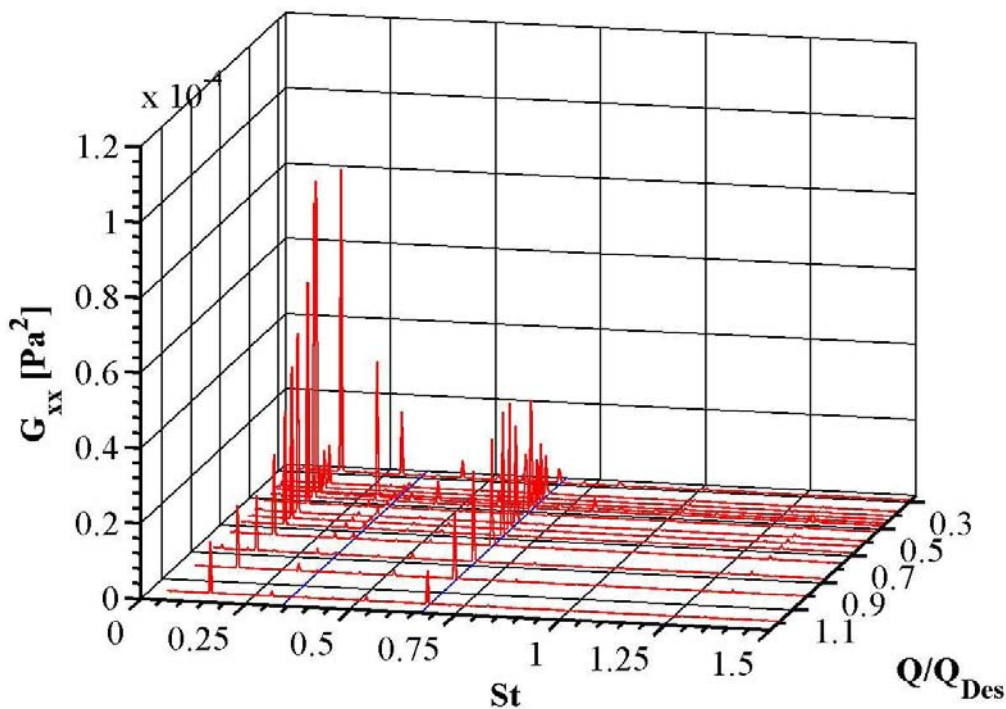
6.2.1.1. Waterfall:

il waterfall è l'unione dei PSP, eseguiti per ogni portata, che vengono posti sullo stesso grafico. Questo permette di poter osservare come varia il PSP in relazione con la portata ed eventualmente osservare in quali zone si intensificano i picchi.

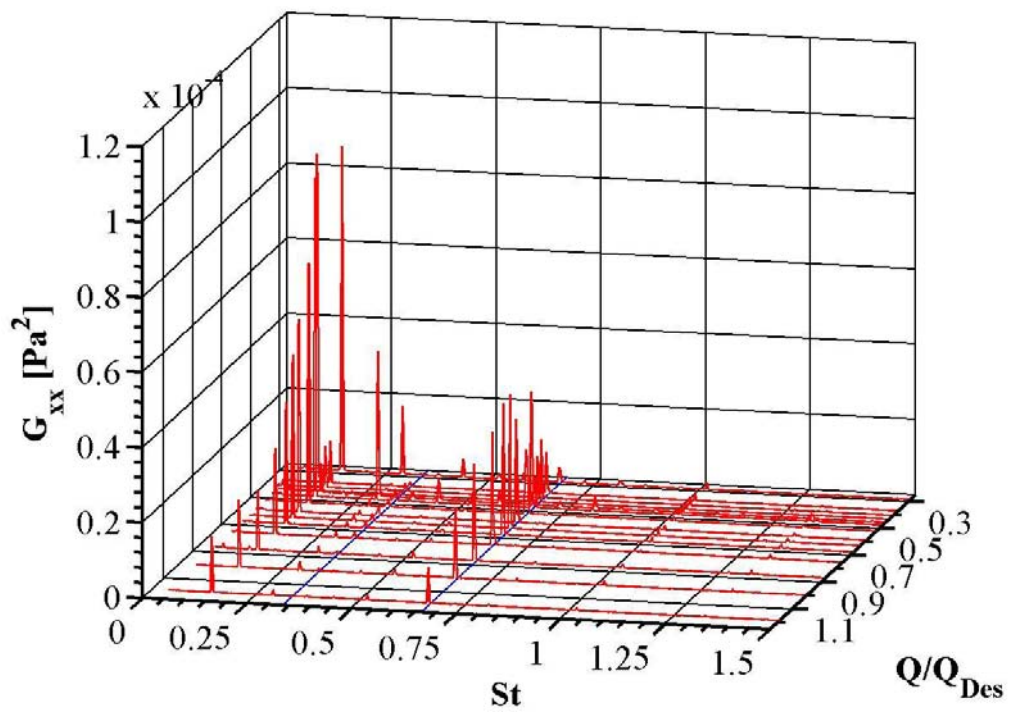
Le due linee blu, poste in corrispondenza di $St = 0.333$ e $St = 0.666$, servono per indicare i picchi interessati.

Come si può osservare i picchi che dominano il PSP sono situati in corrispondenza di:

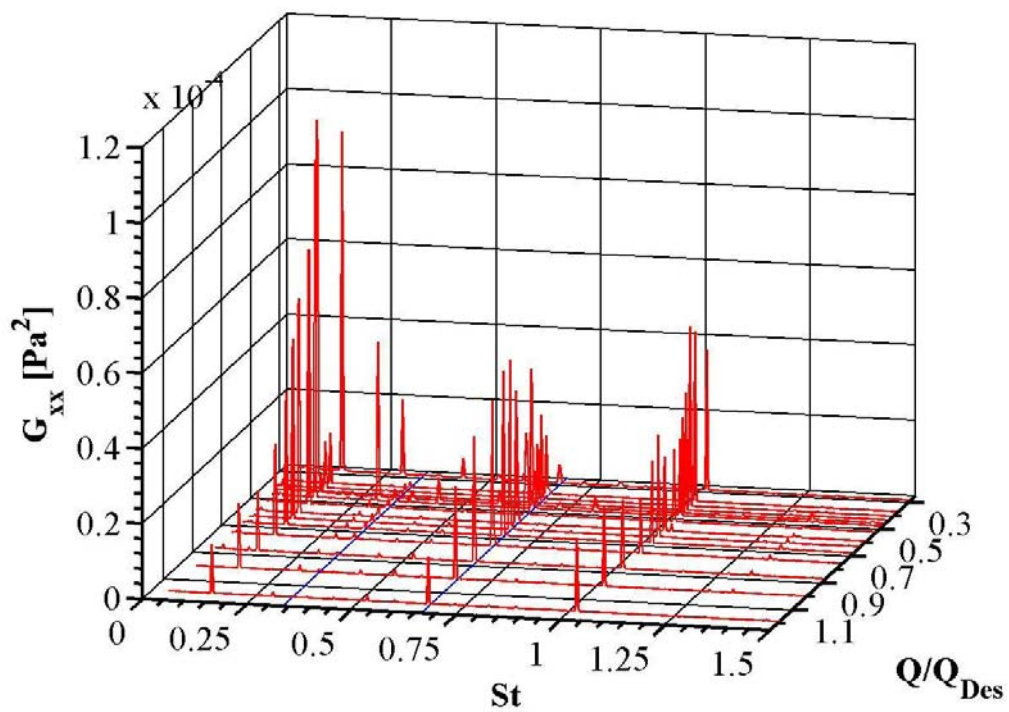
- $St = 1$ corrisponde alla BPF (frequenza di passaggio delle pale). Come si può osservare il picco è molto accentuato nel waterfall del sensore 6 mentre è pressoché inesistente in quello del sensore 5 e totalmente assente nel grafico del sensore 3. Questo è dovuto alla posizione relativa dei sensori rispetto alla girante (fig. 5.8): il sensore 6 è il sensore più vicino alla girante e dunque quello che risente di più dell'interazione statore-rotore già studiata da Pavesi [4]. Man mano che ci si allontana dalla girante, questa interazione diventa sempre meno importante: ecco perché nel sensore 5 i picchi sono pressoché inesistenti mentre nel sensore 3 sono totalmente assenti.
- $St = 0.142$ corrispondente ad un settimo della BPF, cioè la frequenza di passaggio della girante. In alcuni casi questa frequenza è accompagnata dalle sue armoniche che si presentano con picchi importanti in alcuni casi.
- $St = 0.666$ corrispondente ad una delle frequenze su cui si è focalizzata l'attenzione, perché frequenza dominante dell'instabilità in esame, ed evidenziata da una delle due linee blu. In questo caso questa frequenza si presenta con dei picchi molto pronunciati ma non è la norma. Anzi molto spesso questi picchi sono molto piccoli.



a) sensore 3



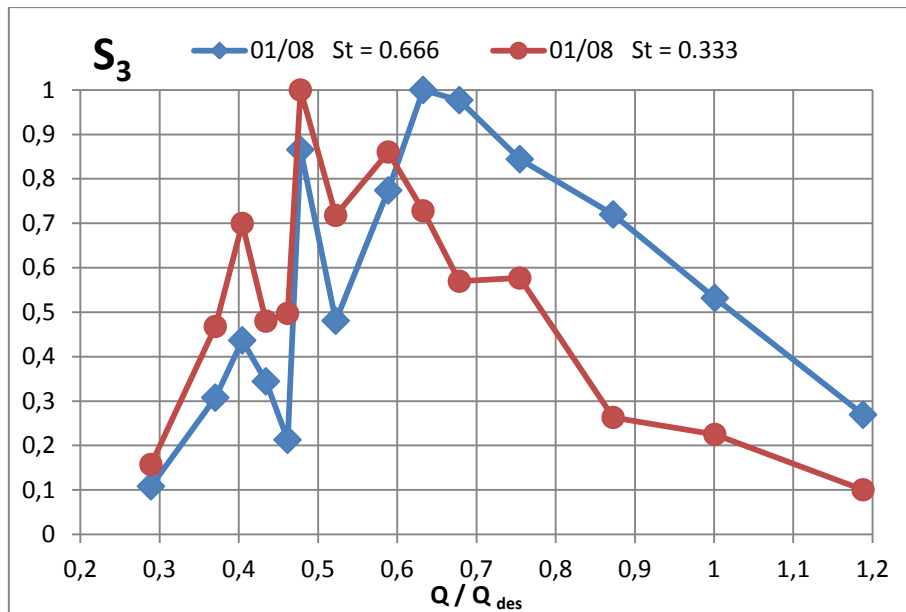
b) sensore 5



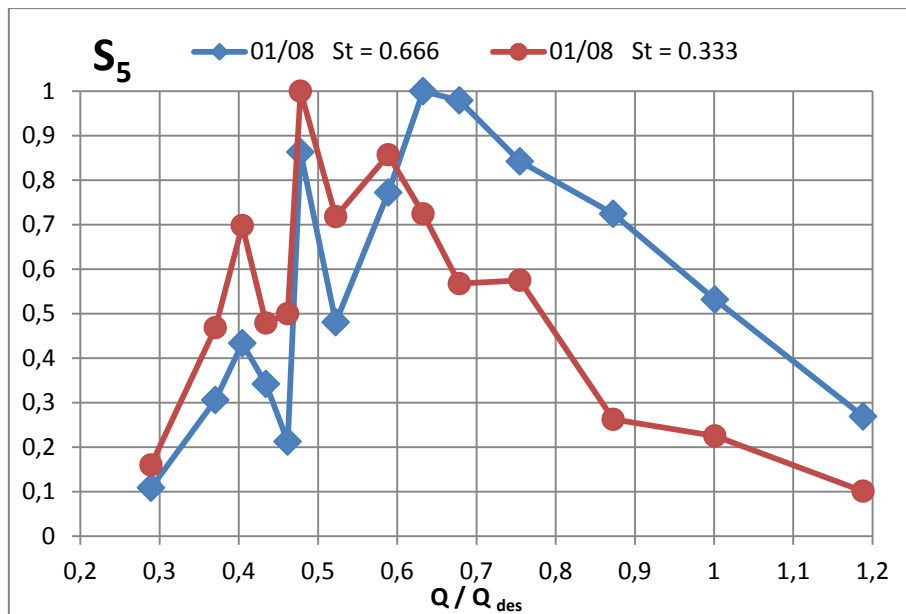
c) sensore 6

Fig. 6.2.1.1 – waterfall dei dati acquisiti in data 01/08

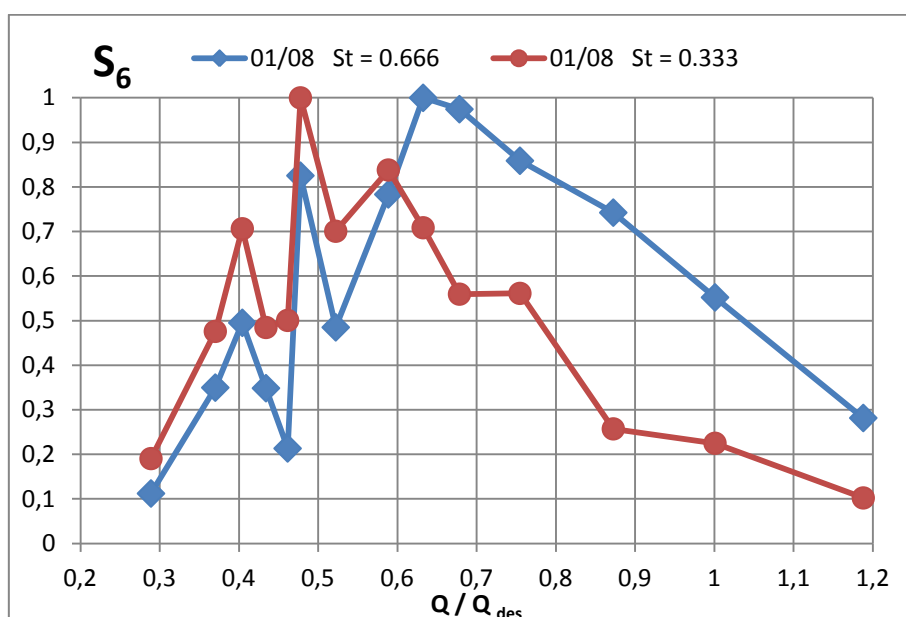
6.2.1.2. PSP St = 0.333 e St = 0.666



a) sensore 3



b) sensore 5



c) sensore 6

Fig. 6.2.1.2 – PSP relativi alle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$

Come si può osservare dall'asse dell'ordinate (i cui valori variano tra 0 e 1), si è scelto di rappresentare i grafici PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$ in modo normalizzato rispetto al picco massimo di ogni frequenza.

Si vede infatti come la curva $St = 0.333$ abbia il picco massimo a $Q_{rel} = 0.63$ (preso come valore per normalizzare tutta la curva $St = 0.333$) mentre per la curva $St = 0.666$ il picco massimo è situato a $Q_{rel} = 0.47$.

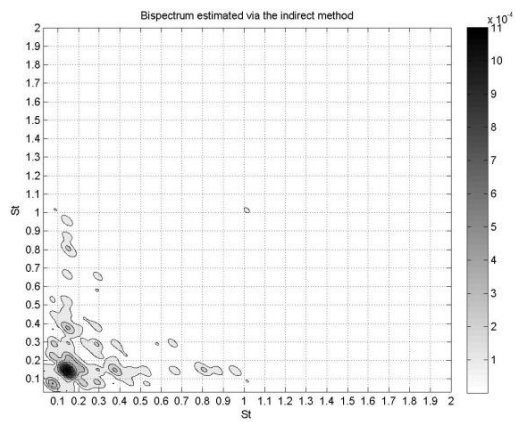
Questa normalizzazione è stata resa necessaria per confrontare l'andamento delle due curve nello stesso grafico: si può notare dai grafici waterfall come il picco a $St = 0.666$ sia molto più intenso del picco a $St = 0.333$ (dai dati usati per disegnare i grafici si può osservare che il rapporto tra i due segnali è appena inferiore a 40).

Un altro effetto della normalizzazione è stato rendere i grafici molto simili tra loro: questo effetto va ad avvalorare la tesi che i risultati, utilizzati in modo qualitativo e non quantitativo, descrivono in modo adeguato il fenomeno studiato.

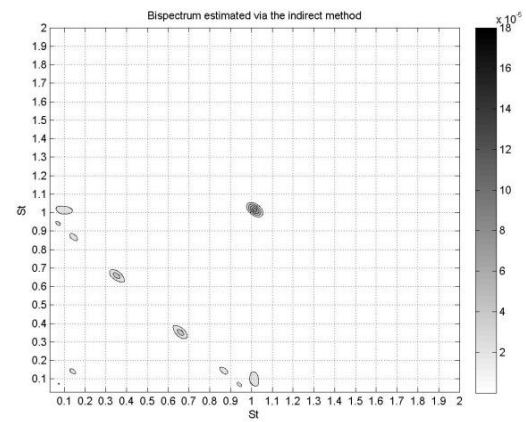
Un'altra considerazione che si può fare, confrontando questi grafici con i grafici waterfall, è che la posizione dei trasduttori di pressione non influenza allo stesso modo tutte le frequenze: se per $St = 1$ la posizione dei tre sensori variava in modo significativo la risposta, per $St = 0.666$ e $St = 0.333$ la posizione dei sensori non è così rilevante.

6.2.1.3. Bispectra

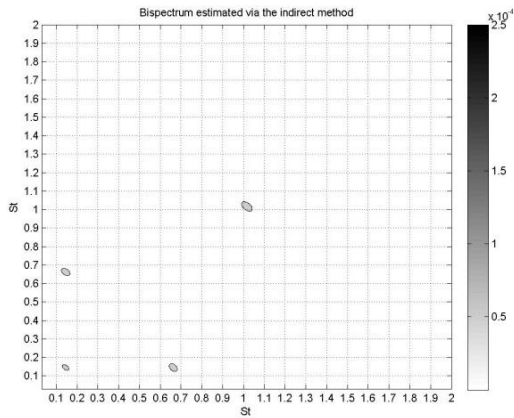
L'analisi Bispetra è un'analisi non lineare di ordine superiore al primo. L'utilità di questa analisi, eseguita con matlab, è di identificare quali sono le frequenze fondamentali e quali invece sono combinazioni lineari di frequenze fondamentali. Come si può facilmente osservare dai grafici proposti qui di seguito, entrambi gli assi dei grafici mostrano l'evolversi della variabile St. I picchi vengono segnalati nel grafico da cerchi, di colori diversi a seconda dell'intensità. Questi picchi sono fondamentali se sono posizionati sulla bisettrice del grafico: tutti gli altri picchi presenti sono combinazioni lineari dei picchi fondamentali. Di seguito verranno riportate le immagini relative al solo sensore 6.



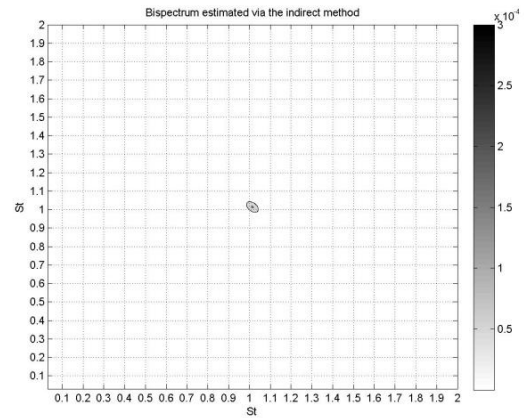
a) $Q = 22.6659$ [l/s]



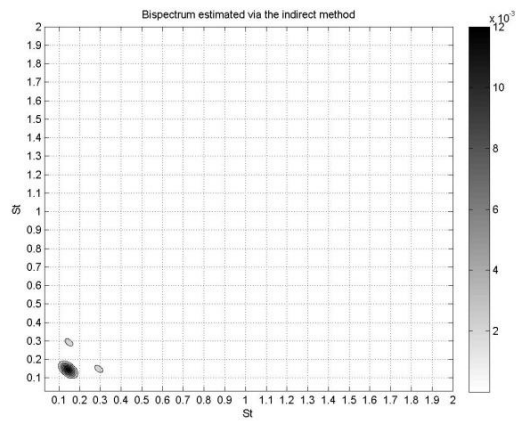
b) $Q = 29.0306$ [l/s]



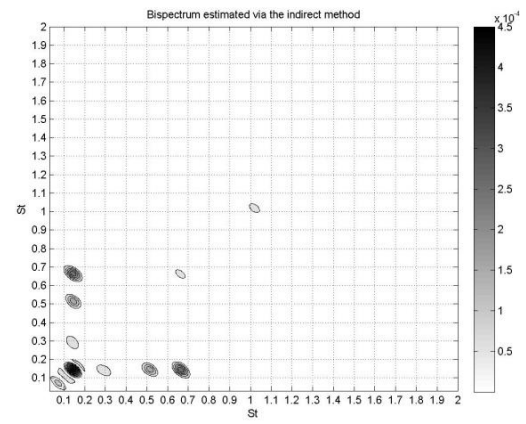
c) $Q = 31.7040$ [l/s]



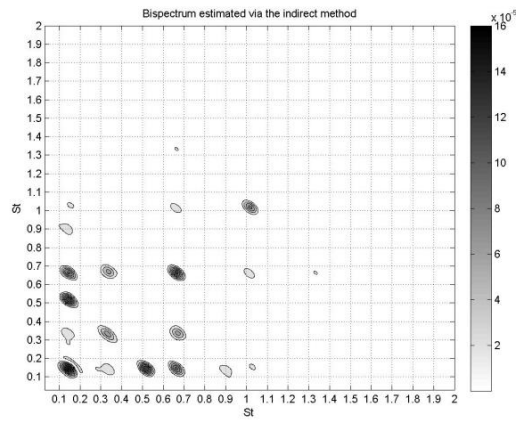
d) $Q = 34.0436$ [l/s]



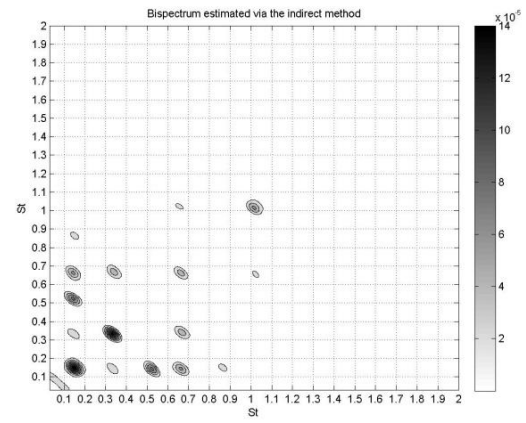
e) $Q = 36.1855$ [l/s]



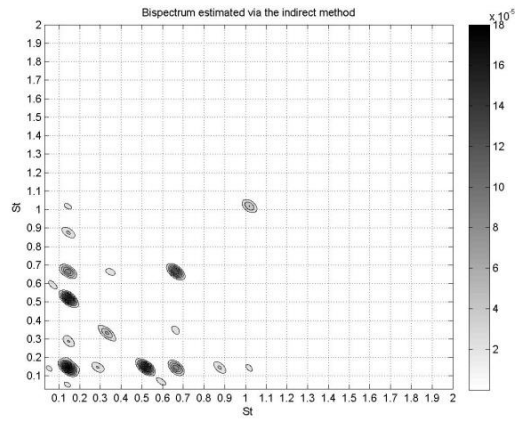
f) $Q = 37.4335$ [l/s]



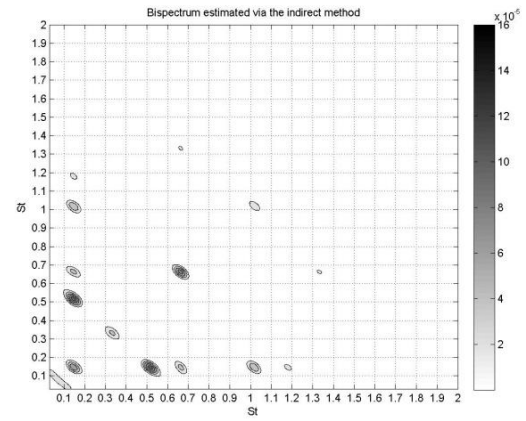
g) $Q = 40.9484$ [l/s]



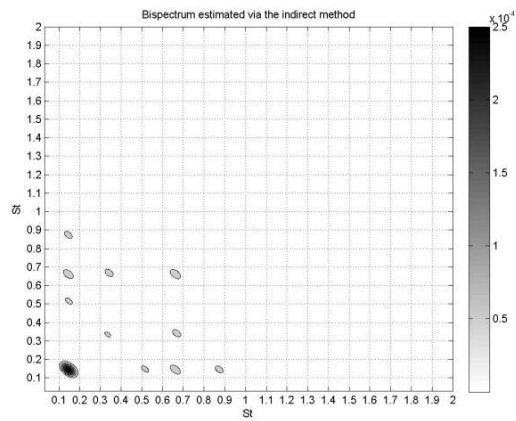
h) $Q = 46.1515$ [l/s]



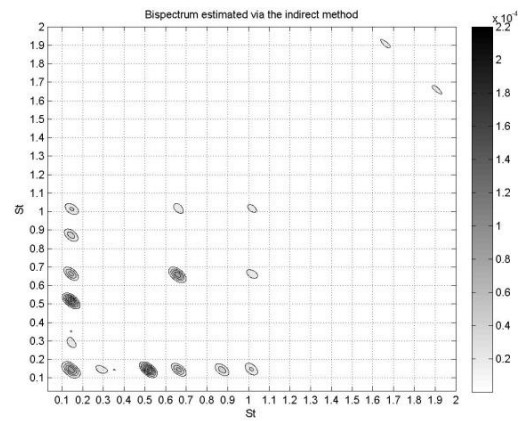
i) $Q = 49.5960$ [l/s]



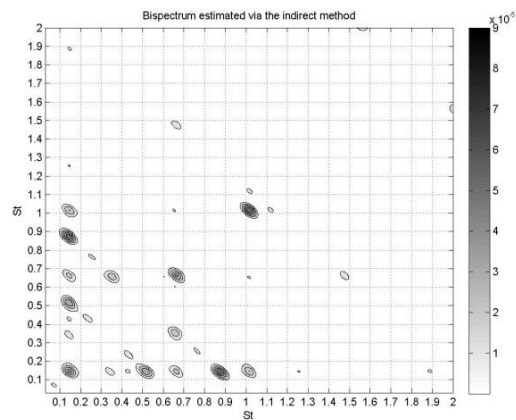
l) $Q = 53.1898$ [l/s]



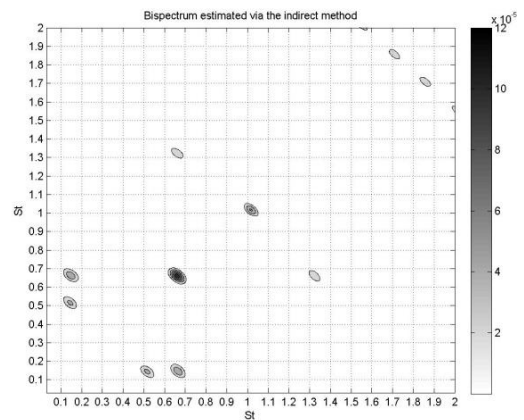
m) $Q = 59.1733$ [l/s]



n) $Q = 68.4122$ [l/s]



o) $Q = 78.4801$ [l/s]



p) $Q = 93.1494$ [l/s]

Fig. 6.2.1.3 – grafici relativi all'analisi bispetra del sensore 6.

I dati raccolti dall'analisi Bispectra sono stati riportati in tabella potendo così raggruppare le informazioni relative agli altri sensori. Come si può osservare dalla tabella, le differenze tra i vari sensori sono minime.

Q	Qrel		St = 0,33			St = 0,66	
[l/s]	[-]	S3	S5	S6	S3	S5	S6
22,6659	0,29	-	-	-	-	-	-
29,0306	0,37	-	-	-	-	-	-
31,704	0,40	-	-	-	x	x	-
34,0436	0,43	-	-	-	-	-	-
36,1855	0,46	-	-	-	-	-	-
37,4335	0,48	-	-	-	x	x	x
40,9484	0,52	x	x	x	x	x	x
46,1515	0,59	x	x	x	x	x	x
49,596	0,63	x	x	x	x	x	x
53,1898	0,68	x	x	x	x	x	x
59,1733	0,75	-	-	-	x	x	x
68,4122	0,87	-	-	-	x	x	x
78,4801	1,00	-	-	-	x	x	x
93,1494	1,19	-	-	-	x	x	x

Tabella 6.1 – risultati analisi bispectra

6.2.1.4. PSP St = 0.333 e St = 0.666 filtrato

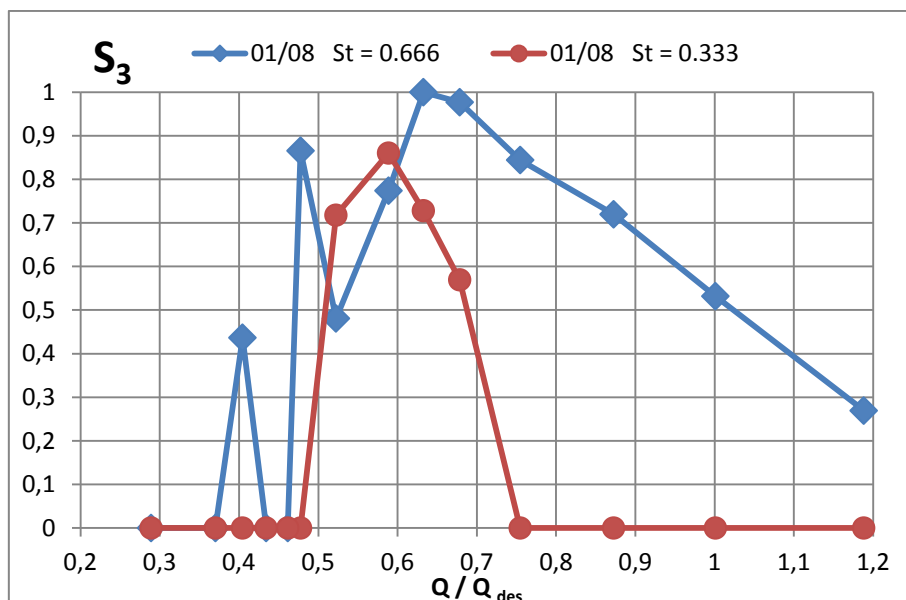
Con le informazioni raccolte in questa tabella si può procedere all'analisi dei PSP delle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ delle sole portate nelle quali queste frequenze sono fondamentali.

Per ottenere questo grafico si è partiti dal grafico PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$ (tutte le considerazioni fatte per quanto riguarda la normalizzazione sono valide anche per questa serie di grafici dato che i dati di partenza sono gli stessi) e si sono disegnati solo i punti in cui l'analisi Bispectra ha rilevato i picchi come picchi fondamentali.

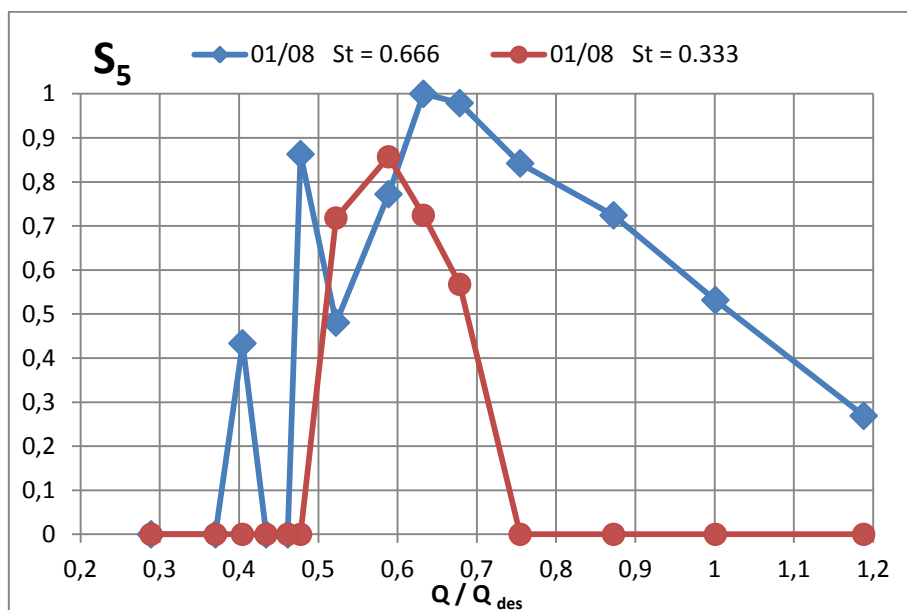
Come si può osservare da una prima analisi qualitativa, la zona dove si concentrano i picchi indipendenti di entrambe le frequenze è situata tra $0.4 \div 0.7 Q_{des}$ (lo stesso range di portate preso in esame per mostrare più in dettaglio la zona di instabilità nella curva caratteristica nelle figure fig. 6.1.4 e fig. 6.1.5). Proprio per questa ragione l'analisi wavelet (che verrà proposta di seguito) sarà effettuata solo per alcune portate comprese in questo range.

È doveroso fare una precisazione: il fatto che il Bispectra non abbia messo in evidenza un picco fondamentale non esclude l'esistenza di un picco, combinazione non lineare di altre frequenze fondamentali. Infatti, come si osserva dal PSP non filtrato, ad ogni portata sono presenti dei picchi in corrispondenza delle due frequenze in analisi ($St = 0.333$ e $St = 0.666$). Il fatto che un picco sia combinazione non lineare di altre frequenze fondamentali non dà nessuna informazione sull'ampiezza del picco stesso: come si può osservare dal PSP filtrato del sensore 3, il picco massimo, posizionato a $Q_{rel} = 0.48$, è la combinazione non lineare di altre frequenze fondamentali (e per questo posto uguale a zero).

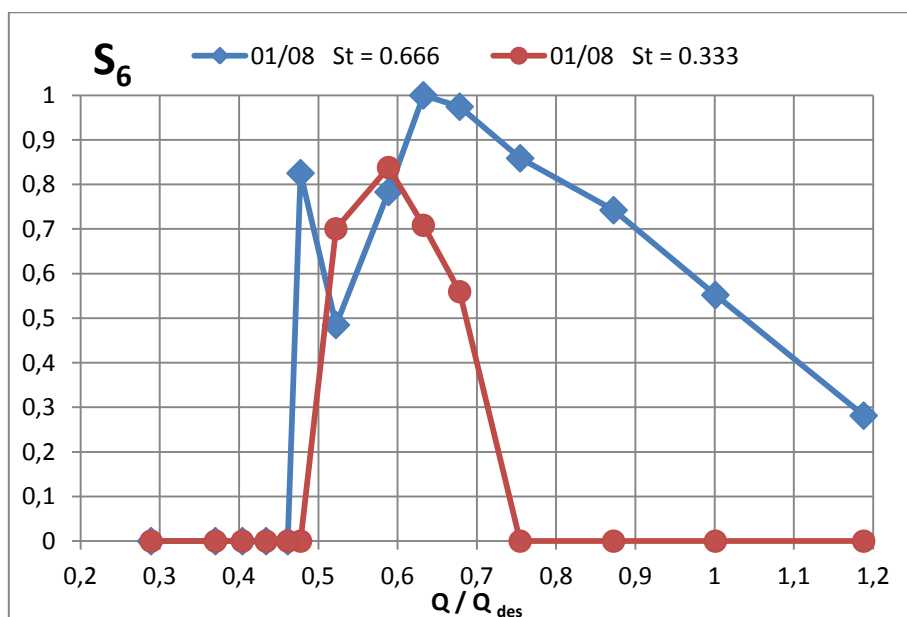
Questa serie di dati ha un elevato range di portate (da $Q_{rel} = 0.3$ a $Q_{rel} = 1.2$) e questo ci permette di analizzare l'andamento globale. Per contro però, lo step delle portate è molto elevato e nella zona di instabilità sono presenti solo 4 portate: sicuramente un numero troppo piccolo per descrivere in modo adeguato l'andamento di quella zona.



a) sensore 3



b) sensore 5

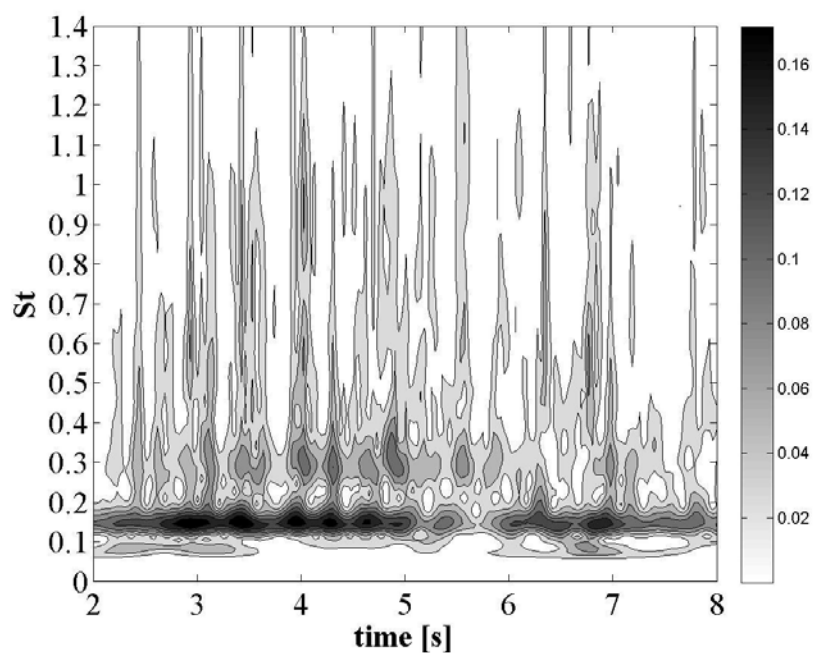


c) sensore 6

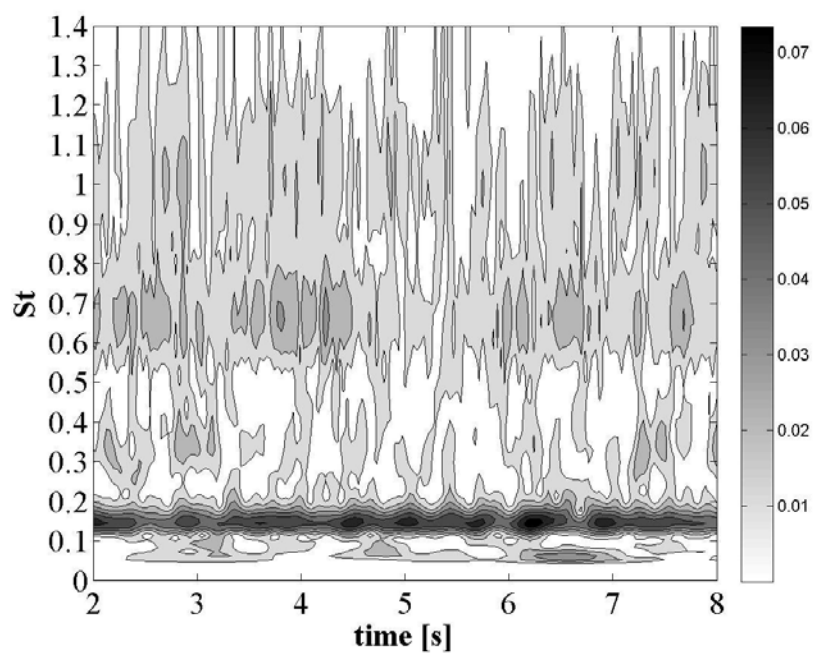
Fig. 6.2.1.4 – PSP relativi alle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrati con i dati ricavati dall'analisi bispettra

6.2.1.5. Wavelet:

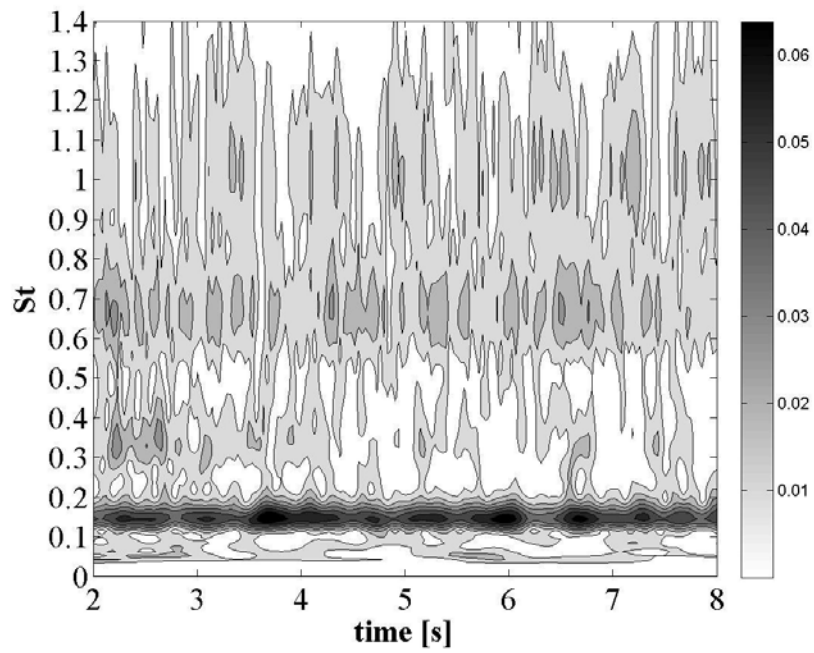
L'analisi wavelet, rispetto all'analisi in frequenza proposta precedentemente, aggiunge in più l'informazione temporale: quindi non solo l'informazione sull'intensità del picco e la sua frequenza ma anche l'informazione temporale di quando avviene il picco all'interno del segmento temporale. Di seguito verranno proposti solo i grafici wavelet del sensore 6.



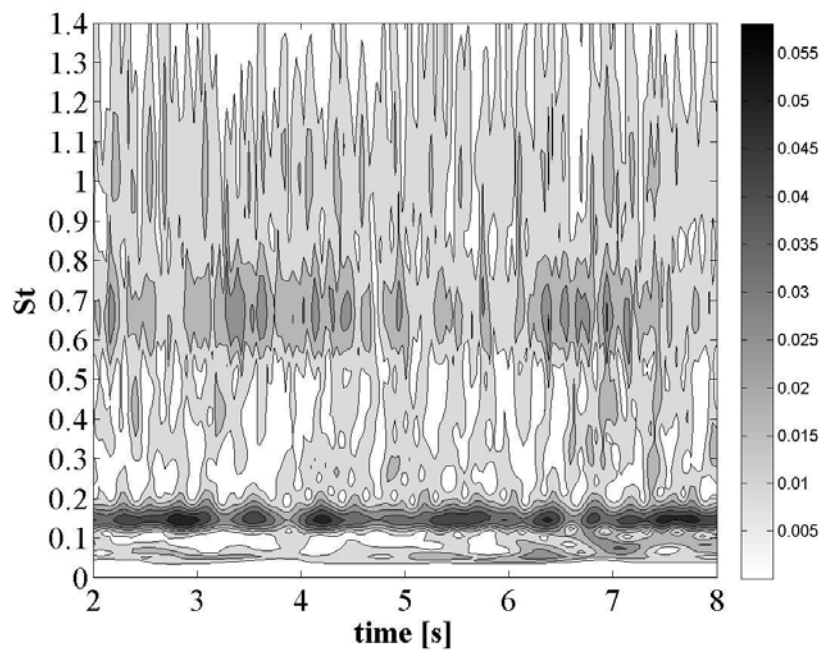
a) $Q_{rel} = 0.46$ $Q = 36.1855$ [l/s]



b) $Q_{rel} = 0.52$ $Q = 40.9484$ [l/s]



c) $Q_{rel} = 0.59$ $Q = 46.1515$ [l/s]



d) $Q_{rel} = 0.63$ $Q = 49.5960$ [l/s]

Fig. 6.2.1.5 – grafici trasformata wavelet relativi al sensore 6

Dall'analisi di questi grafici si può osservare come le frequenze $St = 0.142$ e $St = 1$ siano presenti in tutti i grafici per l'intero intervallo di tempo (informazione che già avevamo ottenuto osservando il waterfall).

Più interessanti sono le frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ dove si vede come, soprattutto per quanto riguarda $St = 0.333$, la loro presenza nell'intervallo di tempo non sia costante.

Nel grafico $Q_{rel} = 0.46$ abbiamo la totale assenza della frequenza $St = 0.666$, come del resto avevamo osservato dalla tabella dei Bispectra. Per quanto riguarda la frequenza $St = 0.333$, bisogna porre molta attenzione a non confondere $St = 0.333$ frequenza dell'instabilità da $St = 0.284$ armonica n°2 della frequenza della girante ($St = 0.142$). Se si osserva con attenzione in questo caso il centro dei picchi è situato ad un valore inferiore ad $St = 0.3$ quindi si può affermare che non si tratta della frequenza dell'instabilità (in accordo con i dati raccolti con l'analisi Bispectra).

6.2.1.6. CrossWavelet

I grafici crosswavelet proposti di seguito sono relativi alle stesse portate analizzate con l'analisi wavelet. I sensori utilizzati per l'analisi sono il sensore 3, 5 e 6. Il grafico è composto da due parti: fase ed intensità rappresentate rispettivamente da frecce e colore.

Entrando più in dettaglio, si può osservare come tutte le portate sia dominate dalla frequenza $St = 0.142$ (risultato che ottenuto anche dall'analisi wavelet). L'informazione interessante di questa frequenza deriva dall'analisi dell'orientamento delle frecce: infatti in tutte le portate, le frecce in corrispondenza di questa frequenza puntano tutte verso destra. Questo indica che il segnale analizzato è coerente e non random.

Le stesse considerazioni si possono estendere alle frequenze di interesse per questa trattazione, $St = 0.333$ e $St = 0.666$. La frequenza $St = 0.666$ è presente in modo marcato nelle quasi totalità delle portate esaminate (come del resto mostrava anche il Bispectra). Mentre per quanto riguarda la frequenza $St = 0.333$ è possibile osservare l'evoluzione nel tempo e nelle portate ponendo l'attenzione sul fatto che il fenomeno non è costante nel tempo.

In corrispondenza di $Q = 36.1855$ [l/s] possiamo osservare come:

- $St = 0.142$ sia molto marcato e sia una componente coerente del segnale visto che tutte le frecce puntano verso destra.
- $St = 0.333$ sia marcato in un tempo compreso tra 3 e 6 secondi. All'esterno di questo intervallo, il segnale è comunque presente in maniera meno importante. Anche questo sta ad indicare il carattere pulsante di questo fenomeno instabile. A differenza dell'intensità, la fase è costante per tutto il periodo temporale analizzato (cioè le frecce puntano tutte verso destra).
- $St = 0.666$ in questa portata è praticamente non presente.

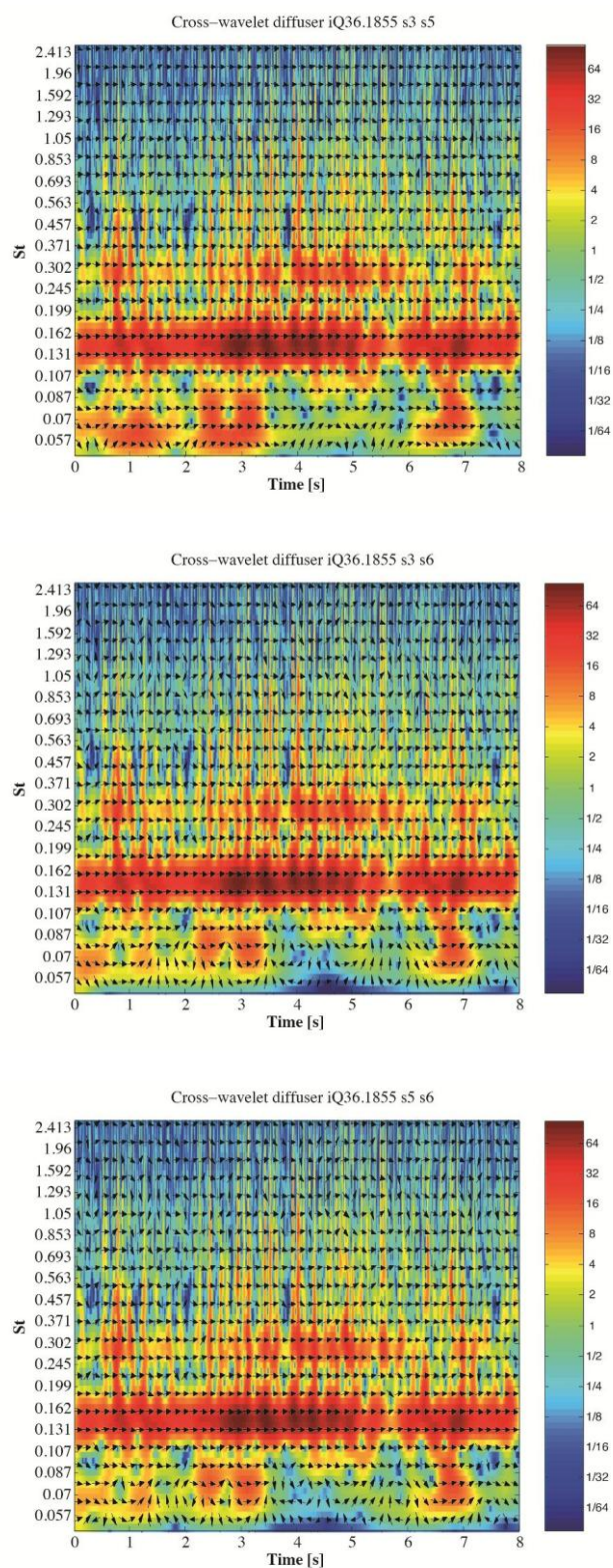


Fig. 6.2.1.6.1 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 36.1855 \text{ [l/s]}$

È possibile fare considerazioni analoghe sui grafici crosswavelet presentati di seguito relativi ad altre portate.

Si può subito notare come, a differenza della prima portata analizzata, $St = 0.666$ sia sempre presente nei grafici che seguono. Per quanto riguarda $St = 0.333$ viene confermata la condotta pulsante del fenomeno che si ripete in tutti i casi analizzati.

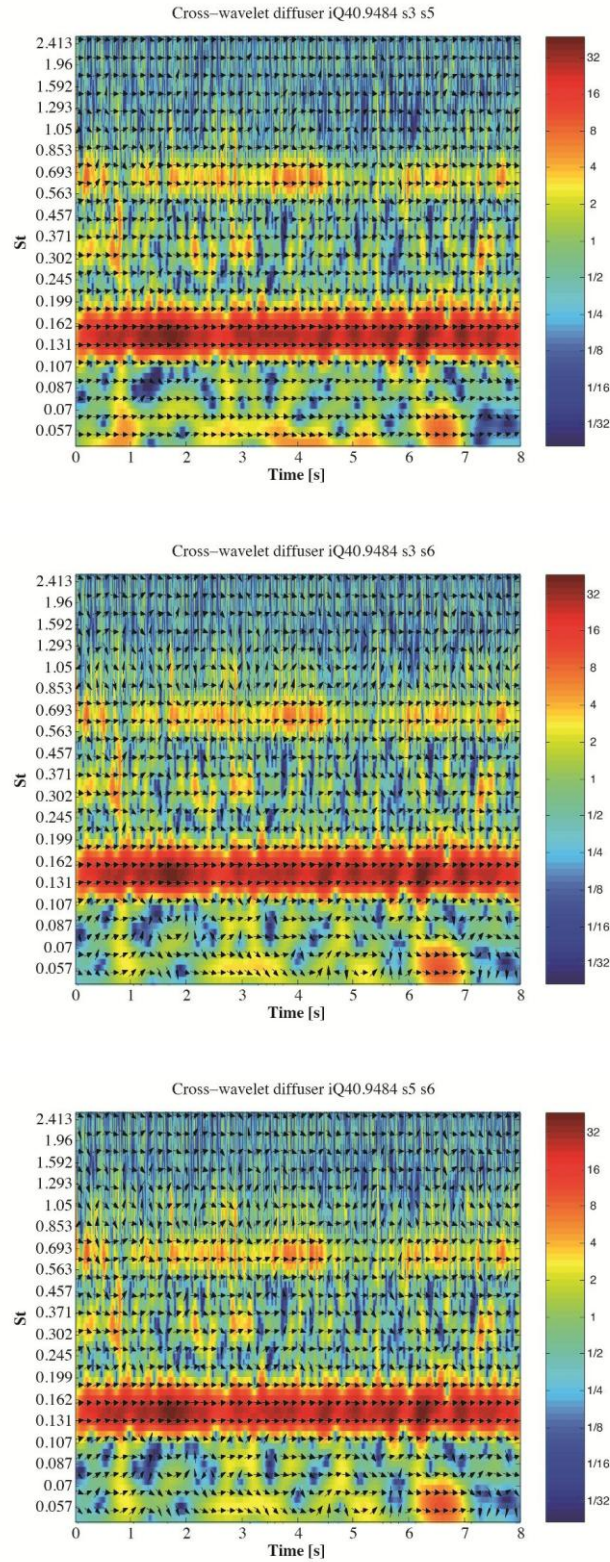


Fig. 6.2.1.6.2 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 40.9484$ [l/s]

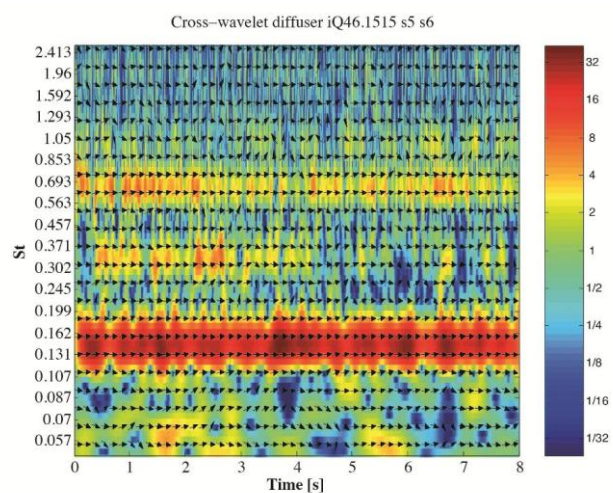
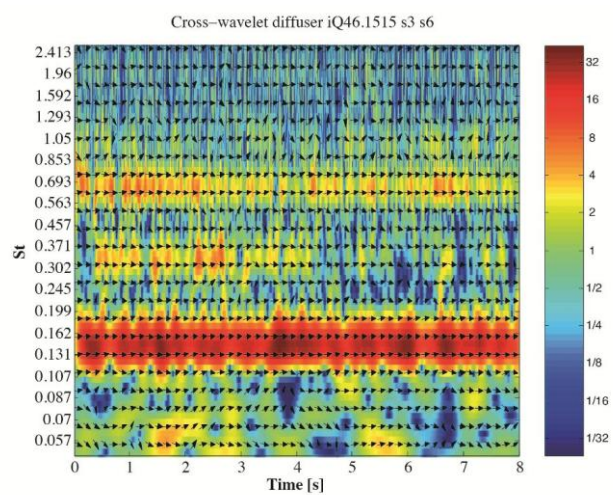
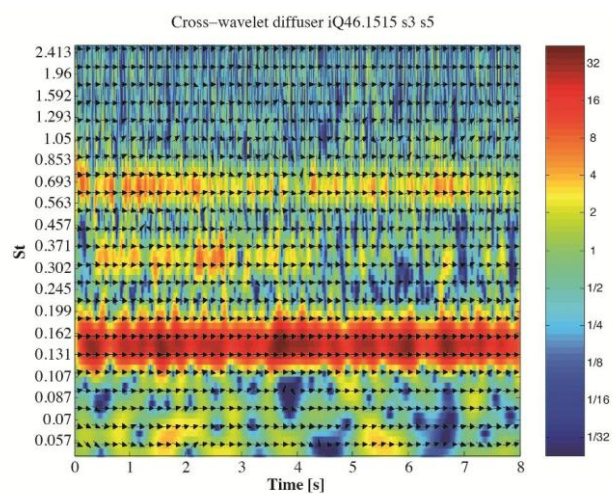


Fig. 6.2.1.6.3 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 46.1515$ [l/s]

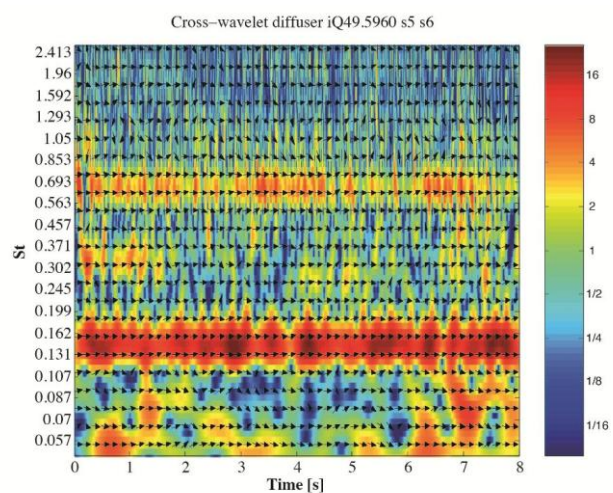
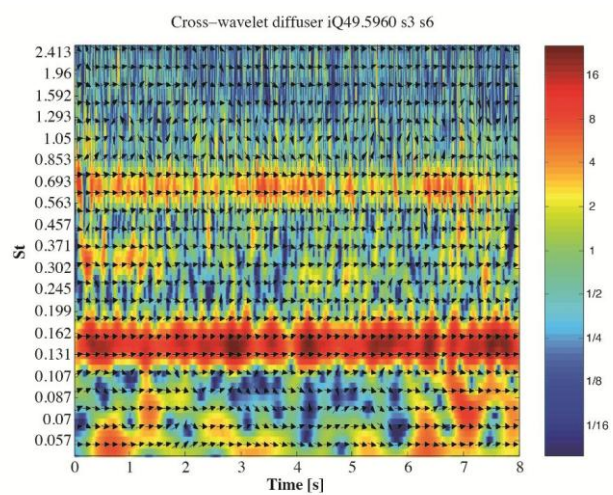
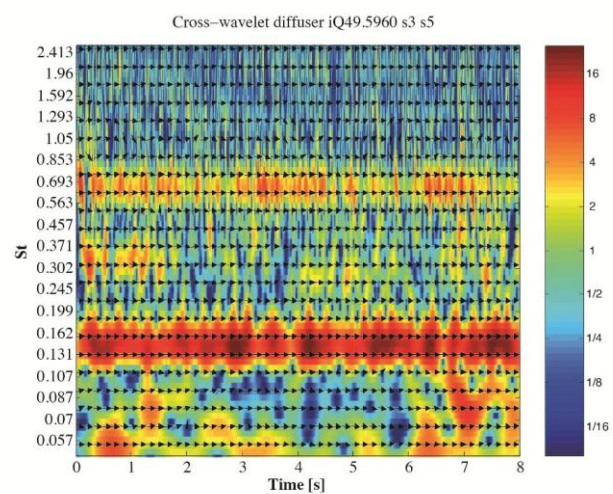
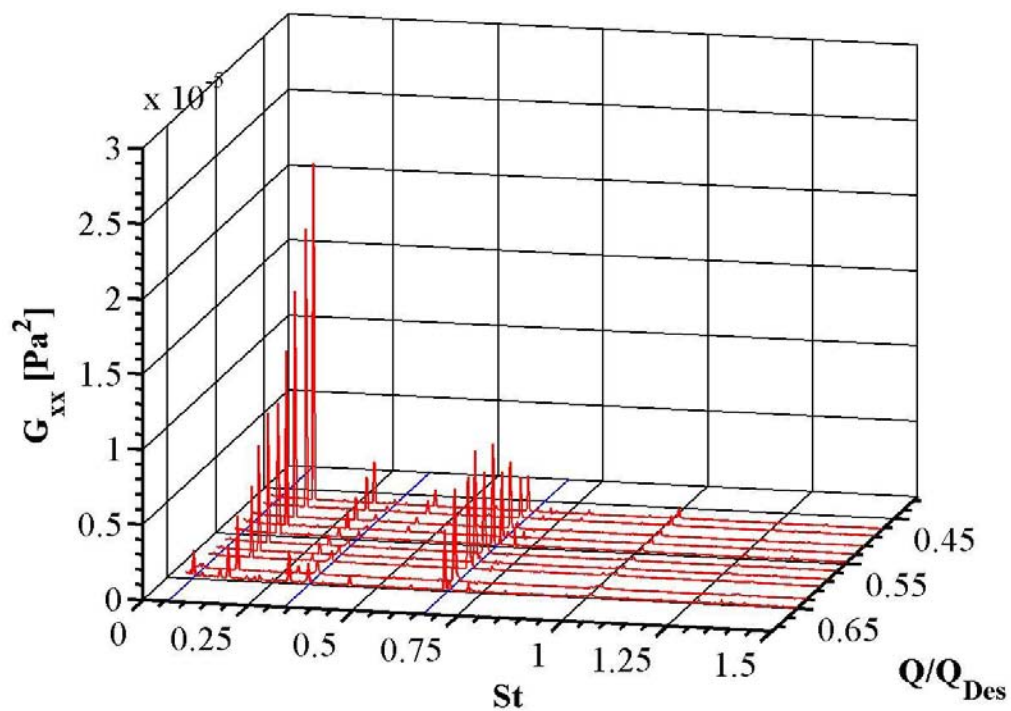


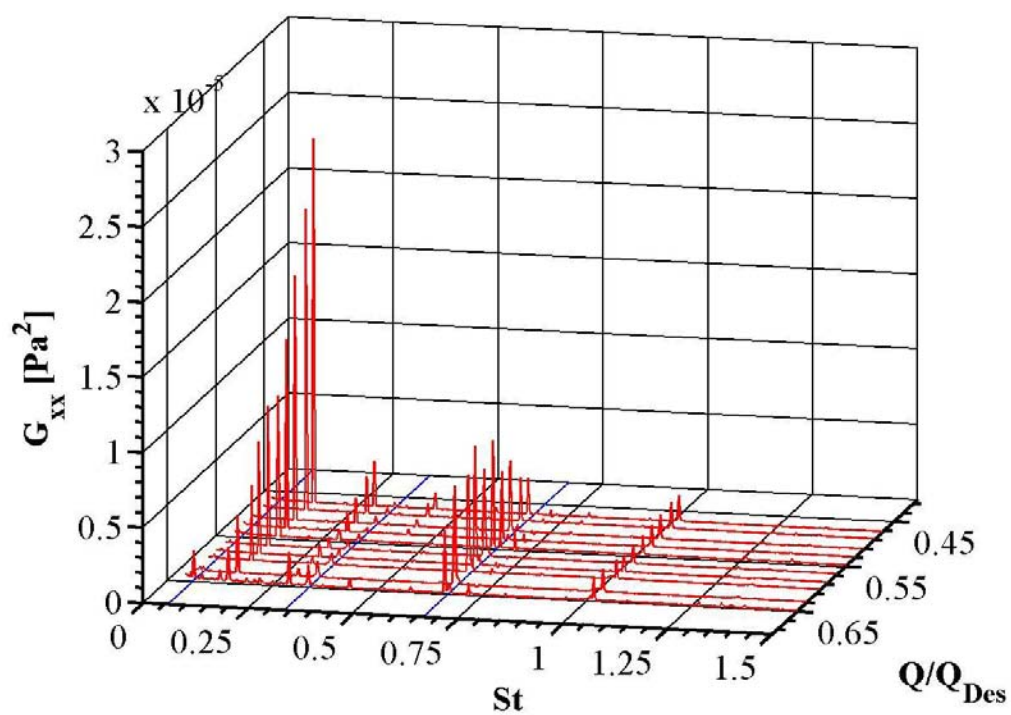
Fig. 6.2.1.6.4 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 49.5960$ [l/s]

6.2.2. Dati 09/09/13

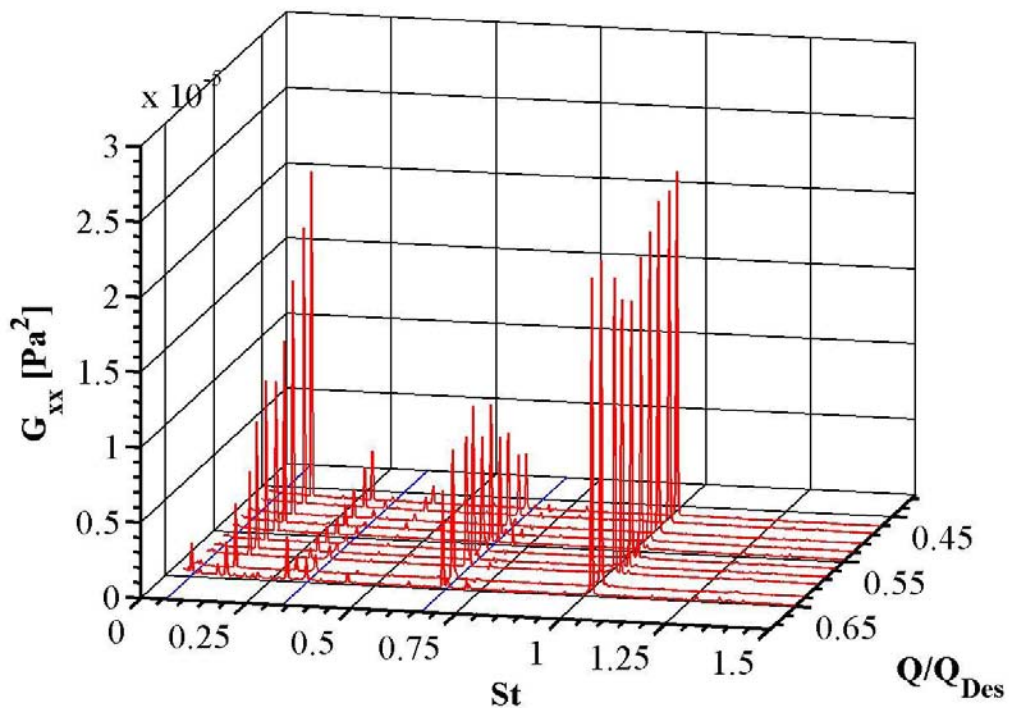
6.2.2.1. Waterfall:



a) sensore 3



b) sensore 5



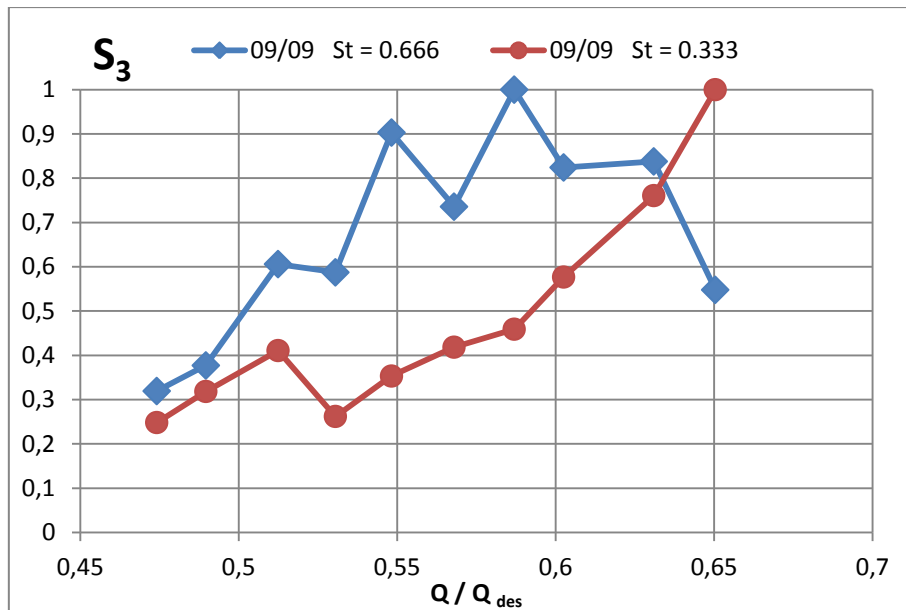
c) sensore 6

Fig. 6.2.2.1 – waterfall dei dati acquisiti in data 09/09

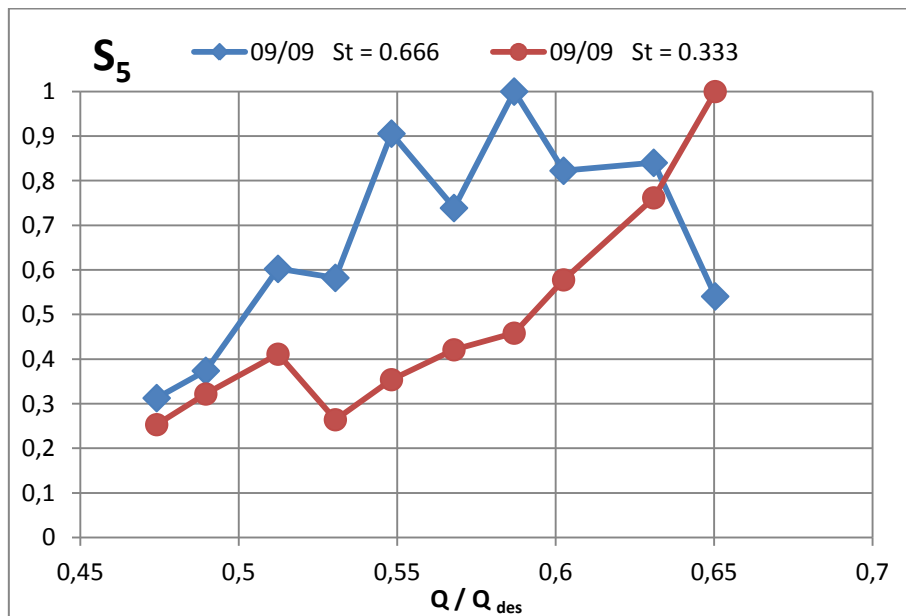
Dall'analisi di questi waterfall possiamo osservare in dettaglio la differenza tra $St = 0.333$ e $St = 0.284$ (armonica n°2 della frequenza della girante). Come si può osservare i picchi sono molto vicini e facilmente confondibili, visto che $St = 0.284$ ha un'ampiezza maggiore.

Un'altra informazione ricavabile da questi waterfall è il range di portate in cui è stata eseguita la prova: essendo queste le portate in cui si concentra la zona instabile è stato necessario eseguire una prova con uno step molto ridotto per analizzare l'andamento in modo più accurato.

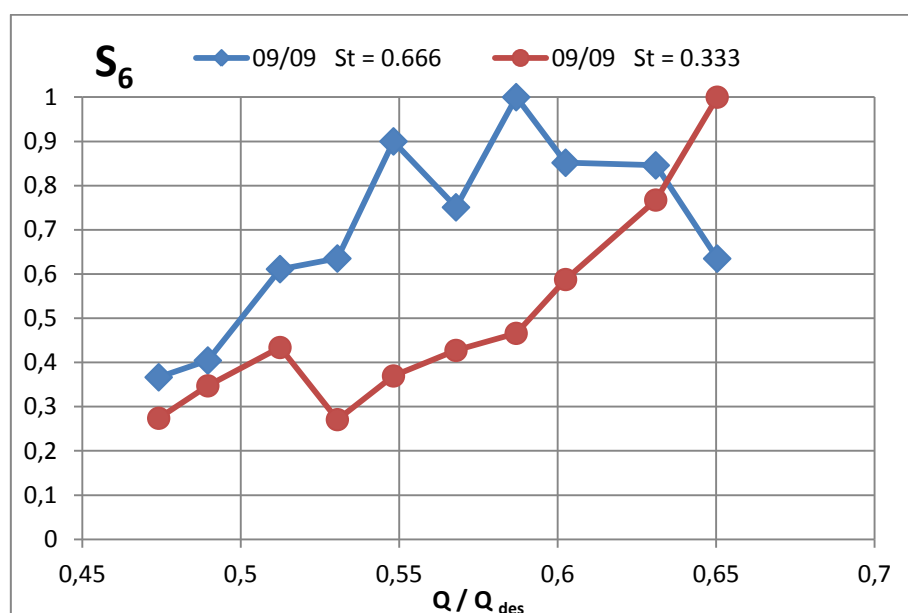
6.2.2.2. PSP St = 0.333 e St = 0.666



a) sensore 3



b) sensore 5



c) sensore 6

Fig. 6.2.2.2 – PSP relativi alle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$

6.2.2.3. Bispectra

Q	Qrel		St = 0,33			St = 0,66	
[l/s]	[-]	S3	S5	S6	S3	S5	S6
37,1684	0,47	-	-	-	x	-	x
38,3840	0,49	-	-	-	-	-	-
40,1696	0,51	-	-	-	-	-	-
41,5883	0,53	-	-	-	-	-	x
42,9767	0,55	-	-	x	-	-	-
44,5230	0,57	-	-	-	-	-	-
46,0120	0,59	-	-	-	-	-	-
47,2345	0,60	x	x	x	-	-	x
49,4649	0,63	-	-	-	x	x	x
50,9851	0,65	x	x	-	x	x	x

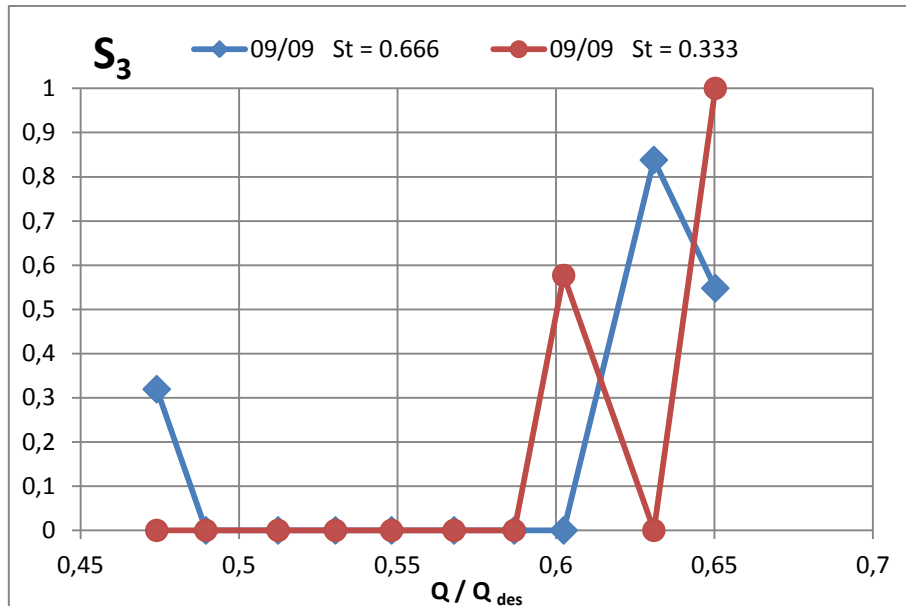
Tabella 6.1 – risultati analisi bispectra

Confrontando i valori ottenuti dall'analisi Bispectra riportati in tabella si può osservare come, in questa serie di dati, le differenze tra sensori sono apprezzabili.

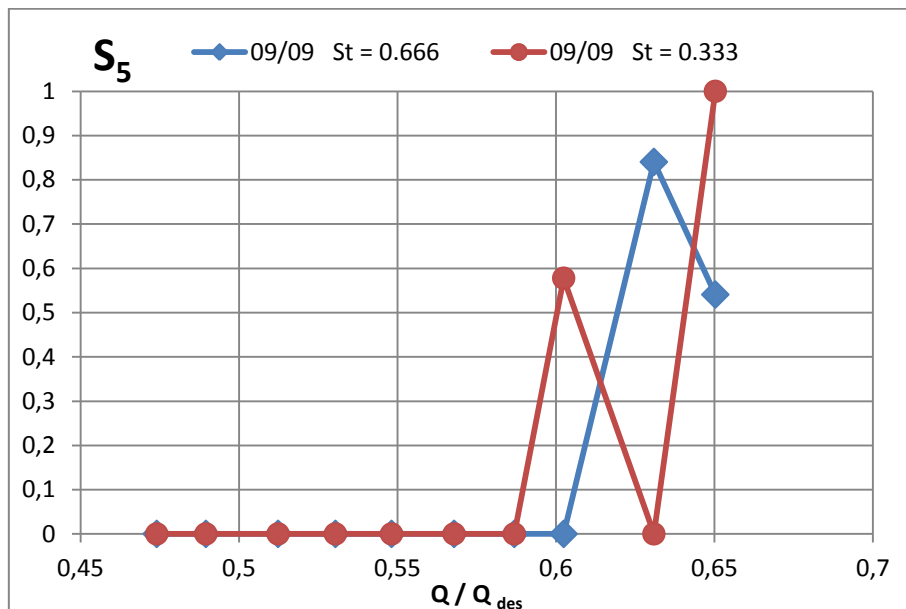
Queste differenze andranno ad incidere in modo rilevante nei grafici PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrati.

6.2.2.4. PSP St = 0.333 e St = 0.666 filtrato

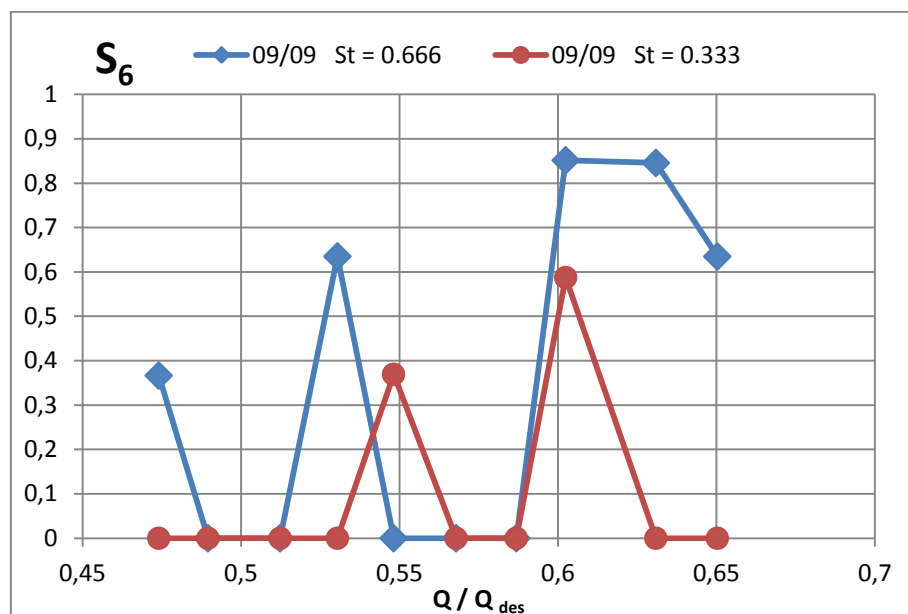
Come sottolineato nei commenti dell'analisi bispettra, le differenze tra i sensori sono rilevanti. Sicuramente il sensore 6 è quello più interessante, per quanto riguarda i risultati ottenuti.



a) sensore 3



b) sensore 5

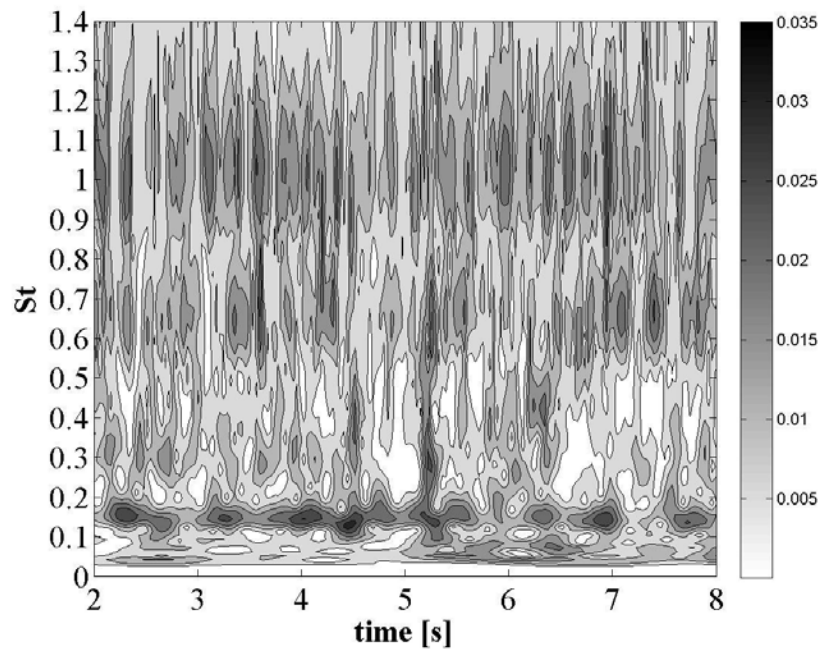


c) sensore 6

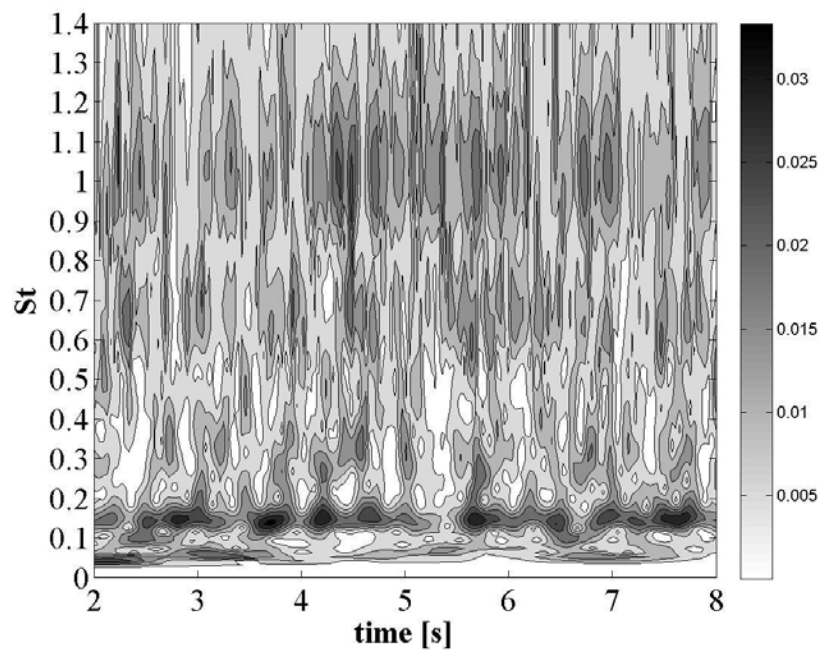
Fig. 6.2.2.4 – PSP relativi alle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrati con i dati ricavati dall'analisi bispettra

6.2.2.5. Wavelet:

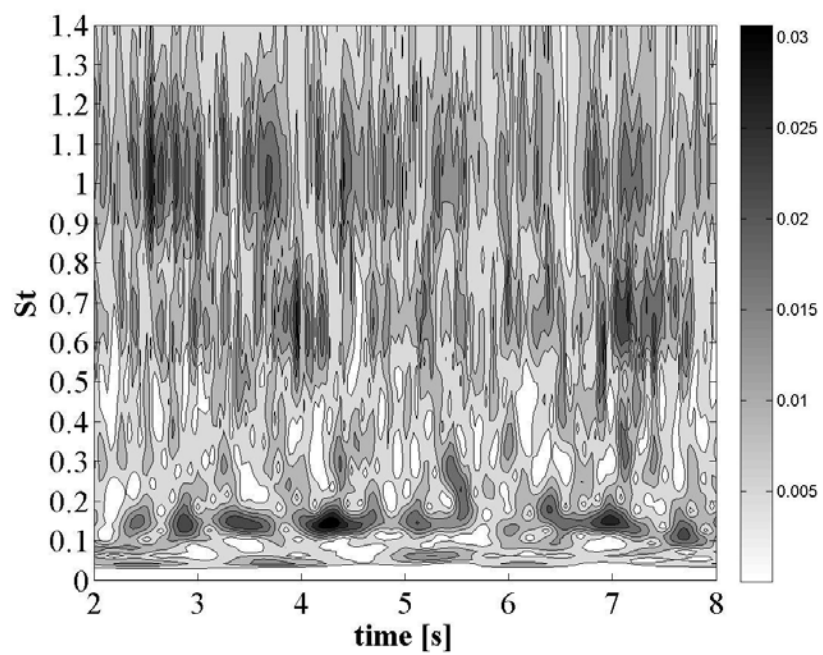
Anche per questa serie di dati, verranno proposti solo i grafici wavelet del sensore 6.



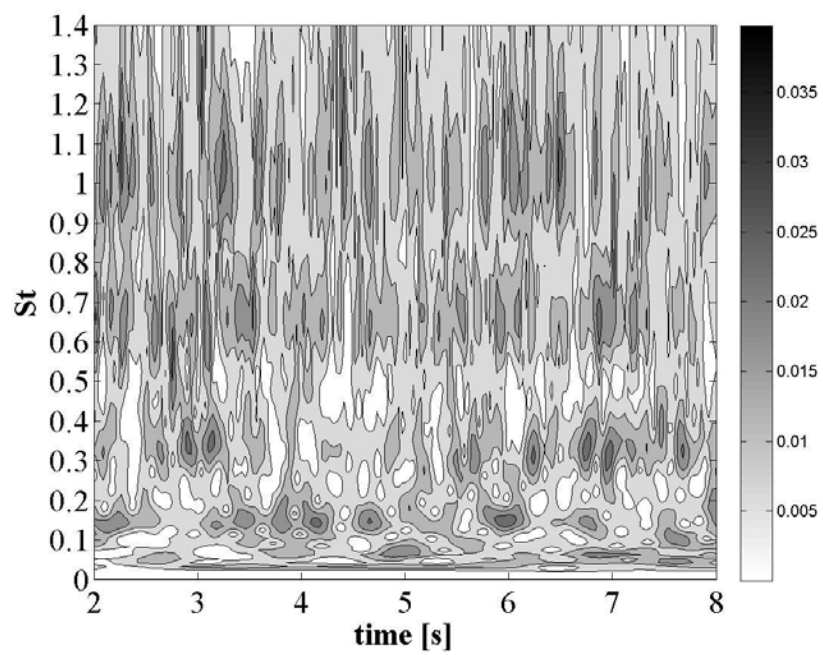
a) $Q_{rel} = 0.49$ $Q = 38.3840$ [l/s]



b) $Q_{rel} = 0.55$ $Q = 42.9767$ [l/s]



c) $Q_{rel} = 0.59$ $Q = 46.0120$ [l/s]



d) $Q_{rel} = 0.60$ $Q = 47.2345$ [l/s]

Fig. 6.2.2.5 – grafici trasformata wavelet relativi al sensore 6

6.2.2.6. CrossWavelet

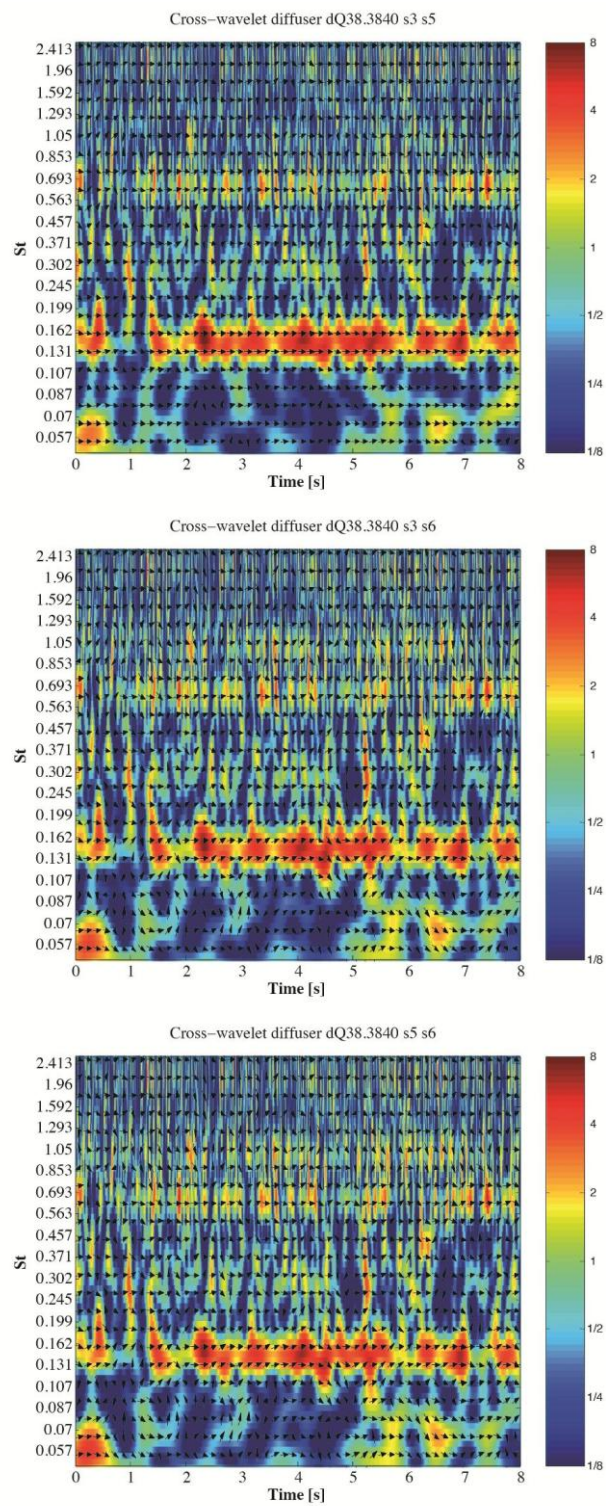


Fig. 6.2.2.6.1 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 38.3840$ [l/s]

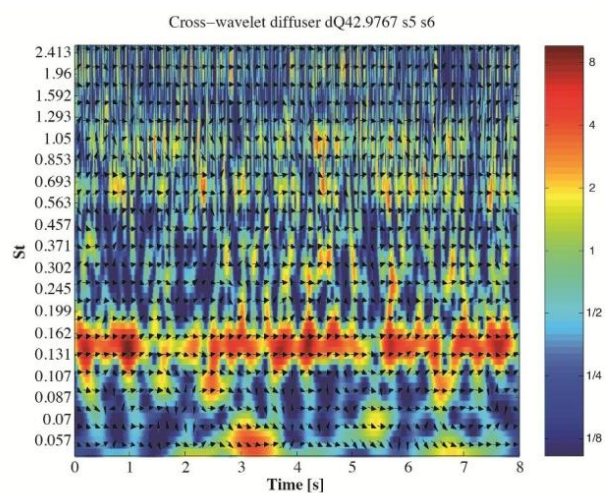
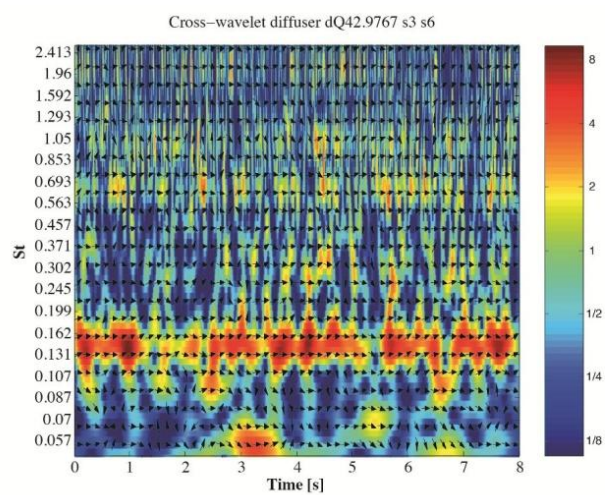
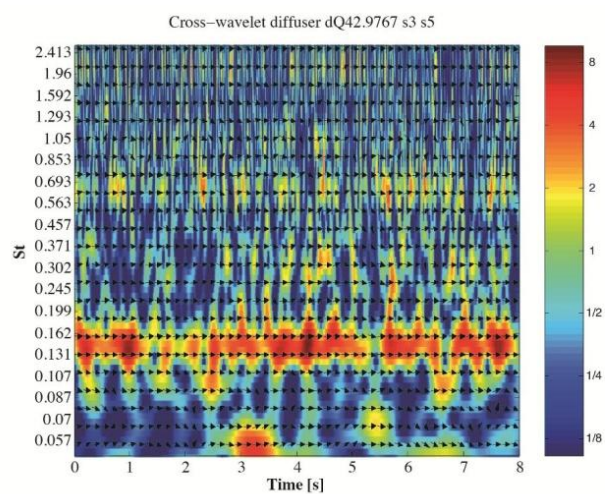


Fig. 6.2.2.6.2 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 42.9767$ [l/s]

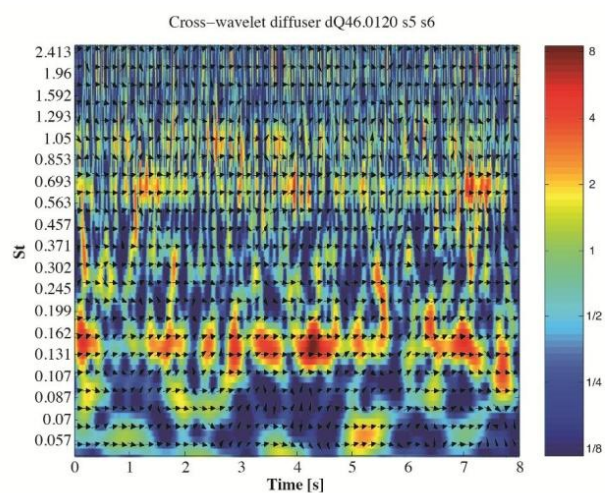
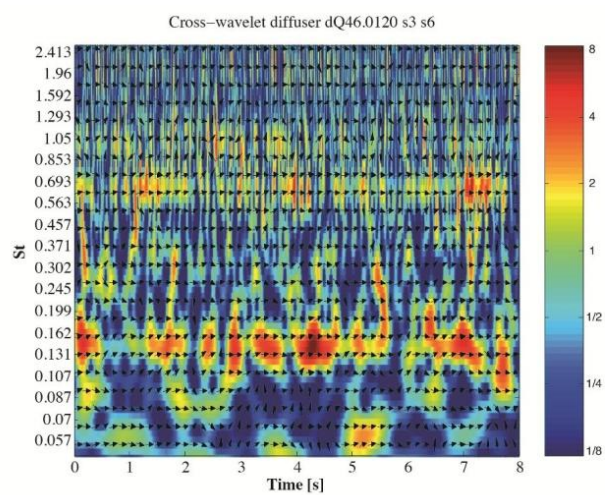
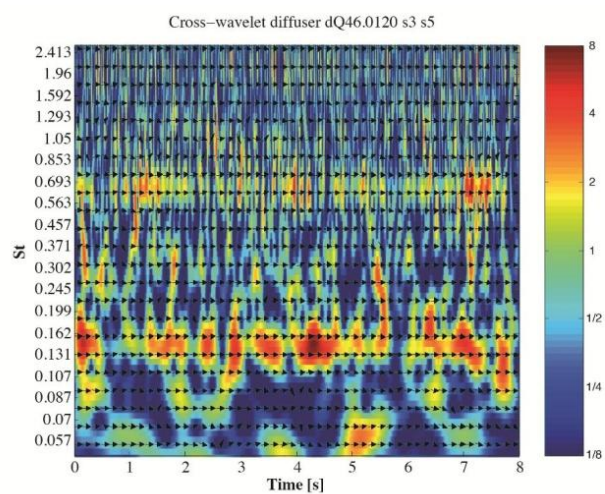


Fig. 6.2.2.6.3 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 46.0120$ [l/s]

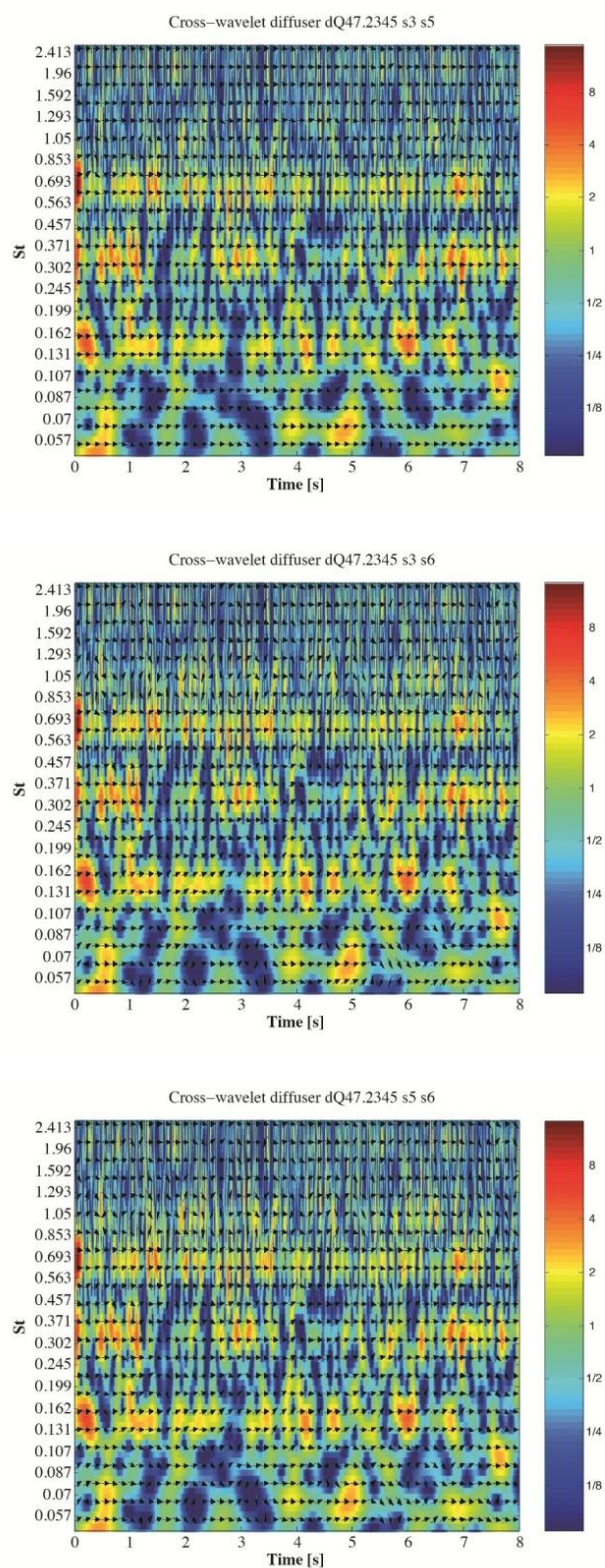
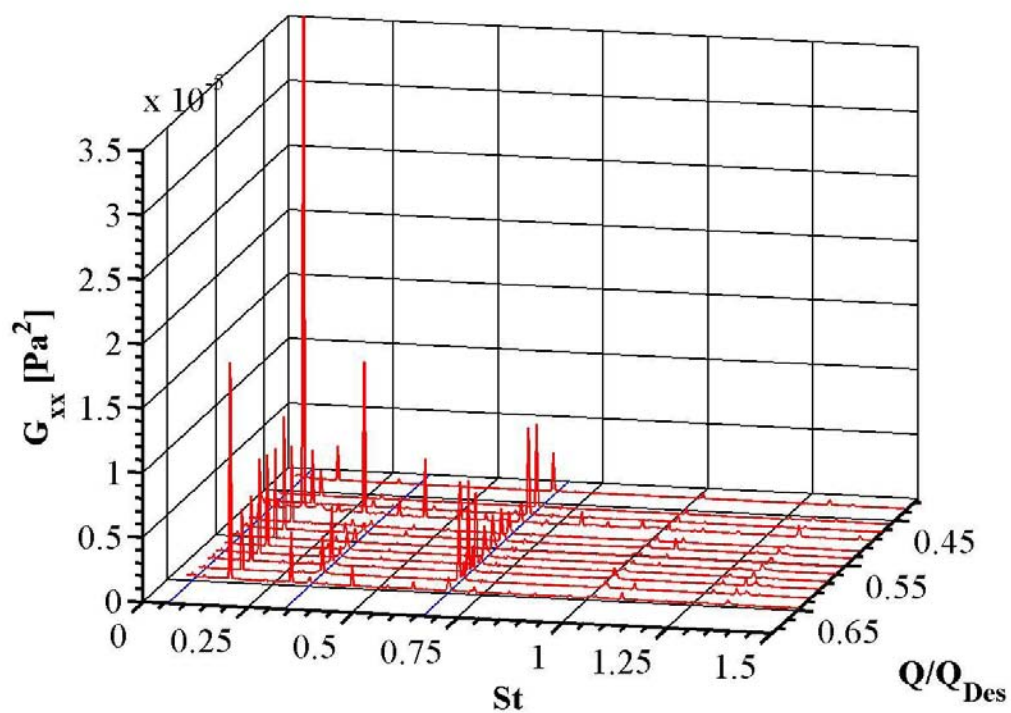


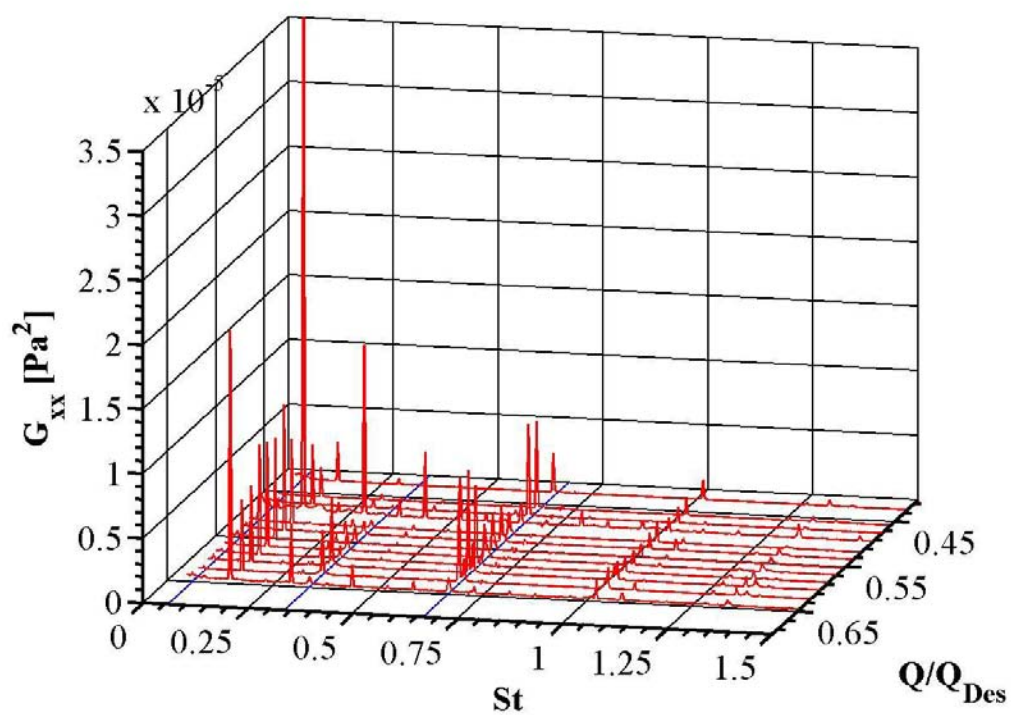
Fig. 6.2.2.6.4 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 47.2345$ [l/s]

6.2.3. Dati 13/09/13

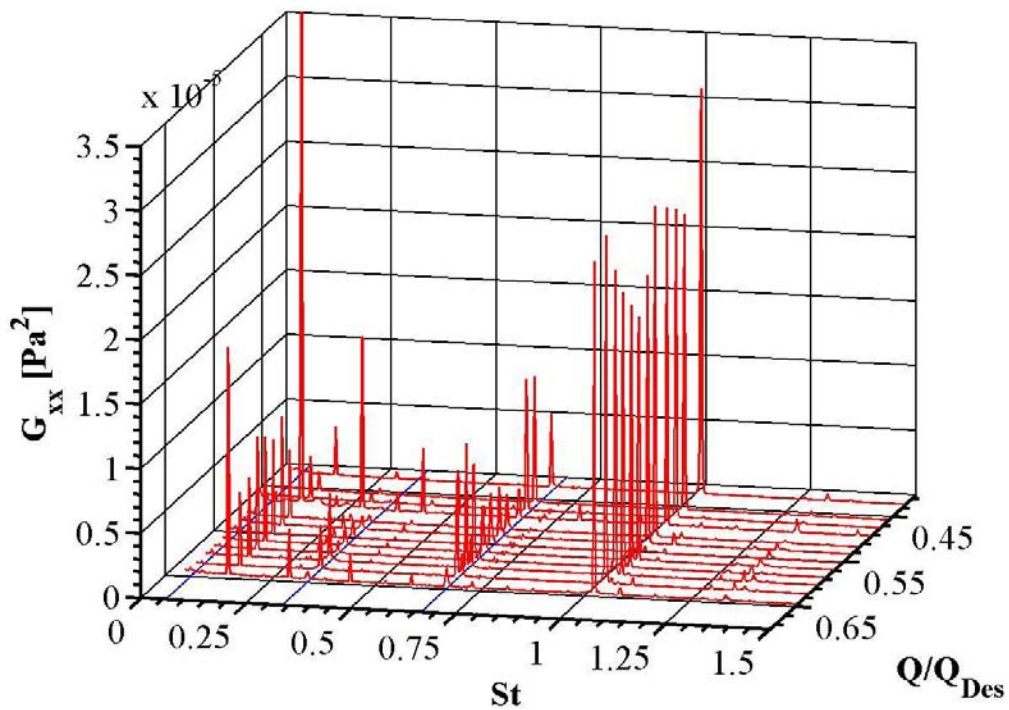
6.2.3.1. Waterfall:



a) sensore 3



b) sensore 5



c) sensore 6

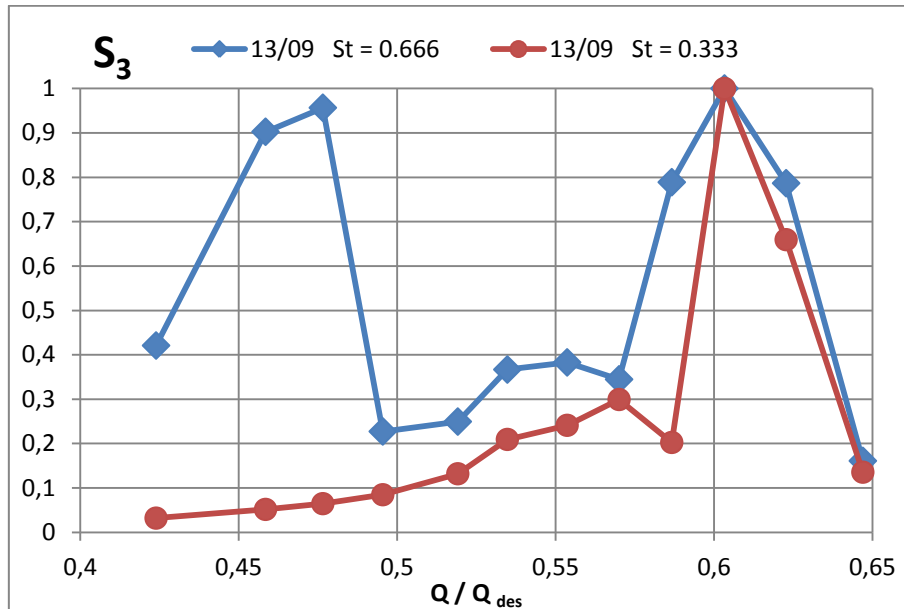
Fig. 6.2.3.1 – waterfall dei dati acquisiti in data 13/09

Nonostante la frequenza $St = 0.666$ sia presente in tutto il campo di portate possiamo osservare come l'andamento presenti dei picchi in corrispondenza del 47%, del 55% e del 60% della portata nominale.

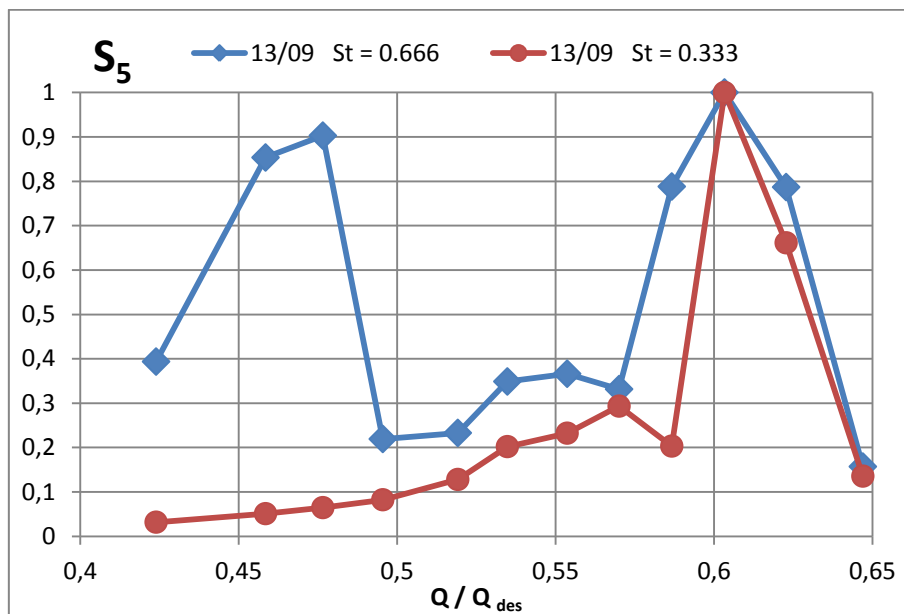
Questo andamento è visibile in modo molto marcato nei grafici proposti di seguito.

Anche la frequenza $St = 0.333$ segue questo andamento, andando però ad annullarsi quasi totalmente al 47% della portata nominale.

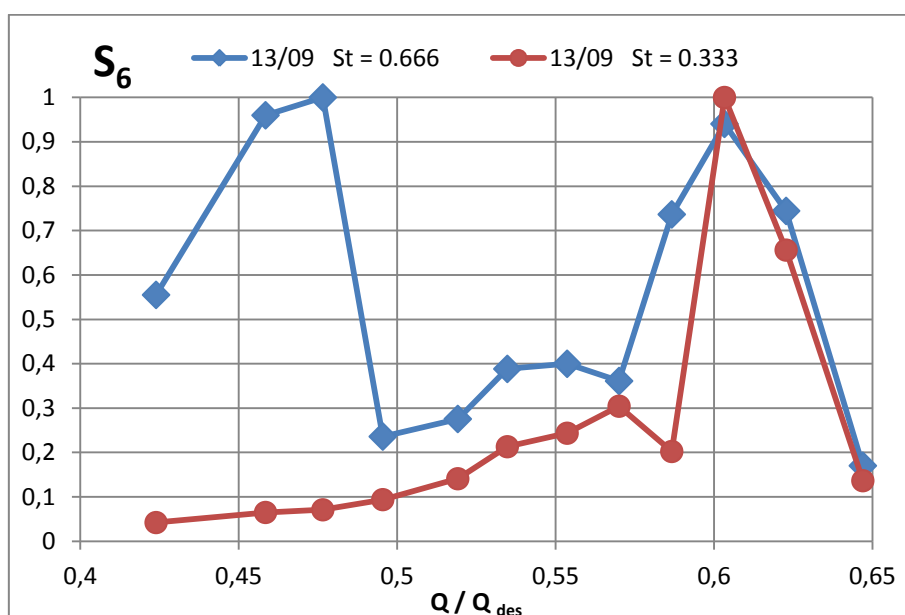
6.2.3.2. PSP $St = 0.333$ e $St = 0.666$



a) sensore 3



b) sensore 5



c) sensore 6

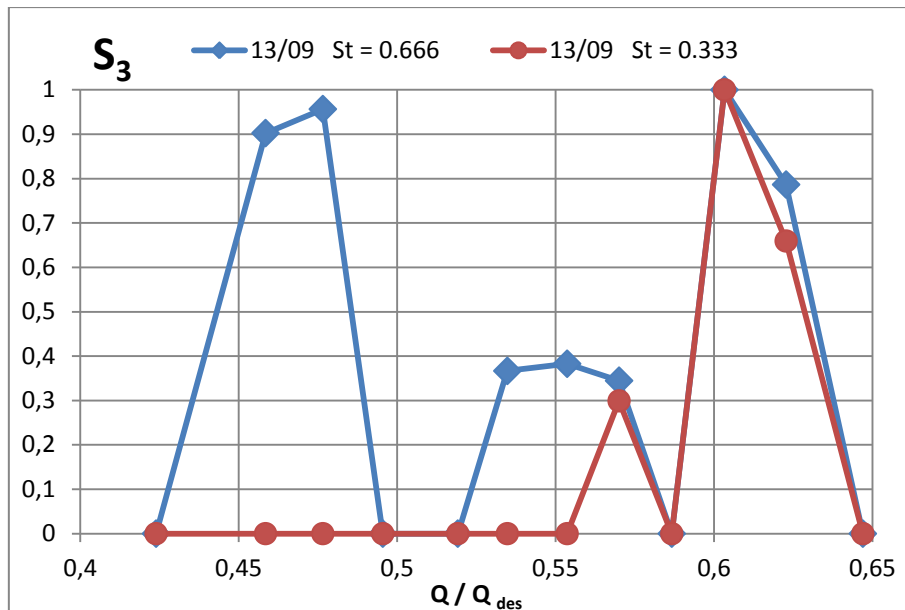
Fig. 6.2.3.2 – PSP relativi alle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$

6.2.3.3. Bispectra

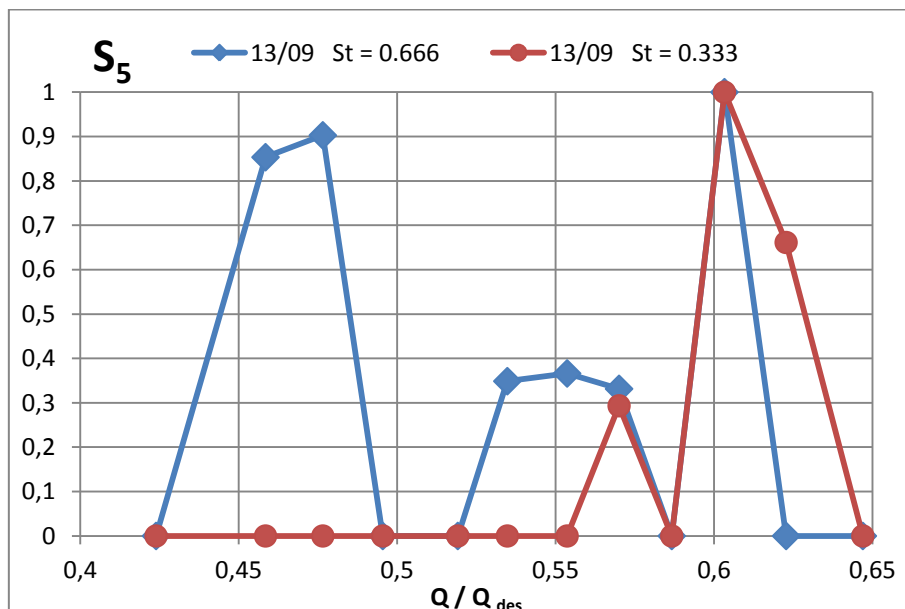
Q	Qrel		St = 0,33			St = 0,66	
[l/s]	[-]	S3	S5	S6	S3	S5	S6
33,2332	0,42	-	-	-	-	-	-
35,9423	0,46	-	-	-	x	x	x
37,3602	0,48	-	-	-	x	x	x
38,8431	0,50	-	-	-	-	-	-
40,6996	0,52	-	-	-	-	-	-
41,9263	0,53	-	-	-	x	x	-
43,4061	0,55	-	-	-	x	x	-
44,6909	0,57	x	x	x	x	x	x
45,9947	0,59	-	-	-	-	-	-
47,2989	0,60	x	x	x	x	x	x
48,8247	0,62	x	x	x	x	-	-
50,7231	0,65	-	-	-	-	-	-

Tabella 6.1 – risultati analisi bispectra

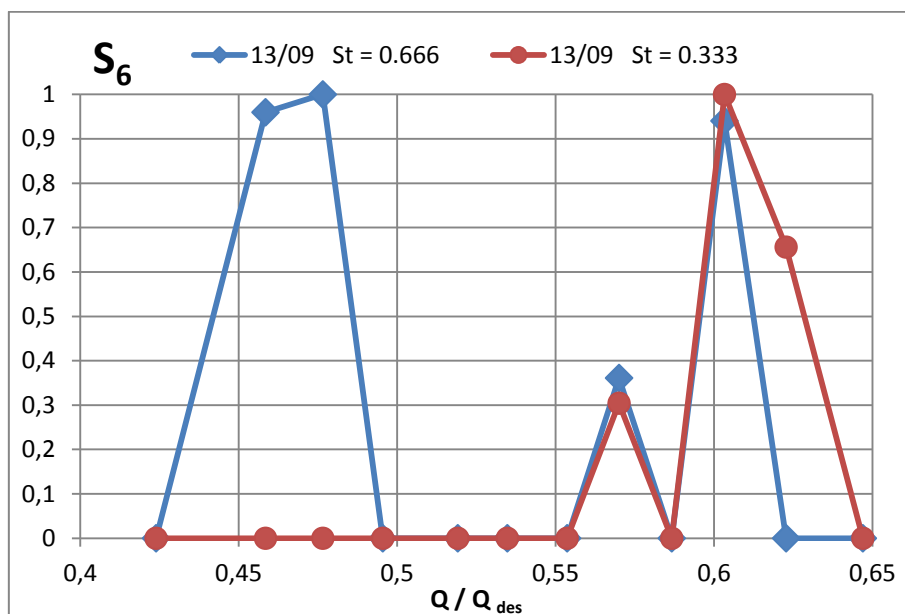
6.2.3.4. PSP St = 0.333 e St = 0.666 filtrato



a) sensore 3



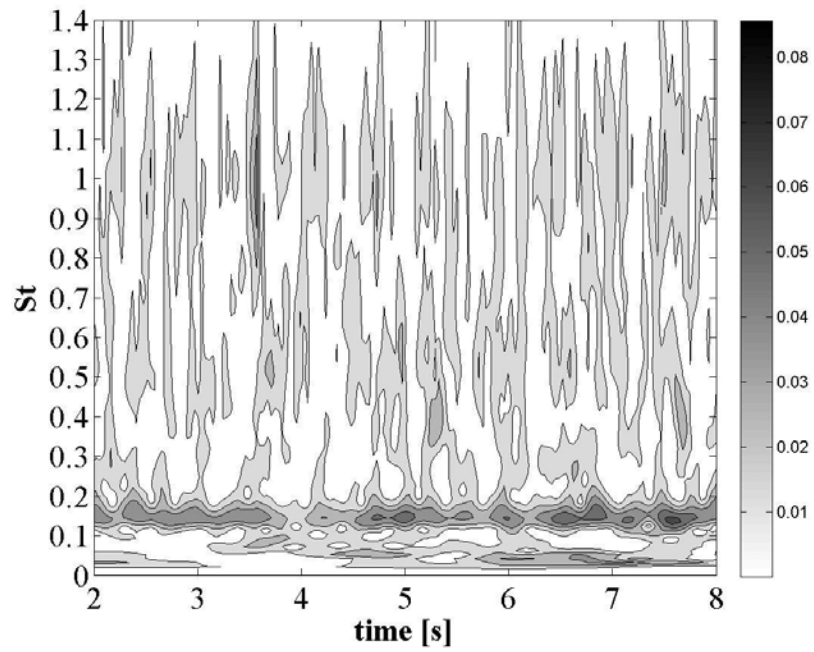
b) sensore 5



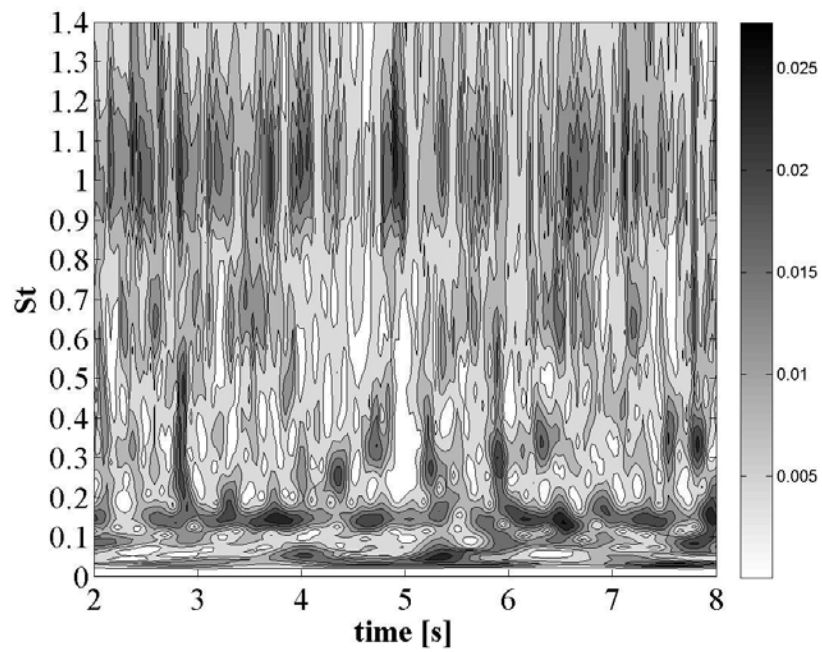
c) sensore 6

Fig. 6.2.3.4 – PSP relativi alle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrati con i dati ricavati dall'analisi bispettra

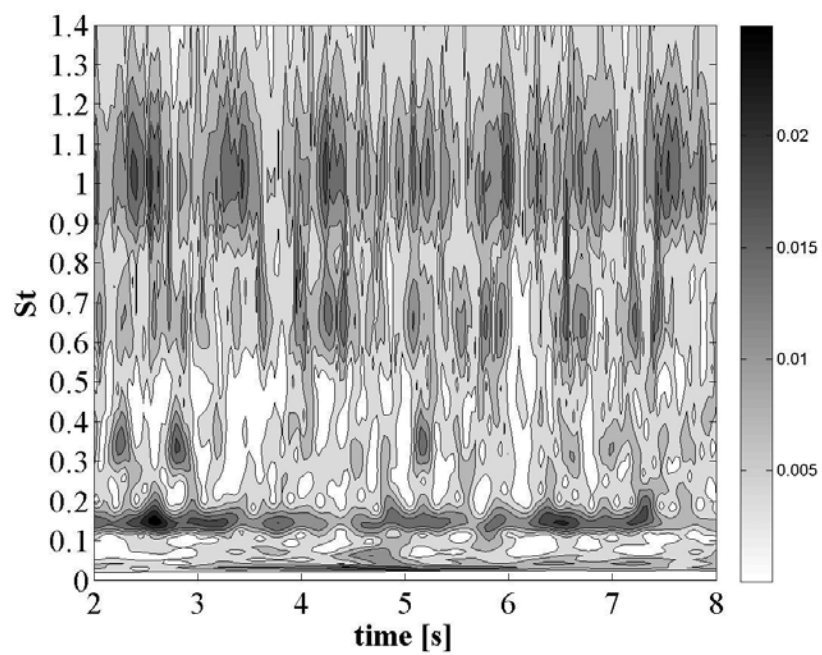
6.2.3.5. Wavelet:



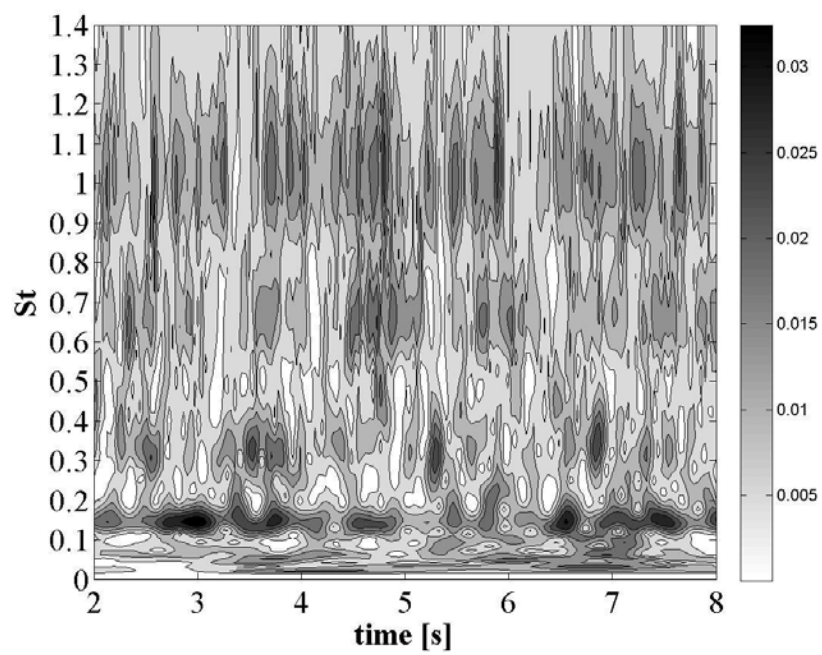
1. $Q_{rel} = 0.50$ $Q = 38.8431$ [l/s]



2. $Q_{rel} = 0.57$ $Q = 44.6909$ [l/s]



3. $Q_{rel} = 0.59$ $Q = 45.9947$ [l/s]



4. $Q_{rel} = 0.6$ $Q = 47.2989$ [l/s]

Fig. 6.2.3.5 – grafici trasformata wavelet relativi al sensore 6

6.2.3.6. CrossWavelet

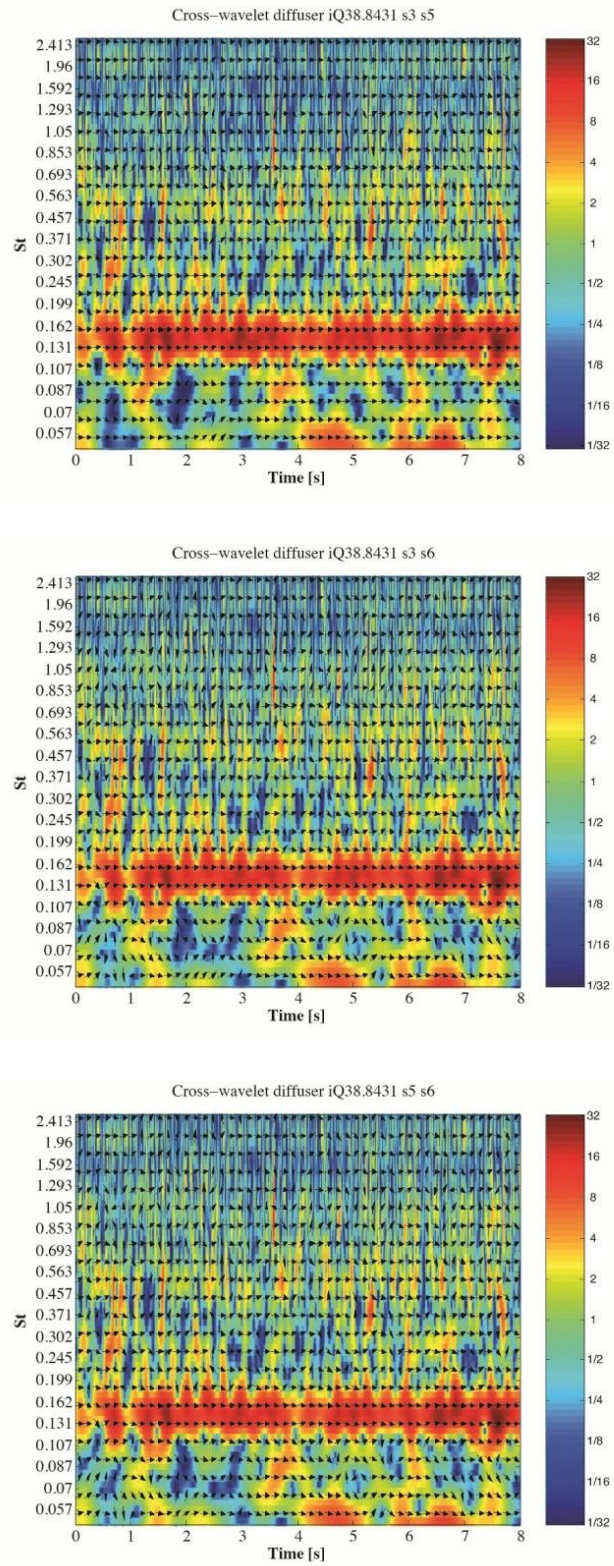


Fig. 6.2.3.6.1 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 38.8431$ [l/s]

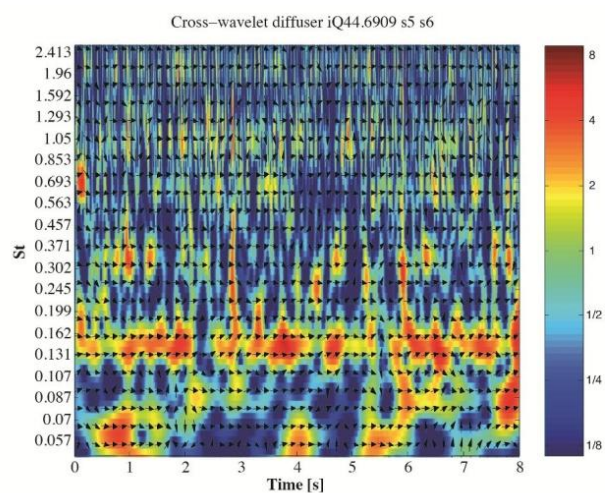
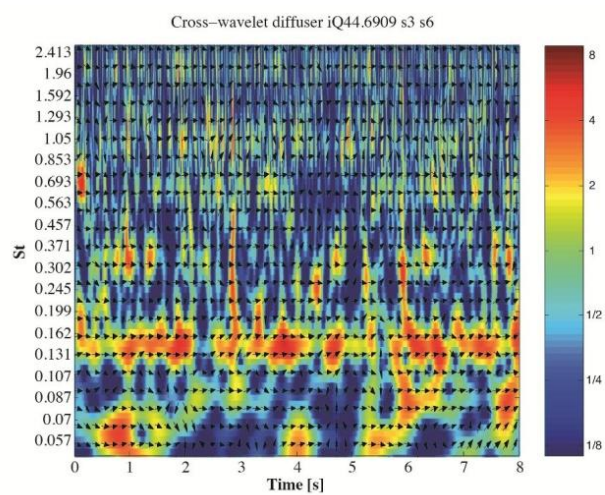
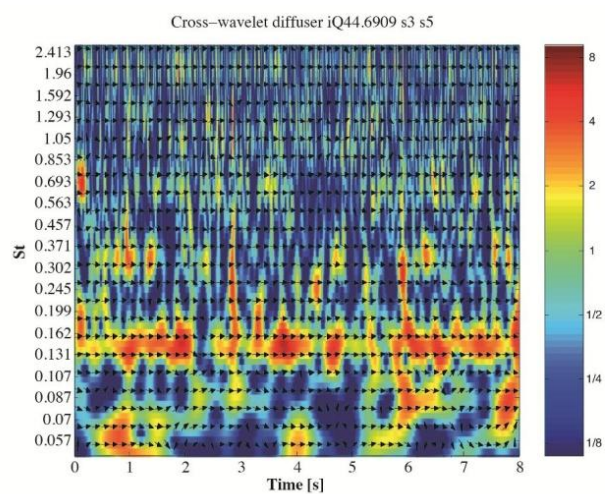


Fig. 6.2.3.6.2 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 44.6909$ [l/s]

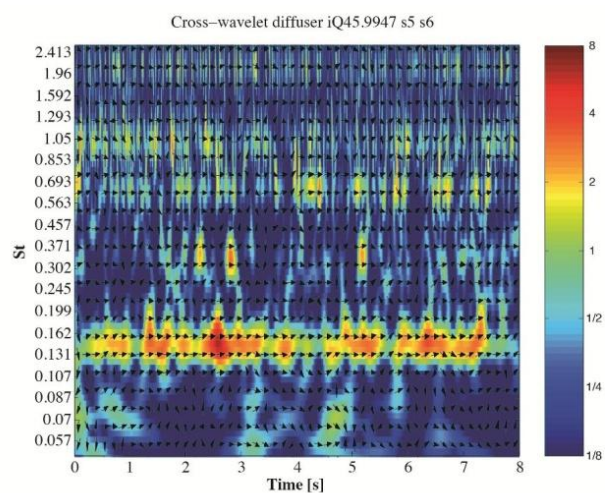
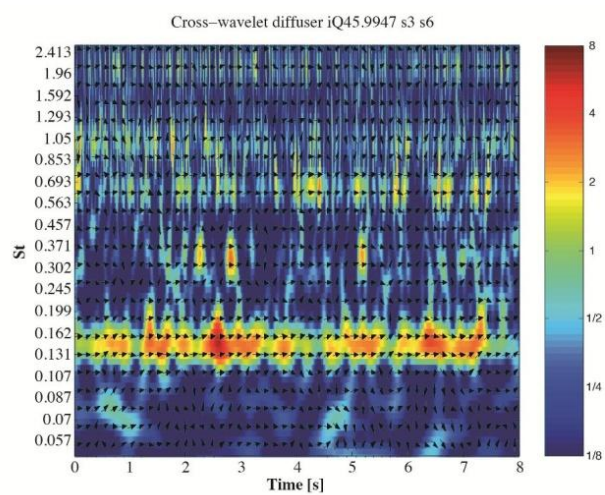
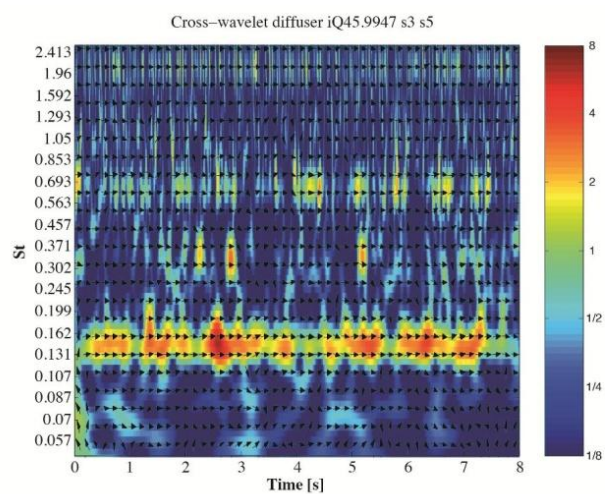


Fig. 6.2.3.6.3 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 45.9947$ [l/s]

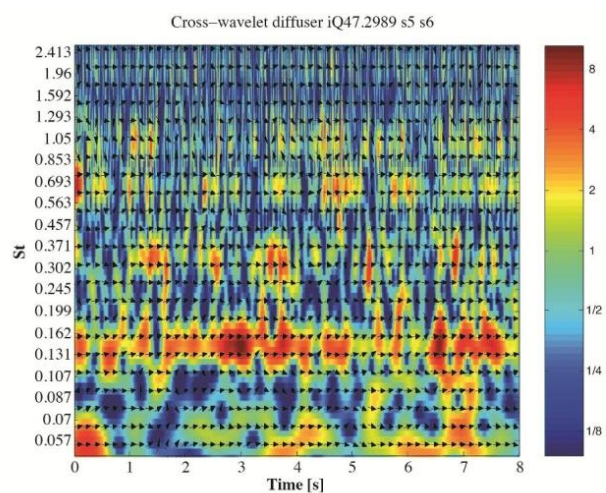
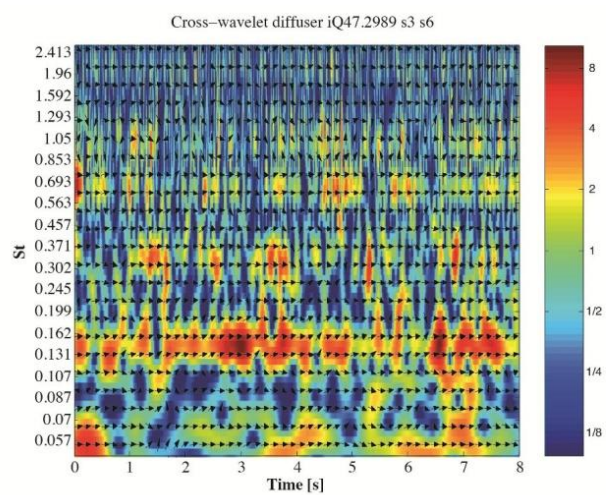
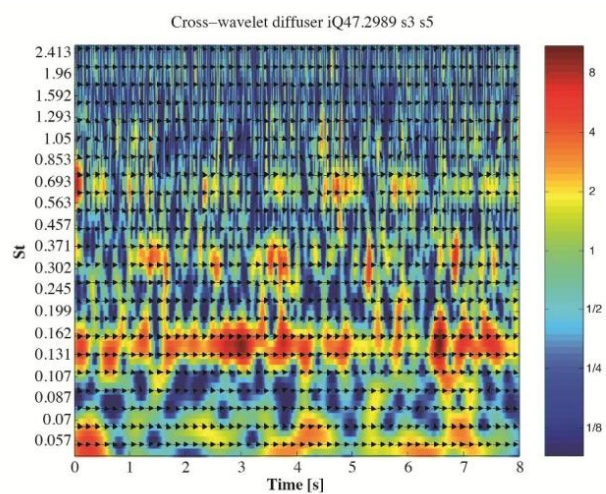


Fig. 6.2.3.6.4 – analisi crosswavelet dei sensori 3,5 e 6 alla portata $Q = 47.2989$ [l/s]

6.3. Analisi del campo di moto del fluido tramite telecamera ad alta risoluzione

L'analisi è stata svolta sfruttando la trasparenza della cassa della pompa/turbina che rende possibile la visualizzazione del fluido all'interno della macchina. Per rendere visibile il moto del fluido è stata immessa dell'aria compressa nella macchina attraverso dei fori presenti su una paletta distributrice: l'aria immessa nella macchina veniva trasportata dal fluido seguendo il campo di moto e rendendolo così visibile. Ogni foro, presente sulla paletta, comunicava con l'esterno attraverso un tubicino che veniva collegato ad una valvola per modulare l'intensità dell'aria compressa. I fori presenti nella paletta sono 12 e sono stati disposti come i trasduttori di pressione (fig. 5.8). Per svolgere questa prova è stata utilizzata la videocamera ad alta velocità (descritta precedentemente nel capitolo 5.5). Un video ad alta risoluzione era essenziale per poter osservare l'evolversi del fenomeno in modo dettagliato, potendo così osservare l'andamento del campo di moto con una risoluzione accettabile.

Prima di continuare con la spiegazione della prova è necessario fare una precisazione sul significato di due termini spesso confusi tra di loro: frame per secondo e velocità dello shutter.

Frame per secondo: sono le immagini per secondo che la videocamera mette in sequenza per comporre il video. Aumentando il numero di frame posso avere video più dettagliati a discapito di un aumento dello spazio di memoria occupato.

Velocità dello shutter: è la durata di ogni frame, cioè quanto l'otturatore rimane aperto per scattare un singolo frame. La velocità minima è quindi pari a 1 / fps.

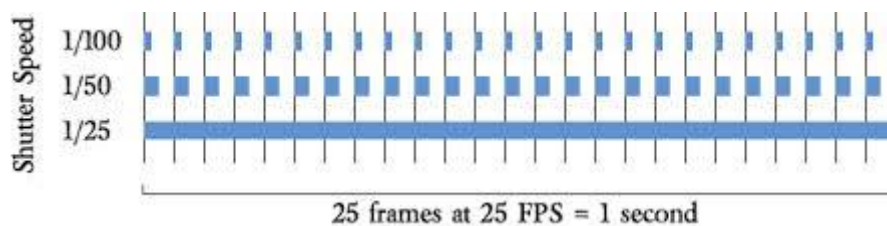


Fig. 6.3.1 – shutter speed e FPS

È facilmente intuibile come più lo shutter è veloce e più nitido sarà il singolo frame del video.

Uno dei problemi, riscontrati durante la prova, è stata l'illuminazione: infatti più riduco il tempo di apertura dello shutter (e quindi più lo rendo veloce) e più devo aumentare l'illuminazione per compensare il fatto che l'otturatore rimane aperto per un tempo minore. Per questo motivo, siamo stati costretti ad usare due lampade da 1000W l'una per ottenere un'illuminazione appena sufficiente per lo svolgimento della prova.

Per la prova abbiamo scelto il foro 3: il foro centrale della parte superiore della paletta. Questa scelta è stata motivata da due necessità:

- Il moto del fluido nel centro della paletta è parallelo alla paletta stessa e risente in modo marginale della turbolenza in ingresso del canale dovuta all'interazione tra girante e statore.
- La cassa del canale di ritorno è trasparente ma ci sono alcuni organi meccanici che ostruiscono la visuale di alcune parti della macchina. Il foro 3 è ben visibile.

Lo scopo della prova era quello di verificare visivamente i risultati trovati attraverso le prove precedenti. Di seguito sono riportati alcuni fotogrammi, catturati dalla videocamera, relativi alle portate più interessanti.

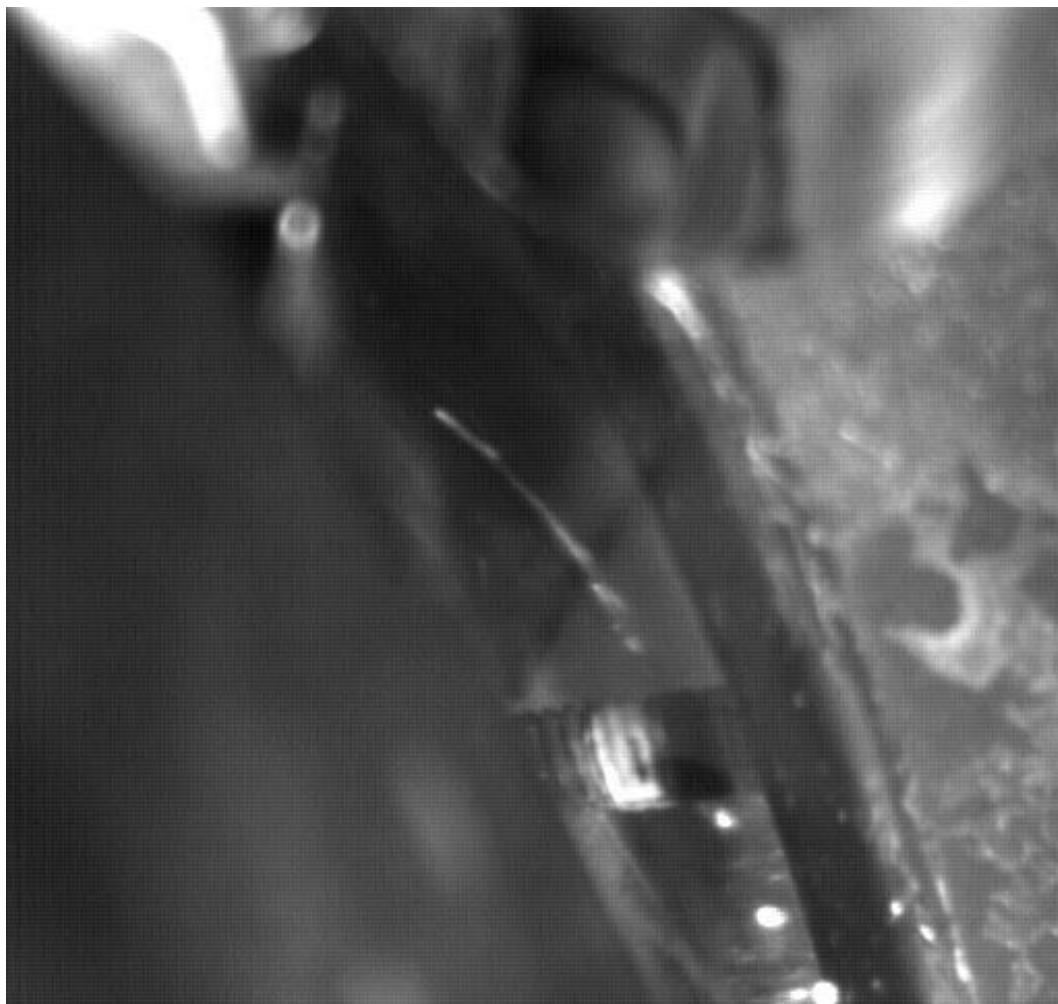


Fig. 6.3.2 – fotogramma scattato a $Q = 79.00$ [l/s]

Questo fotogramma è stato scattato a $Q = 79.00$ l/s, cioè praticamente in condizioni nominali ($Q_{rel} \approx 1$). Come si può osservare, l'aria segue perfettamente la paletta e il flusso d'aria non si scompone: questo significa che il campo di moto e il campo di pressione sono costanti nel canale tra le due palette statoriche. L'aria comincia a scomporsi solo dopo la fine della paletta dove il canale ha un rapido allargamento. Nelle condizioni nominali ci aspettavamo un moto privo di instabilità e questo fotogramma ha confermato l'ipotesi iniziale.

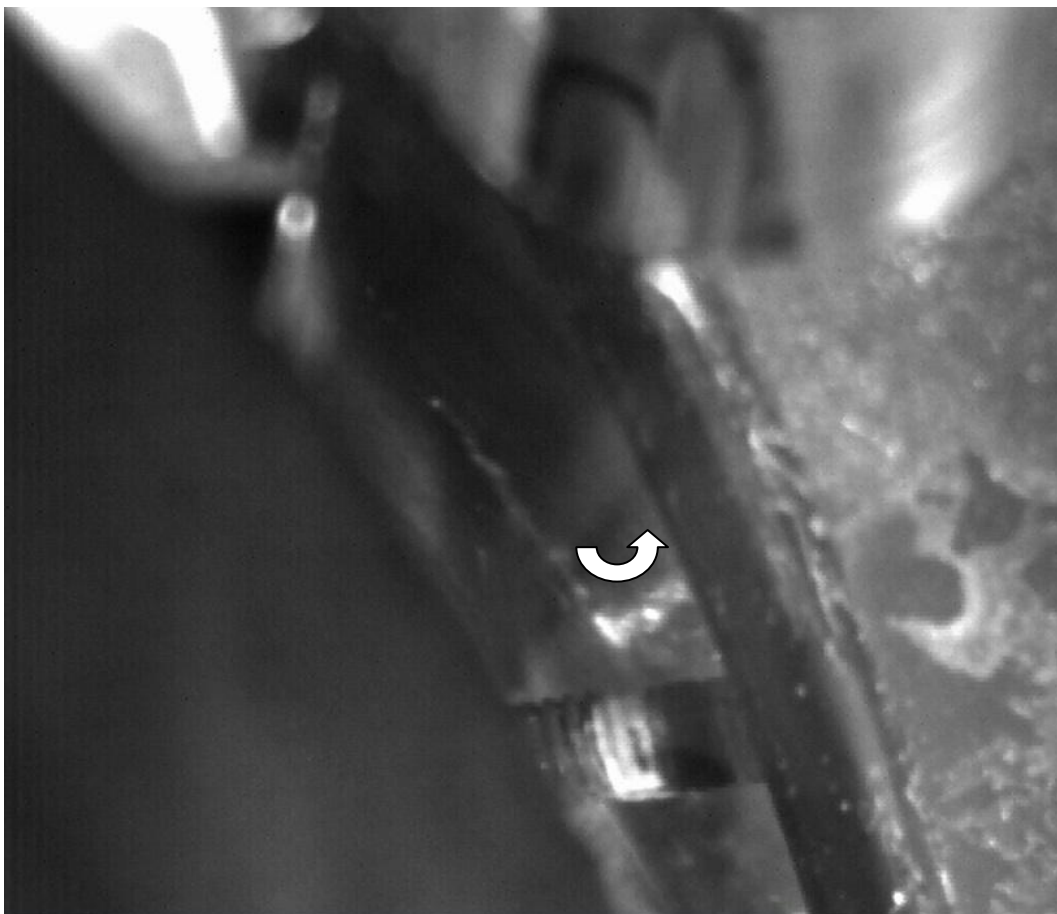


Fig. 6.3.3 – fotogramma scattato a $Q = 48.72$ [l/s]

Il secondo fotogramma proposto è relativo alla portata $Q = 48.72$ l/s ($Q_{rel} = 0.62$). Come si può osservare, l'aria segue la paletta fino al bordo di uscita dopo di che, sotto l'influenza di un vortice, si alza in modo molto repentino (vedi freccia bianca).

Di seguito vengono proposti una successione di fotogrammi per osservare l'andamento istantaneo delle bolle e l'evolversi del vortice.



Fig. 6.3.4 – fotogrammi scattati in successione a $Q = 43.17$ [l/s]

Questi fotogrammi sono relativi alla portata $Q = 43.17$ l/s ($Q_{rel} = 0.55$). In questi tre fotogrammi successivi è chiaramente visibile l'evolversi del vortice da come l'aria si stacca progressivamente dal bordo della pala.

Un'altra successione di fotogrammi relativi alla portata $Q = 37.65 \text{ l/s}$ ($Q_{\text{rel}} = 0.48$) vengono proposti non solo per mostrare l'evoluzione del vortice ma anche la sua estinzione.

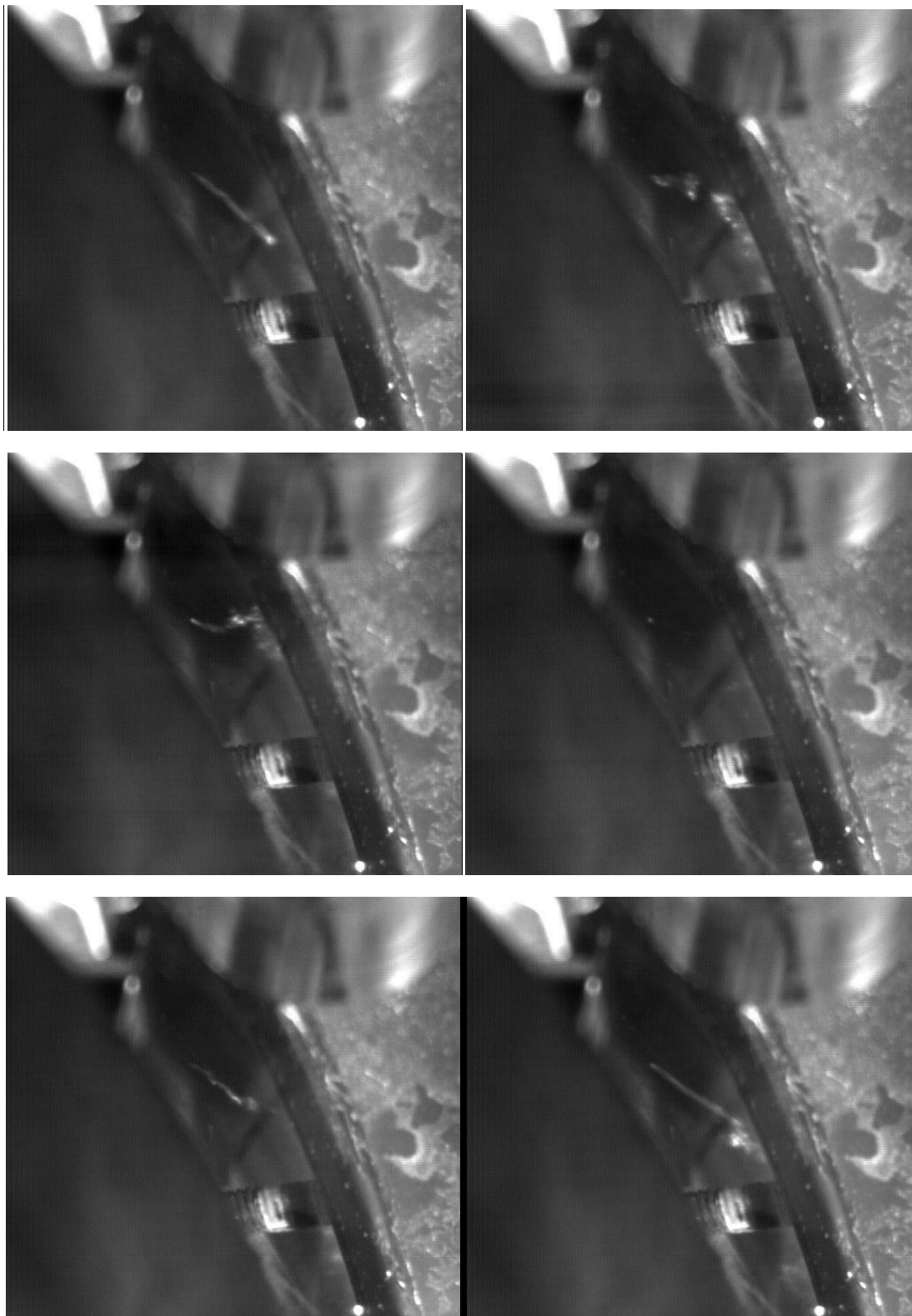


Fig. 6.3.5 – fotogrammi scattati in successione a $Q = 37.65 \text{ [l/s]}$

Si può osservare come l'evoluzione (già vista nella successione di fotogrammi precedente) sia analoga. Una volta arrivati allo stallo completo, cioè il vortice che occupa tutto il canale statorico, si ha un aumento locale della pressione tale che l'aria compressa non riesca più ad entrare. Lo stallo completo ostruisce tutto il canale e impedisce alla portata di fluire all'interno del canale stesso ma una volta raggiunto lo stallo completo, il vortice si estingue (il quarto fotogramma), spostandosi nel canale successivo, permettendo alla portata di cominciare a fluire nuovamente (ultimi due fotogrammi).

Analizzando anche gli altri fotogrammi relativi a questa portata sono state confermate altre due considerazioni interessanti (precedentemente analizzate dall'analisi numerica): la prima è che in alcuni casi il flusso d'aria risaliva la paletta controcorrente a causa del vortice (cioè l'importanza dell'evento faceva sì che non solo le bolle d'aria si staccassero dalla superficie della paletta ma che risalissero il canale controcorrente) e la seconda è che il fenomeno non è costante nel tempo ma si verifica con una certa frequenza.

6.4. Analisi numerica eseguita con il programma Ansys CFX

Di seguito verranno riportati solo i risultati dell'analisi numerica eseguita con il programma Ansys CFX per essere così confrontati con i risultati ottenuti dall'analisi sperimentale.

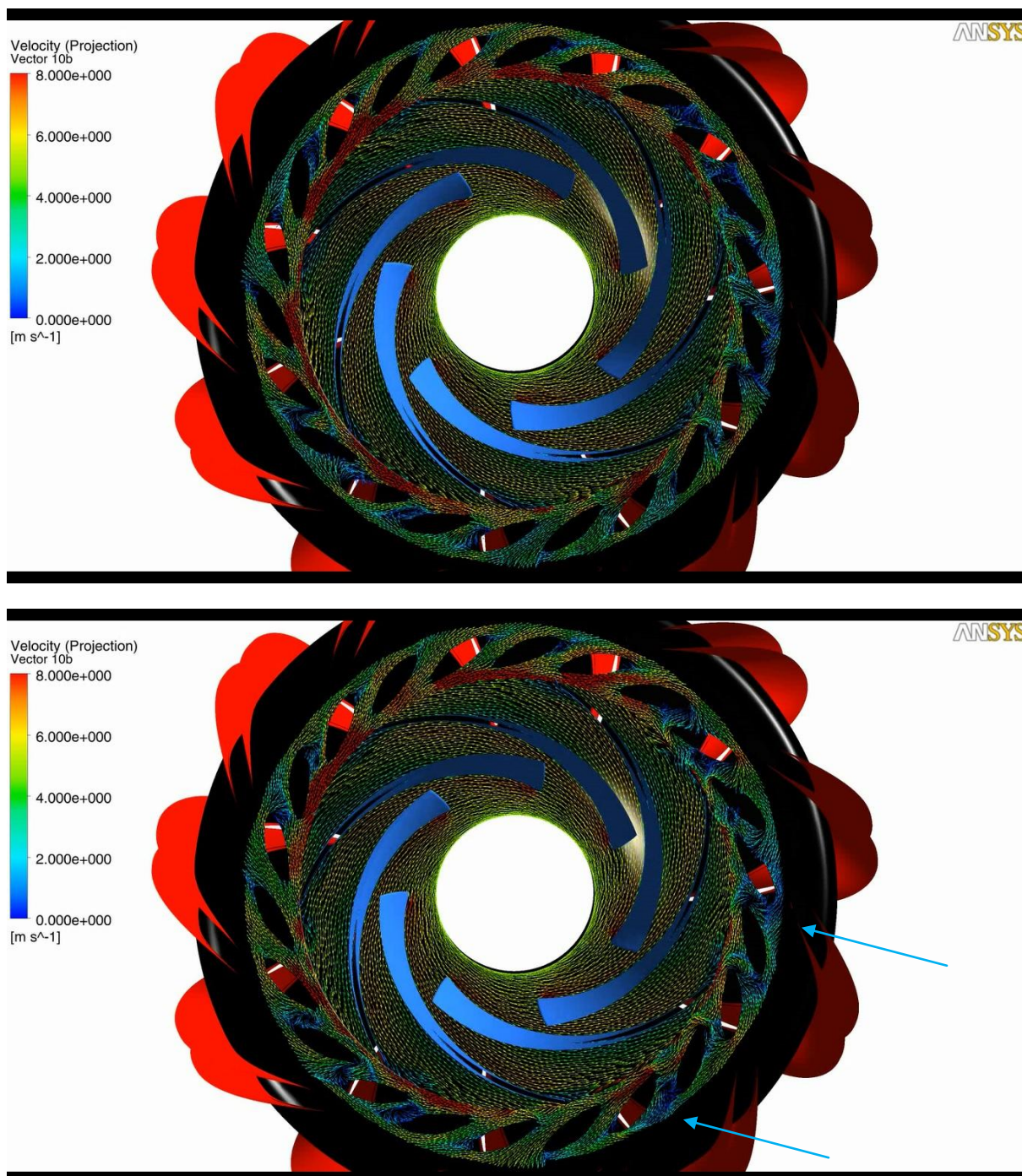


Fig. 6.4.1 – fotogrammi ricavati dai risultati dall'analisi Ansys CFX

Sono stati proposti 2 fotogrammi di un video in cui si può osservare l'evoluzione dei vortici nei condotti statorici. Come si può notare dall'immagine, i canali interessati dai vortici sono più di uno, in più cambiano nel tempo (come si vede dall'analisi di entrambi i fotogrammi).

Di seguito viene riportata una seconda analisi condotta con Ansys CFX. In questo caso sono state rappresentate le linee di flusso del fluido. Nel fotogramma presentato si può osservare come ci sia un addensamento di queste linee di flusso in un condotto statorico (indicato dalla freccia nera), che rappresentano l'instaurarsi di un vortice.

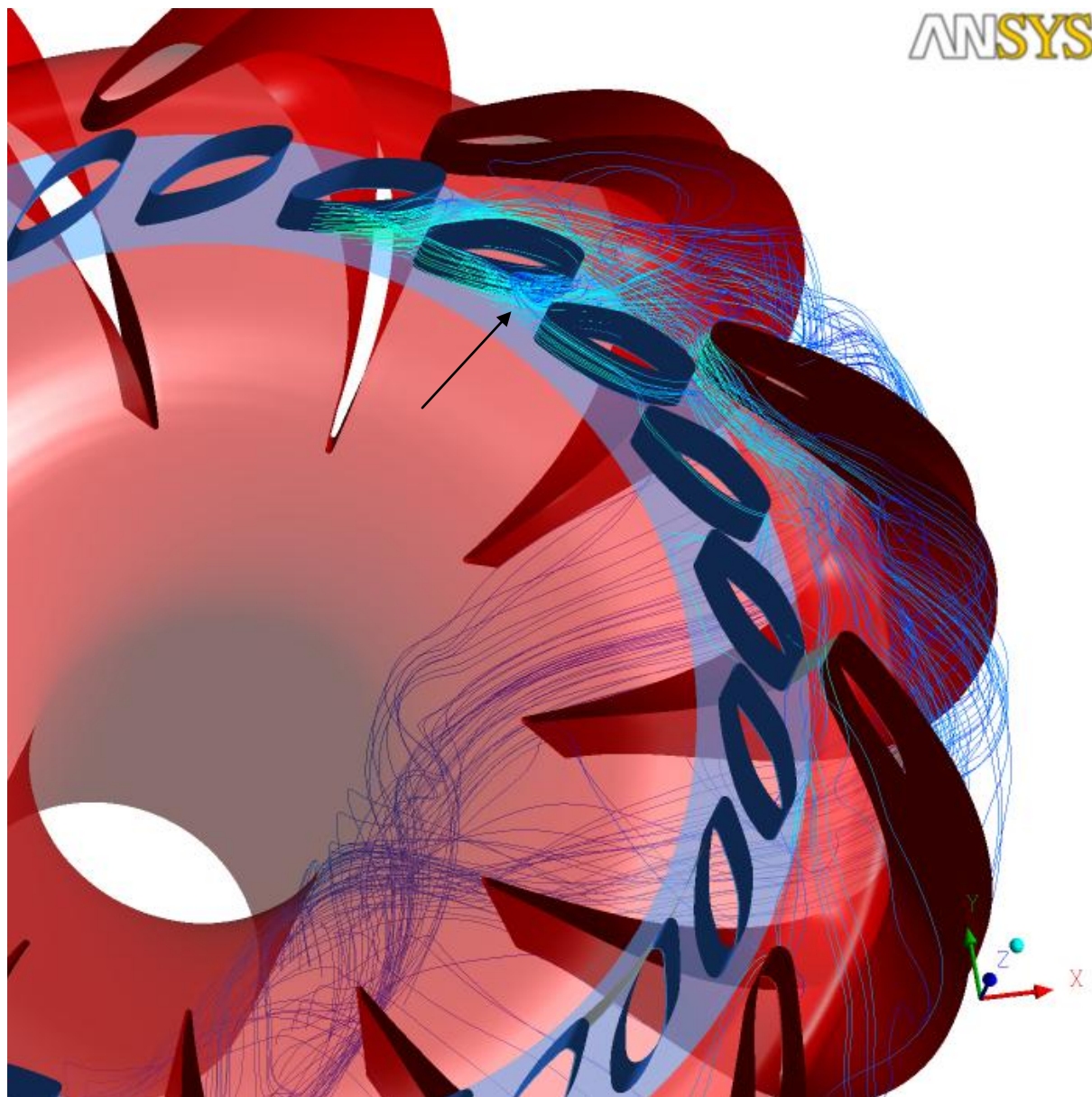


Fig. 6.4.2 - fotogramma ricavato dai risultati dell'analisi Ansys CFX

Entrambe le analisi numeriche quindi hanno confermato la presenza di vortici all'interno dei condotti statorici.

7. Conclusioni

Di seguito verranno analizzati i grafici relativi al sensore 6. Analoghe considerazione possono essere fatte per gli altri sensori (di cui verranno riportati solo i risultati).

7.1. Sensore 6

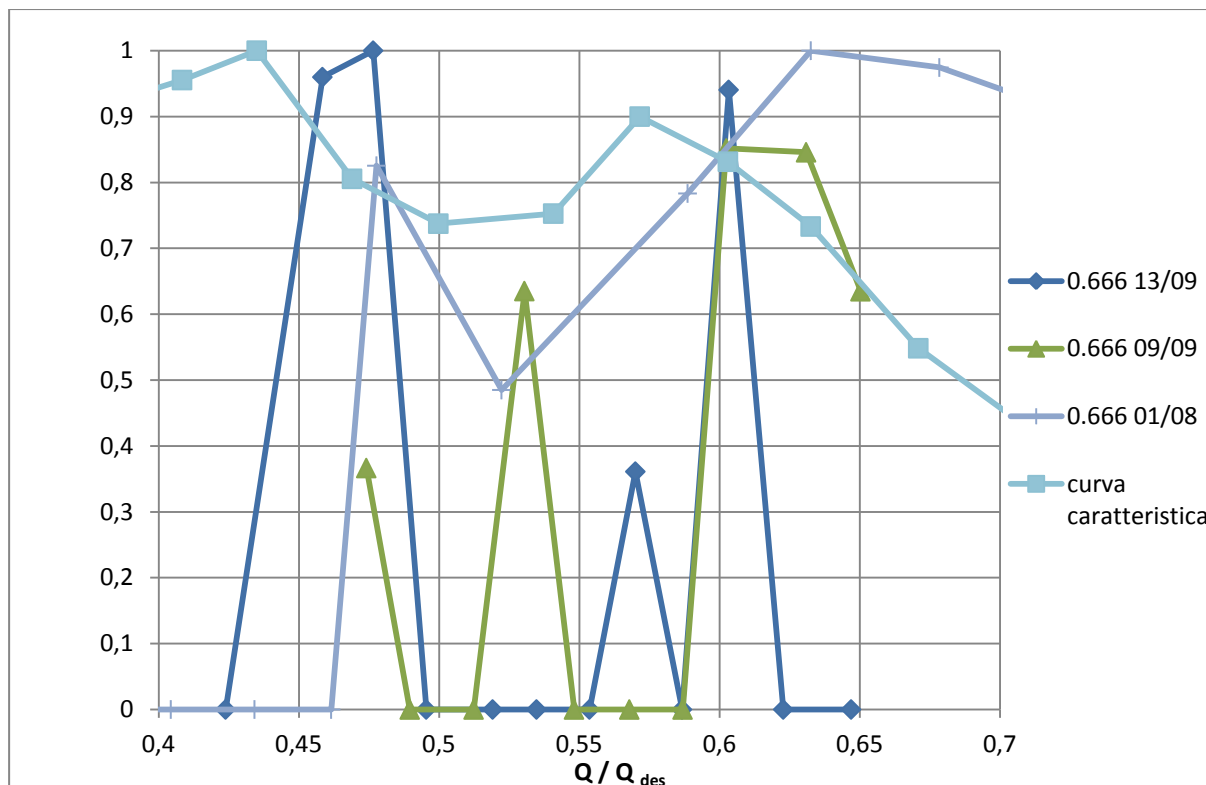


Fig. 7.1.1 – PSP della frequenza $St = 0.666$ filtrata relativo alle tre serie di dati del sensore 6

In questo grafico sono riportati i dati relativi alla frequenza $St = 0.666$ ottenuti dall'analisi delle tre serie di dati e la curva caratteristica. Si nota come le tre serie di dati evolvano con lo stesso andamento (qualitativamente parlando), e come quest'andamento sia in accordo con le oscillazioni della curva caratteristica.

Infatti si nota come due dei tre picchi mostrati dai dati coincidano con i massimi relativi della curva caratteristica e come ad ogni picco sia associato un cambio pendenza della curva caratteristica.

La serie che apparentemente sembra non seguire quest'andamento è quella relativa al 01/08. In realtà, come già specificato in precedenza, la serie è stata acquisita con un step di portate troppo grande (per coprire l'intero campo di portate): la bassa risoluzione dei dati mostra un andamento totalmente diverso dalle altre serie di dati. Nonostante questo, i pochi punti acquisiti seguono l'andamento descritto anche dalle altre serie di dati.

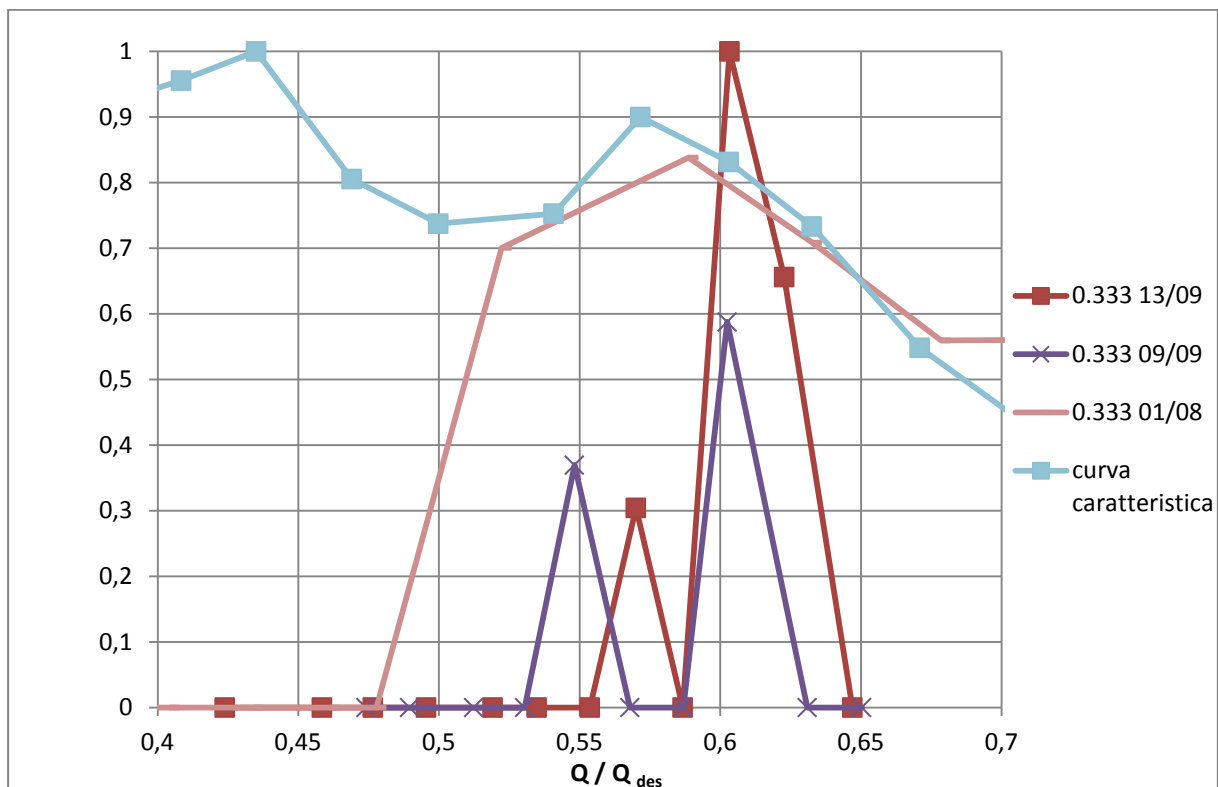


Fig. 7.1.2 – PSP della frequenza $St = 0.333$ filtrata relativo alle tre serie di dati del sensore 6

Per quanto riguarda la frequenza $St = 0.333$, l'andamento proposto è analogo a quello della frequenza $St = 0.666$ con la differenza che in questo caso i dati rilevano solo due picchi corrispondenti al 60% e al 55% della Q_{des} .

Anche in questo caso l'andamento segue in modo abbastanza accurato la curva caratteristica.

Le considerazioni fatte sullo step di portate con cui è stata svolta la prova 01/08 sono valide anche in questo caso: ad anche in questo caso si può osservare come i pochi punti acquisiti seguano l'andamento delle altre serie.

Informazioni più accurate si possono dedurre dal grafico che riporta i dati di tutte le serie confrontate con la curva caratteristica della macchina.

Per una migliore rappresentazione dei risultati, è stato scelto di non considerare i dati della serie 01/08.

Dall'analisi simultanea delle tre serie di dati si osserva che sono presenti tre zone in cui i picchi a $St = 0.333$ e $St = 0.666$ sono fondamentali, e più precisamente al 60%, 55% e 48% della portata nominale.

Data l'estrema instabilità del fenomeno studiato, i picchi attorno al 55% della Q_{des} vengono considerati come un unico picco. Infatti lo sfasamento tra i picchi è ampiamente giustificato dalle stocasticità del fenomeno.

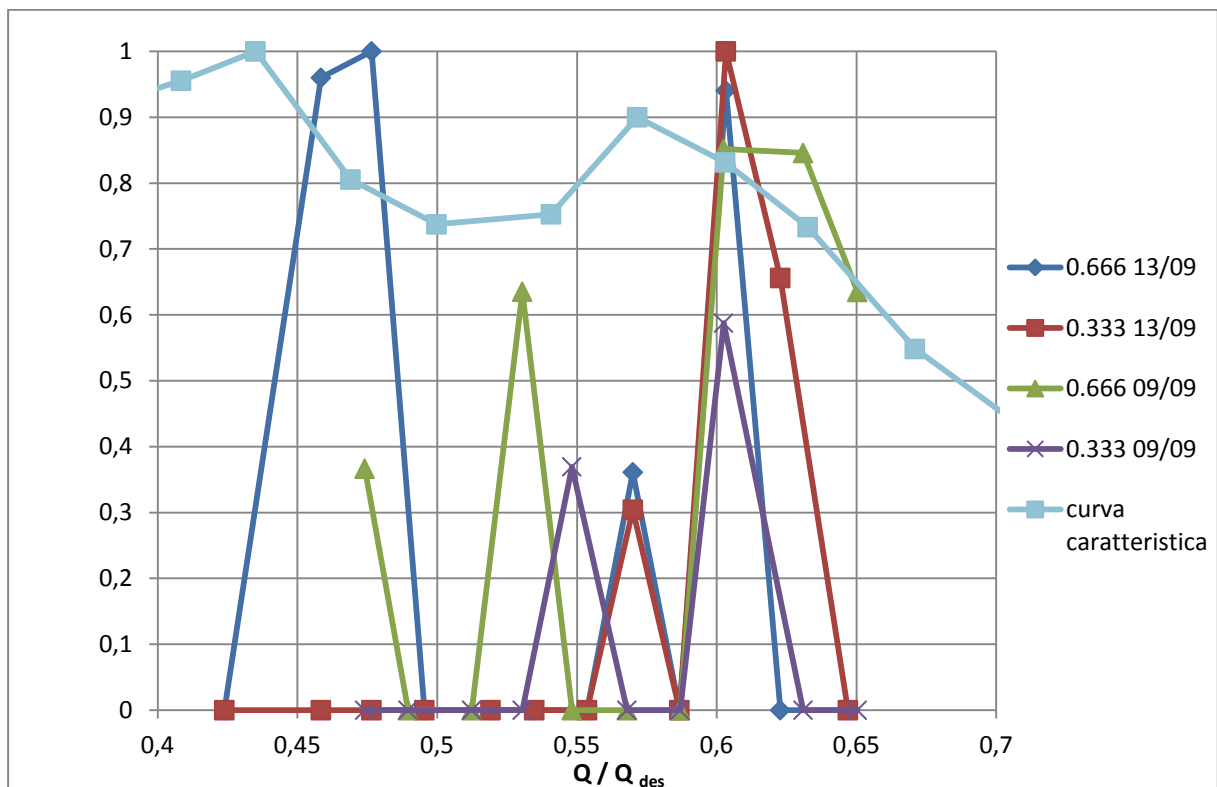


Fig. 7.1.3 – PSP delle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrata relativo alle serie di dati 09/09 e 13/09 del sensore 6

Queste zone coincidono sia con le oscillazioni della curva caratteristica, sia con le fluttuazioni riportate nella curva della pressione media.

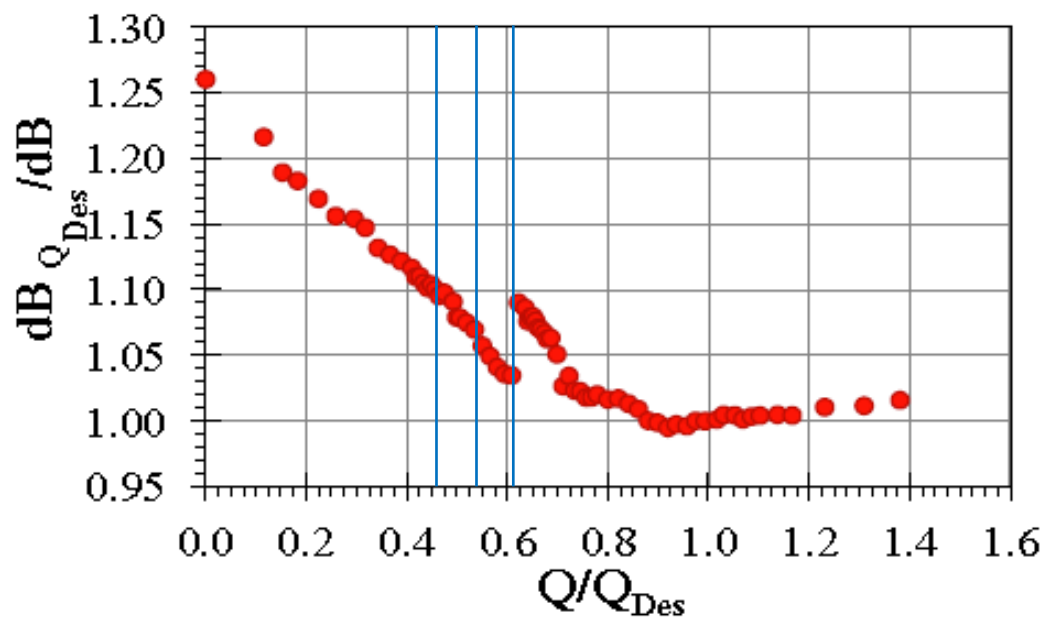


Fig. 7.1.4 – Andamento della pressione media in funzione della portata

Si può quindi dedurre che le oscillazioni di portata e pressione media siano dovute a queste instabilità che si formano all'interno della macchina e che le frequenze portanti di queste instabilità siano da ricondurre a $St = 0.333$ e $St = 0.666$.

Analoghe considerazioni possono essere fatte per i grafici relativi ai sensori 3 e 5.

7.2. Sensore 3

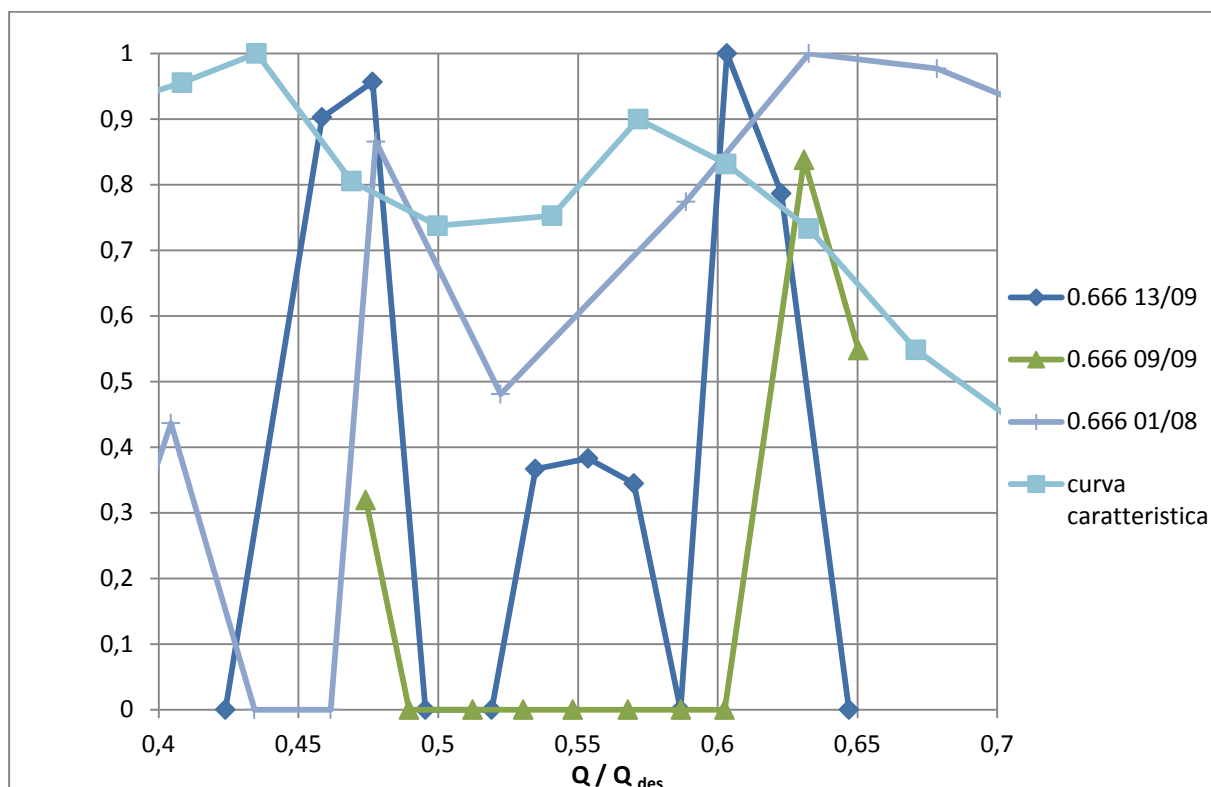


Fig. 7.2.1 – PSP della frequenza $St = 0.666$ filtrata relativo alle tre serie di dati del sensore 3

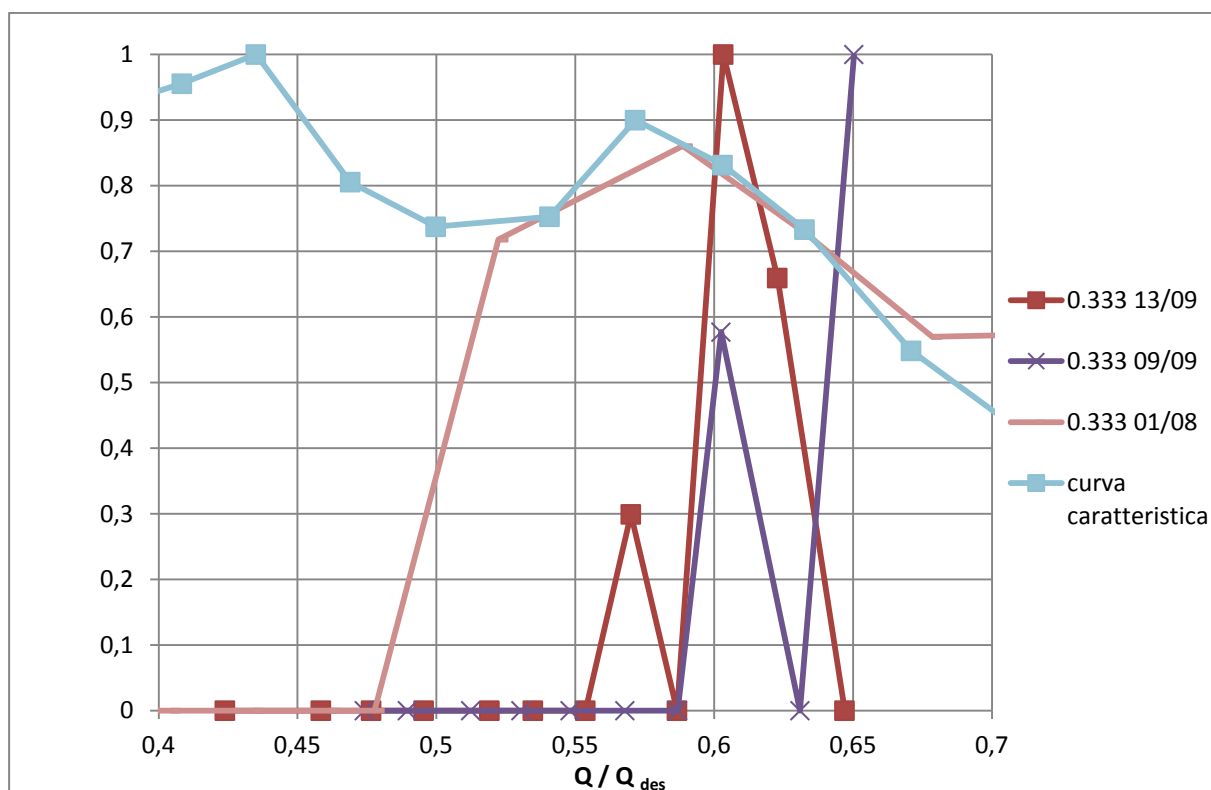


Fig. 7.2.2 – PSP della frequenza $St = 0.333$ filtrata relativo alle tre serie di dati del sensore 3

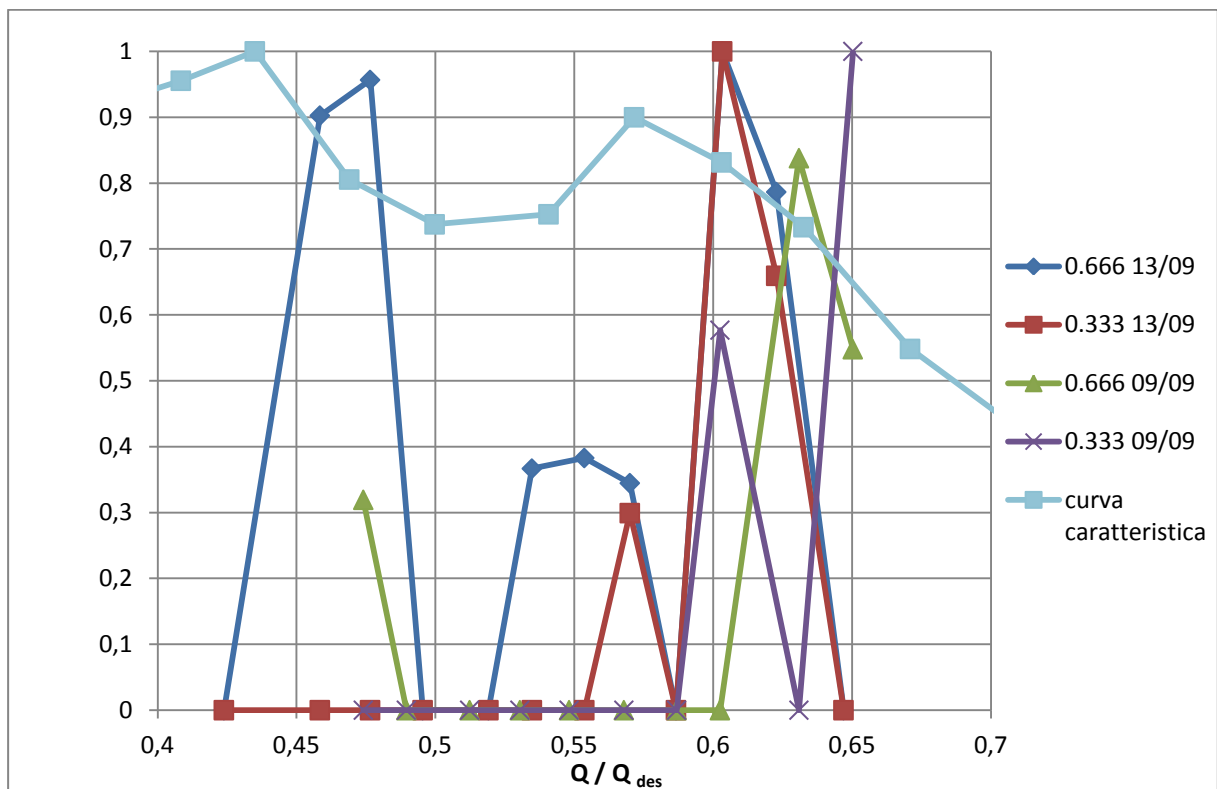


Fig. 7.2.3 – PSP delle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrata relativo alle serie di dati 09/09 e 13/09 del sensore 3

7.3. Sensore 5

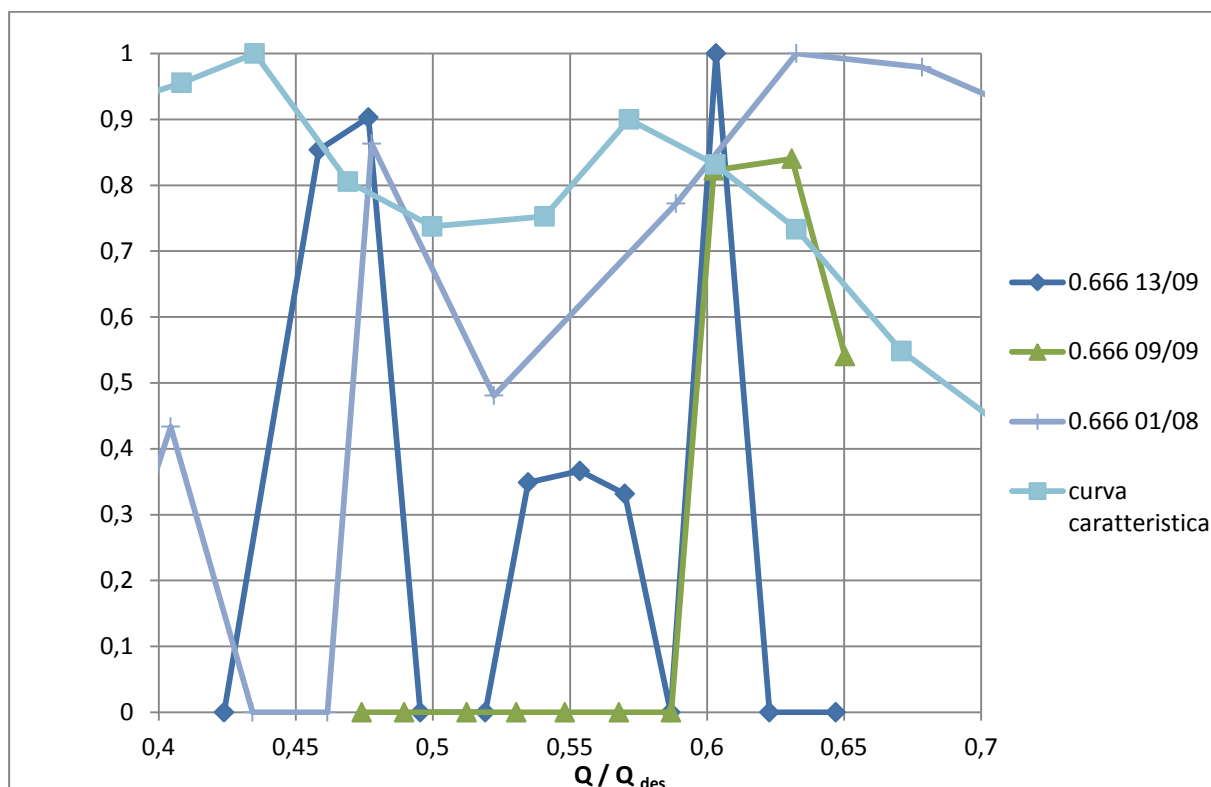


Fig. 7.3.1 – PSP della frequenza $St = 0.666$ filtrata relativo alle tre serie di dati del sensore 5

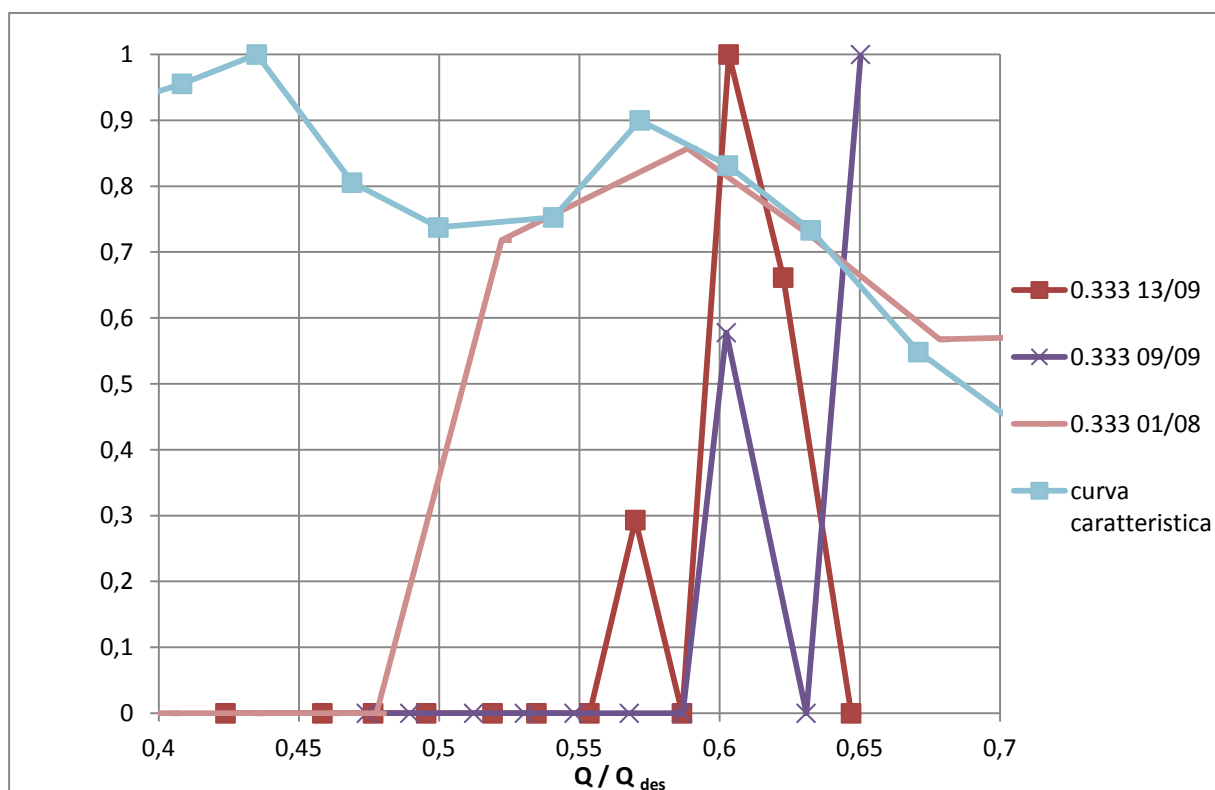


Fig. 7.3.2 – PSP della frequenza $St = 0.333$ filtrata relativo alle tre serie di dati del sensore 5

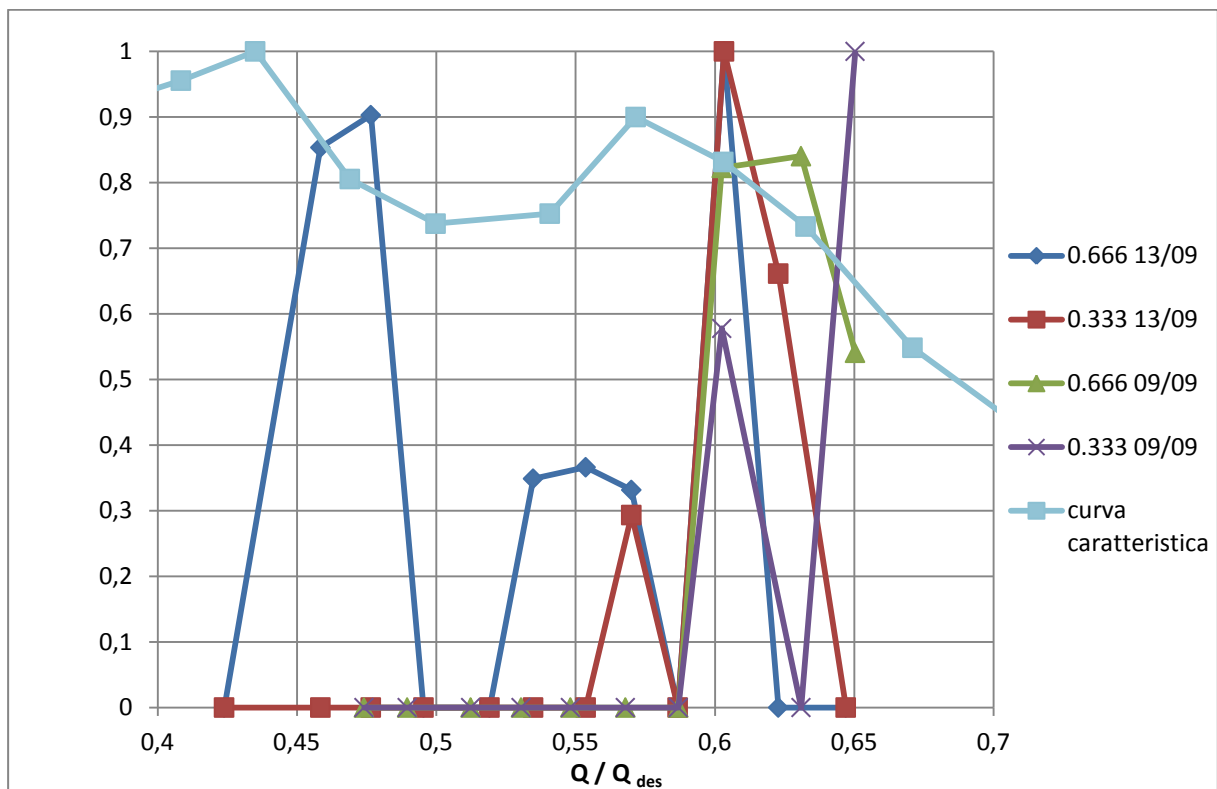


Fig. 7.3.3 – PSP delle frequenze $St = 0.333$ e $St = 0.666$ filtrata relativo alle serie di dati 09/09 e 13/09 del sensore 5

Da tutti questi risultati si può giungere alle seguenti conclusioni:

- Le oscillazioni della curva caratteristica e della pressione media della macchina sono da ricondurre alla nascita di un'instabilità all'interno della macchina stessa.
- $St = 0.333$, insieme a $St = 0.666$, in alcuni casi, è una frequenza fondamentale dell'instabilità presa in esame.
- Sono presenti tre zone in cui i picchi a $St = 0.333$ e $St = 0.666$ sono fondamentali, e più precisamente al 60%, 55% e 48% della portata nominale.
- L'instaurarsi dei fenomeni di instabilità sottrae energia al fluido. Una volta estinto il fenomeno instabile otteniamo una diminuzione dell'energia globale (chiaramente visibile nel grafico della pressione media a $Q_{rel} = 0.6$ e dalle oscillazioni del valore di prevalenza nella curva caratteristica).
- Sia l'analisi video che quella numerica condotta con il programma di calcolo Ansys CFX hanno confermato i risultati ottenuti con l'analisi sperimentale.
- Siamo in presenza di un fenomeno fortemente stocastico che rende confrontabili i dati solo in modo qualitativo.
- Nonostante la stocasticità del fenomeno, i tre sensori analizzati hanno fornito risultati confrontabili tra loro (a meno di qualche differenza che però non influiscono su queste conclusioni).
- Il fenomeno instabile si presenta come vortice: questo vortice è variabile nel tempo, nello spazio e nelle dimensioni.
 - Tempo: si può osservare dai vari grafici wavelet, riportati precedentemente, come il picco non sia costante nel tempo ma che si presenta con una condotta pulsante. Anche l'analisi video ha condotto alla medesima conclusione.
 - Spazio: nell'analisi numerica si nota come i vortici ruotino attorno alla girante.
 - Nelle dimensioni: nel grafico wavelet si nota come i picchi abbiano intensità diverse. La stessa conclusione si può dedurre osservando i video ottenuti dall'analisi: infatti mentre in alcuni casi le bolle si limitavano a staccarsi dal bordo (vortice di piccole dimensioni), in altri risalivano il condotto statorico (vortice che occupa tutto il condotto statorico).

Appendice A

Misurazione della portata

La misurazione di portata e il calcolo della sua incertezza è stata svolta in accordo con la legge Italiana “UNI EN ISO 5167-3” del 2004: “misurazione della portata dei fluidi per mezzo di dispositivi a pressione differenziale. Diaframmi, boccagli e venturimetri inseriti in condotti chiusi di sezione circolare: Parte 3: Boccagli e venturimetri boccaglio” (Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full Part 3: Nozzles and Venturi nozzles). In accordo con questa normativa, la portata di massa q_m può essere calcolata attraverso la differenza di pressione tra la pressione a monte e a valle del boccaglio:

$$q_m = C \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \frac{\sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1}}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (A.1)$$

Dove:

- D = diametro massimo del boccaglio
- d = diametro minimo del boccaglio
- $\beta = d / D$
- C = coefficiente di flusso del boccaglio

$$C = 0.9900 - 2.2262 \cdot \beta^{4.1} - (0.00175 \cdot \beta^2 - 0.0033 \cdot \beta^{4.15}) \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{1.15} \quad (A.2)$$

- ε_1 = coefficiente di comprimibilità, uguale ad 1 per i fluidi incomprimibili
- ρ_1 = densità dell'acqua a monte del boccaglio

Il numero di Reynolds Re_D , utilizzato nel calcolo del coefficiente di flusso C , dipende a sua volta dalla portata di massa:

$$Re_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D} \quad (A.3)$$

Questo comporta che la soluzione si raggiunge in modo interattivo (viene utilizzato un Re_D di primo tentativo che poi viene sostituito successivamente dal nuovo Re_D calcolato e si continua finché la differenza non è sufficientemente piccola. Nel nostro caso la differenza tra i due Re_D era inferiore a 0.001).

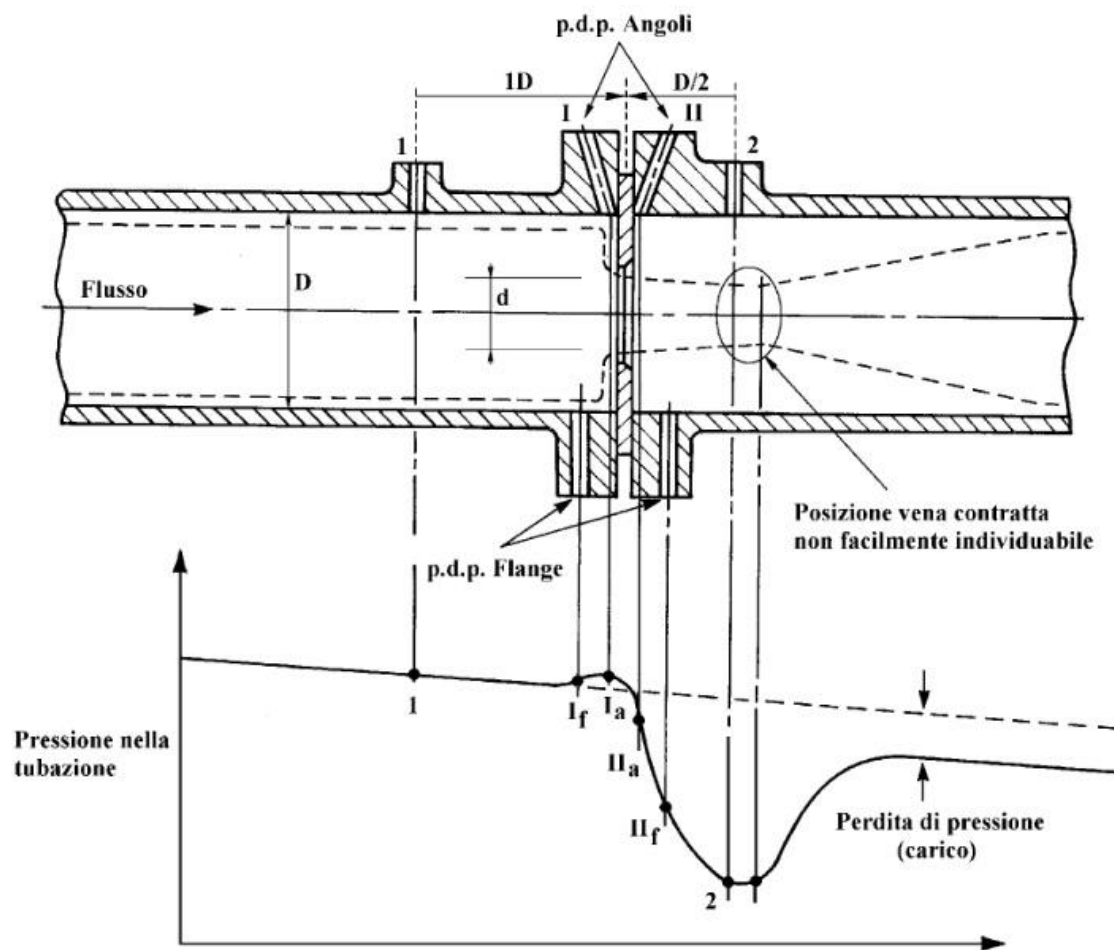


Fig. 1 – andamento della pressione in un boccaglio corto

Il laboratorio è fornito di un boccaglio corto per la misurazione della portata, avente come dimensioni

$d = 164.95\text{mm}$

$D = 258\text{mm}$

Di seguito è riportato la parte di programma utilizzata per il calcolo della portata.

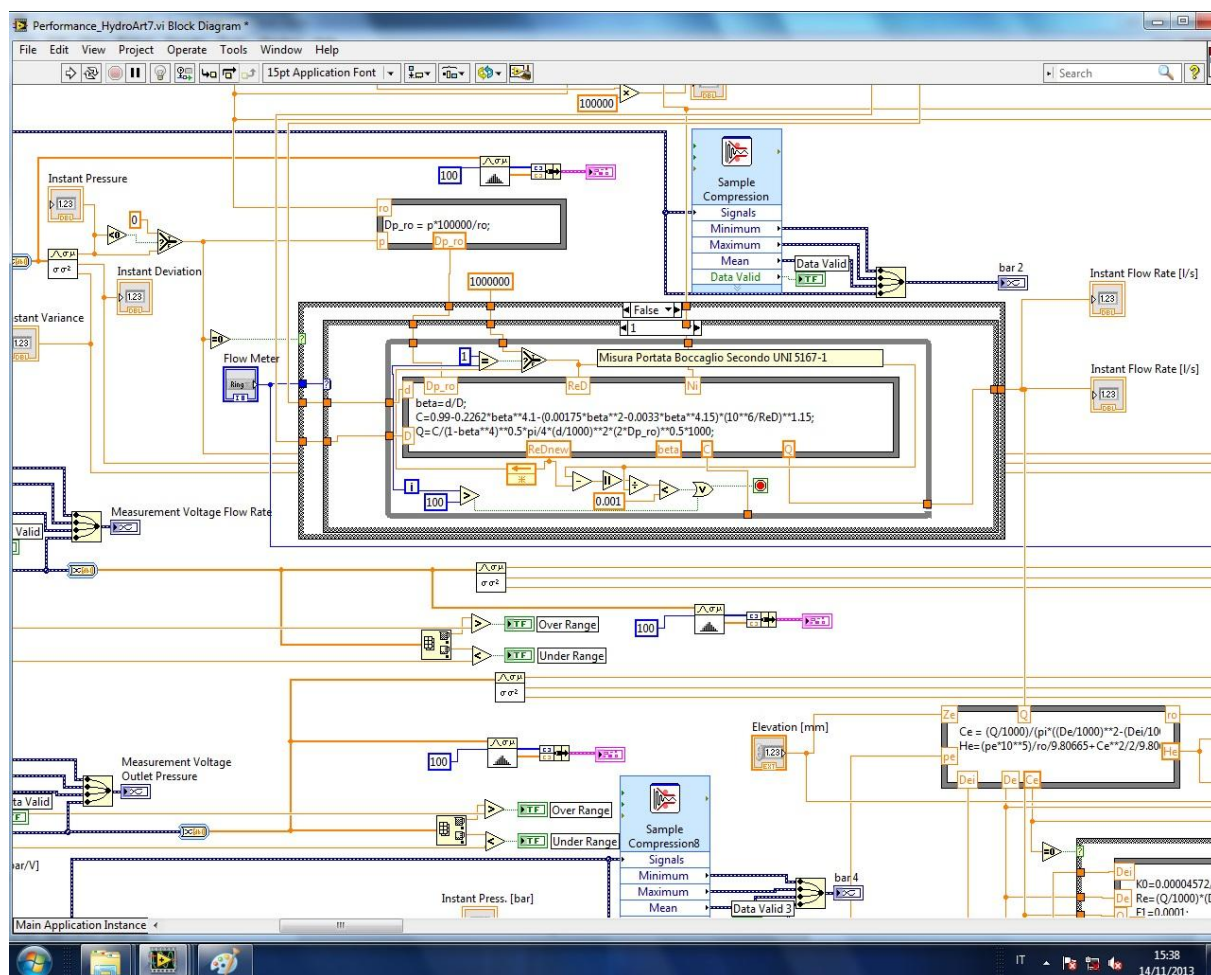


Fig. 2 – parte del programma per la misurazione della portata

La differenza di pressione tra monte e valle del boccaglio corto è stata misurata con il trasduttore di pressione differenziale (indicato nella fig. 3 dalla freccia rossa).

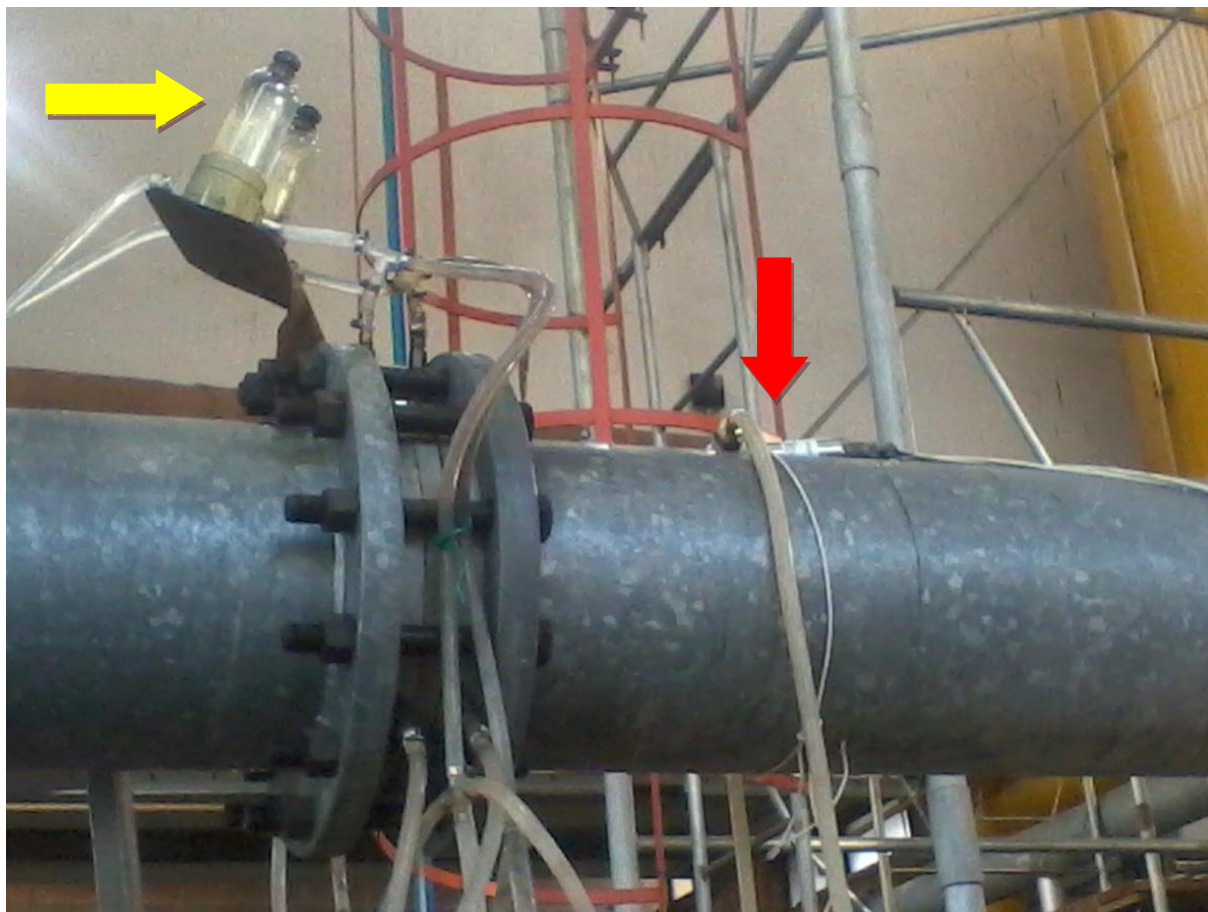


Fig. 3 – foto del boccaglio corto presente in laboratorio

I bulbi, indicati dalla freccia gialla, hanno la funzione di mantenere i tubicini di gomma che collegano il boccaglio corto al trasduttore di pressione differenziale liberi da eventuali bolle d'aria. Infatti la presenza di aria all'interno dei tubicini comporterebbe una lettura falsata della differenza di pressione e di conseguenza anche della portata.

Appendice B

Analisi di segnali dinamici

I principali metodi di analisi dei segnali di misura possono essere riassunti nei concetti di “analisi nel dominio del tempo” e “analisi nel dominio della frequenza”. E’ importante osservare che questi due modi di affrontare un problema sono tra loro intercambiabili, nel senso che, sotto opportune condizioni, nessuna informazione viene persa nel passare da un dominio all’altro. Il vantaggio che deriva dall’introduzione dei due domini è la possibilità di cambiare la prospettiva con la quale si osserva un dato fenomeno. In questo modo un problema che appare di difficile soluzione in un dominio può risultare molto più semplice nell’altro. Lo strumento matematico che consente di trasferire lo studio dei segnali e dei sistemi dal dominio del tempo al dominio della frequenza è la trasformata di Fourier (FT).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (\text{B.1})$$

La FT consente quindi di rappresentare un segnale continuo come somma di infiniti esponenziali periodici pesati da $X(f)df$. Poiché in generale la $X(f)$ è complessa, essa può essere descritta mediante gli spettri di ampiezza e fase. La relazione che definisce la trasformata di Fourier non è diretta mente implementabile mediante un elaboratore digitale di segnale, sia perché essa richiede l’analisi di segnali continui, $x(t)$ e $X(f)$, sia perché l’integrale si estende all’infinito e richiederebbe dunque un numero infinito di dati da elaborare. Per poter effettuare tale trasformazione con un sistema digitale sono dunque necessarie tre operazioni fondamentali: il campionamento, il troncamento del segnale e la discretizzazione dell’asse delle frequenze. Ciascuna di queste operazioni può influenzare significativamente l’attendibilità del risultato dell’analisi.

Campionamento ideale

Il campionamento (sampling) di un segnale analogico $x(t)$ consiste nel prenderne solo i valori $x(iT_s)$ in corrispondenza a istanti ben precisi (iT_s) detti istanti di campionamento. Per esaminare le proprietà fondamentali è utile riferirsi al caso ideale in cui il campionamento è effettuato impiegando un treno di impulsi matematici. In tale ipotesi, sia $x(t)$ un generico segnale

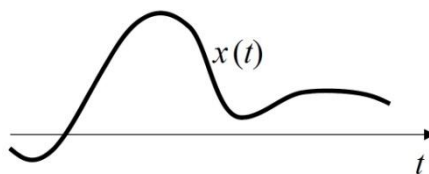


Fig. 4 – segnale generico $x(t)$

Sia inoltre $s(t)$ il treno di impulsi matematici di area unitaria (Fig.2.2), equispaziati dell'intervallo di campionamento T_s (e quindi con frequenza $f_s=1/T_s$).

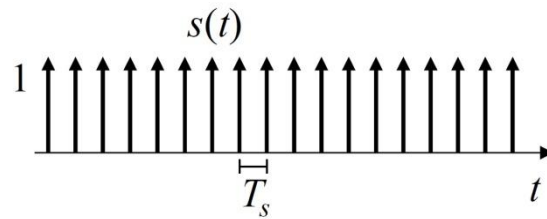


Fig. 5 – treno di impulsi equispaziati di periodo T_s

Il campionamento ideale consiste nel moltiplicare il segnale $x(t)$ per il treno di impulsi $s(t)$:

$$x_s(t) = x(t) \cdot s(t) = x(t) \cdot \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \delta(t - iT_s) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} x(iT_s) \cdot \delta(t - iT_s) \quad (\text{B.2})$$

Il segnale campionato (segnale tempo-discreto) $x_s(t)$ è mostrato in Fig. 2.4.

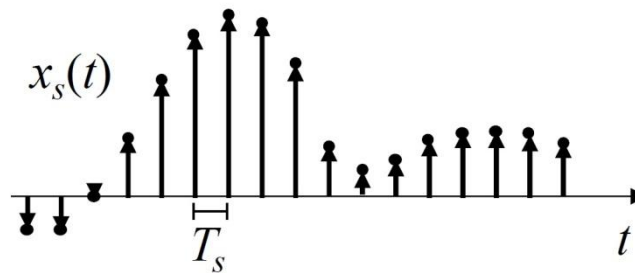


Fig. 6 – segnale generico $x_s(t)$

La condizione $f_s = 1/T_s \geq 2f_m$ riassume il ben noto teorema del campionamento. Se la frequenza di campionamento f_s è maggiore almeno del doppio della massima frequenza f_m contenuta nel segnale è possibile isolare lo spettro del segnale $X(f)$ in banda base e quindi ricostruire il segnale originario $x(t)$.

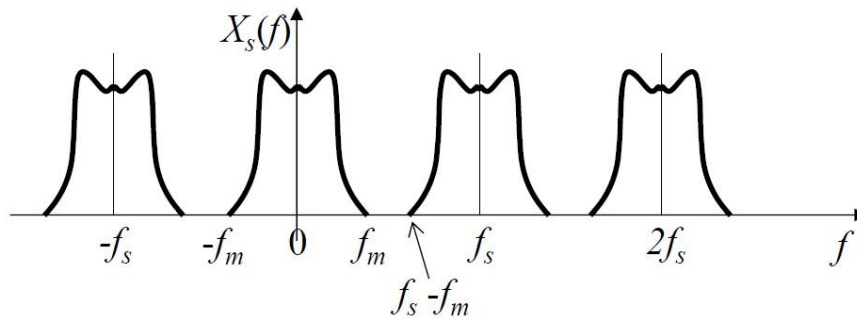


Fig. 7 - spettro del segnale $X(f)$

Troncamento del segnale

Si è già visto che l'analisi di Fourier si applica formalmente a segnali di durata infinitamente estesa e pertanto anche la sequenza dei campioni che rappresenta il segnale in forma discreta dovrà essere teoricamente di lunghezza infinita. Tale ipotesi non è ovviamente realizzabile nella pratica. In generale, con riferimento a un processo di campionamento reale, la sequenza dei campioni avrà necessariamente un inizio e una fine, e pertanto il numero dei campioni a disposizione sarà un numero finito. Per esaminare il problema è utile considerare il segnale di durata limitata come una porzione del segnale generico $x(t)$, prelevata attraverso una opportuna finestra temporale $w(t)$ (window), detta anche finestra di troncamento o di osservazione. L'effetto del troncamento sul segnale si può rappresentare nel seguente modo:

$$xw(t) = x(t) \cdot w(t) \quad (\text{B.3})$$

La trasformata di Fourier del segnale troncato risulta dalla convoluzione degli spettri:

$$Xw(f) = X(f) * W(f) \quad (\text{B.4})$$

La convoluzione della trasformata $X(f)$ del segnale con la trasformata $W(f)$ della finestra di troncamento introduce un nuovo tipo di distorsione, detta di dispersione spettrale (spectral leakage). In pratica se lo spettro del segnale originario $X(f)$ contiene delle transizioni nette, ad esempio componenti armoniche impulsive come nel caso di un segnale periodico nel tempo, tali transizioni vengono smussate e lo spettro del segnale periodico troncato si disperde in frequenza, tanto più quanto più è stretta la finestra di troncamento.

La finestra di troncamento più semplice è quella di tipo rettangolare, rappresentata in fig. 8 e definita dalla seguente relazione:

$$w(t) = \begin{cases} 1 & -\frac{T_w}{2} \leq t \leq \frac{T_w}{2} \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

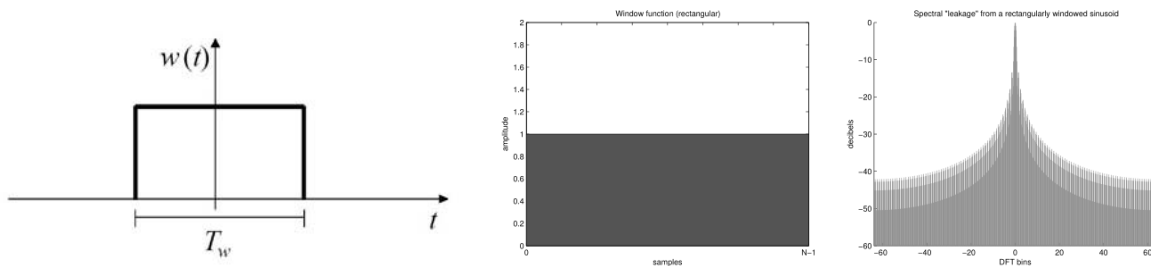


Fig. 8 – finestra rettangolare

In particolare l'andamento nel tempo della finestra di troncamento determina l'ampiezza dei lobi laterali della dispersione e risulta quindi direttamente responsabile della accuratezza con cui viene stimato lo spettro del segnale troncato. Per comprendere qualitativamente il ruolo di queste finestre, si deve osservare che i problemi dovuti a un campionamento si manifestano principalmente agli estremi dell'intervallo di osservazione, dove si osservano effetti di discontinuità, mentre nella parte centrale dei dati, riproduce fedelmente quello del segnale originario. Pertanto è ragionevole ipotizzare che se si potessero trascurare gli estremi e si potesse concentrare l'analisi sulla parte centrale si otterrebbe uno spettro in frequenza più corretto. Questa condizione si ottiene appunto con delle finestre particolari, che pesano diversamente i vari campioni, assumendo valore basso (o nullo) agli estremi e più elevato nelle porzioni centrali dell'intervallo di osservazione. Dal punto di vista matematico queste funzioni, che rispetto alla finestra rettangolare attenuano le discontinuità agli estremi, hanno uno spettro in frequenza più limitato, che consente quindi di ridurre i problemi prima menzionati. Sotto questo aspetto, concreti vantaggi possono essere ottenuti utilizzando finestre temporali non rettangolari, ma con transizione più graduale delle estremità (smoothing windows). Una di queste finestre è la “finestra di Hanning”.

Finestra di Hanning

Esistono diverse finestre, ciascuna delle quali si dimostra più adatta di altre in determinate situazioni. E' quindi opportuno conoscere a priori il tipo di segnale da analizzare, perché una erronea scelta delle finestre può aggravare la situazione piuttosto che migliorarla. La finestra più semplice e usata è quella di Hanning, che ha un andamento di tipo cosinusoidale (massimo al centro e nullo agli estremi) e la cui trasformata di Fourier ha un lobo unico, ma di larghezza doppia rispetto a quello della finestra rettangolare. Pertanto la risoluzione in frequenza peggiora, ma viene ridotto il contributo delle frequenze spurie.

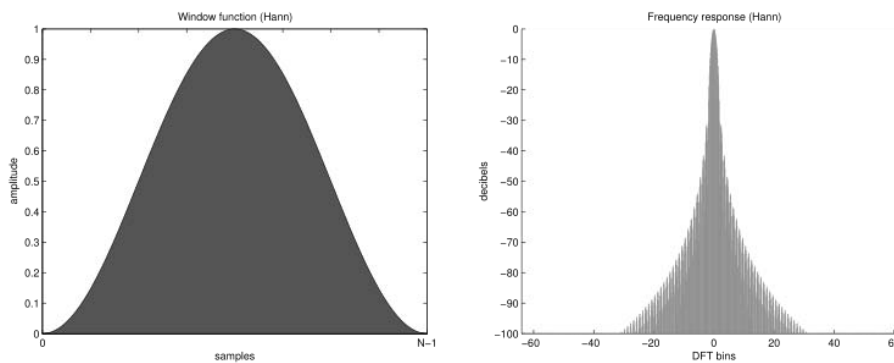


Fig. 9 – finestra di hanning

Un inconveniente della finestra di Hanning può derivare dal fatto che i suoi lobi sono arrotondati e non piatti nella parte centrale. Questo significa che se la componente da analizzare non è perfettamente centrata rispetto al lobo la sua ampiezza non viene misurata accuratamente. Per limitare questo problema sono state studiate finestre alternative, che però non saranno trattate in questa tesi.

Trasformata di Fourier

La FT è uno degli strumenti matematici maggiormente sfruttati nell'ambito delle scienze pure e applicate in quanto viene utilizzata per trasformare una funzione matematica o una distribuzione $x(t)$ definita nel dominio del tempo (spesso chiamata in questo ambito con il termine segnale) in una nuova funzione $X(f)$ il cui dominio è la frequenza. In questo modo però vengono perse totalmente le informazioni temporali del segnale (cioè so la frequenza che compone il segnale ma non so in che momento temporale si è verificata). Nel caso di funzioni periodiche, la FT può essere semplificata con il calcolo di un insieme discreto di ampiezze complesse, chiamati coefficienti della serie di Fourier.

La FT non può essere valutata per tutti i valori possibili della variabile continua f , perché questo significherebbe eseguire un numero infinito di volte i calcoli necessari per la sua implementazione. D'altra parte, dal punto di vista della conoscenza dell'informazione sullo spettro di un segnale campionato e troncato (quindi caratterizzato da N numeri) sarebbe strettamente sufficiente conoscere l'andamento dello spettro solo nell'intervallo di ripetizione in frequenza ($0 \div f_s$). La trasformata discreta di Fourier (DFT) consente di valutare il contenuto armonico in tale intervallo mediante un numero N di componenti discrete. Il passaggio a una rappresentazione discreta dello spettro risulta concettualmente semplice, osservando che la sequenza finita di N campioni nel tempo può essere considerata appartenente a una successione di sequenze di periodo $T_w = N T_s$ che si ripetono indefinitamente dando luogo a un segnale periodico con frequenza $f_w = 1 / T_w$. Lo spettro della sequenza di campioni replicata nel tempo con periodo T_w risulta allora uno spettro a righe, spaziate di $f_w = 1 / T_w$. Il valore f_w costituisce quindi la risoluzione in frequenza della DFT.

La DFT è quindi un particolare tipo di FT che converte una collezione finita di campioni equispaziati di una funzione in una collezione di coefficienti di una combinazione lineare di sinusoidi complesse, ordinate al crescere della frequenza.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-ik\frac{2\pi}{N}n} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad f_w = \frac{1}{T_w} = \frac{f_s}{N} \quad (\text{B.6})$$

Questa caratteristica rende la DFT ideale per l'elaborazione di informazioni su un elaboratore elettronico tipo l'elaborazione numerica dei segnali. la Trasformata di Fourier veloce (FFT) è uno degli algoritmi per calcolare in modo veloce ed efficiente la DFT. Infatti per calcolare la DFT si usa un numero di operazioni pari a $O(N^2)$ mentre per calcolare la FFT si impiegano un numero di operazioni pari a $O(N \log(N))$ ottenendo un risultato analogo. L'algoritmo FFT più diffuso è l'algoritmo di Cooley-Tukey. Questo algoritmo si basa sul principio di divide et impera, dividere e trasformare in due pezzi di $n/2$ ad ogni passo, ed è quindi ottimizzato solo per dimensioni che siano potenze di due, ma in generale può essere utilizzata qualsiasi fattorizzazione (com'era noto sia a Gauss che a Cooley e Tukey). Questi casi sono chiamati rispettivamente casi radice di 2 e radice mista (e le altre varianti hanno i propri nomi. Anche se l'idea di base è ricorsiva, la gran parte delle implementazioni tradizionali riorganizzano l'algoritmo per evitare la ricorsione esplicita.

Un'implementazione iterativa in C++ della FFT basata sull'algoritmo di Cooley-Tukey è la seguente:

```
#include <iostream>
#include <complex>
#define MAX 200

using namespace std;

int log2(int N){          //funzione per calcolare il logaritmo in base 2 di
un intero
    int k=N,i=0;

    while(k){
        k>>=1;
        i++;
    }
    return i-1;
}

int check(int n){         //usato per controllare se il numero di componenti
del vettore di input è una potenza di 2
    return n > 0 && (n & (n-1)) == 0;
}

int reverse(int N,int n){ //calcola il reverse number di ogni intero n
rispetto al numero massimo N
    int j,p=0;
    for(j=1;j<=log2(N);j++){
        if(n&(1<<(log2(N)-j)))
            p|=1<<(j-1);
    }
    return p;
}

void ordina(complex<double> *f1,int N){ //dispone gli elementi del vettore
ordinandoli per reverse order
    complex<double> f2[MAX];
    for(int i=0;i<N;i++)
        f2[i]=f1[reverse(N,i)];
    for(int j=0;j<N;j++)
        f1[j]=f2[j];
}

void transform(complex<double> *f,int N){ //calcola il vettore trasformato
    ordina(f,N); //dapprima lo ordina col reverse order
    complex<double> W[N/2]; //vettore degli zeri dell'unità. Prima N/2-
1 ma genera errore con ciclo for successivo in quanto prova a copiare in
una zona non allocata "W[N/2-1]"
    W[1]=polar(1.,-2.*M_PI/N);
    W[0]=1;
    for(int i=2;i<N/2;i++)
        W[i]=pow(W[1],i);
    int n=1;
    int a=N/2;
    for(int j=0;j<log2(N);j++){
        for(int i=0;i<N;i++){
            if(!(i&n)){
                /*ad ogni step di raddoppiamento di n,
vengono utilizzati gli indici */
```

```

n, una volta si e una no.*/
                                /*'i' presi alternativamente a gruppetti di
complex<double> temp=f[i];
complex<double> Temp=W[(i*a)%(n*a)]*f[i+n];
f[i]=temp+Temp;
f[i+n]=temp-Temp;
                                }
                                }
    n*=2;
    a=a/2;
}

void FFT(complex<double> *f,int N,double d){
    transform(f,N);
    for(int i=0;i<N;i++)
        f[i]*=d; //moltiplica il vettore per il passo in modo da
avere il vettore trasformato effettivo
}

int main(){
    int n;
    do{
        cout<<"specifica la dimensione del vettore,che sia potenza di
2"<<endl;
        cin>>n;
    }
    while(!check(n));
    double d;
    cout<<"inserisci la dimensione del passo di campionamento"<<endl;
    cin>>d;
    complex<double> vec[MAX];
    cout<<"inserisci il vettore di campionamento"<<endl;
    for(int i=0;i<n;i++){
        cout<<"inserisci la componente di indice "<<i<<endl;
        cin>>vec[i];
    }
    FFT(vec,n,d);
    cout<<"vettore trasformato"<<endl;
    for(int j=0;j<n;j++)
        cout<<vec[j]<<endl;
    return 0;
}

```

FFT e PSP

Il Power Spectrum di un segnale è la potenza contenuta in ogni frequenza che compone il segnale stesso. Per esempio, il rumore bianco, che contiene tutte le frequenze alla stessa potenza, ha un power spectrum avente tutti i picchi alle varie frequenze della stessa ampiezza.

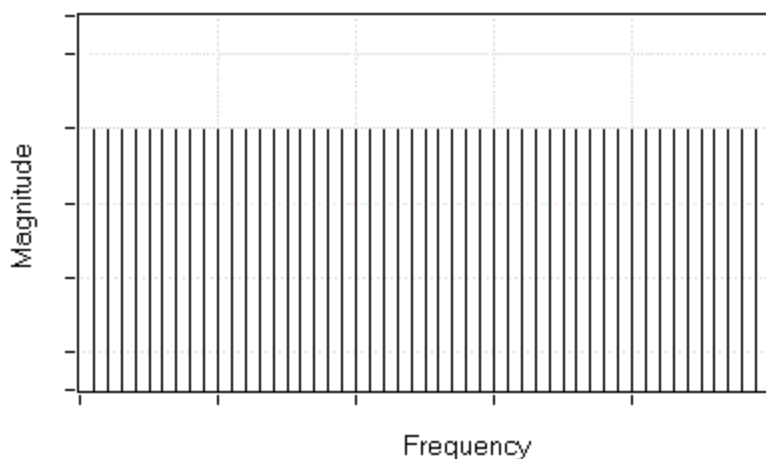


Fig. 10 – PSP del rumore bianco

Qui sotto viene riportata la formula per calcolare il PSP:

$$G_{xx}(f) = \frac{1}{N W_H} \sum_{k=1}^N [X_k^*(f) X_k(f)] \quad (\text{B.7})$$

Dove N è il numero di segmenti in cui il segnale viene diviso (nel nostro caso $N = 256$), W_H è una costante corrispondente alla finestra di Hanning, $X_k(f)$ è la DFT del k -esimo segmento del segnale x mentre $X_k^*(f)$ è il complesso coniugato della DFT.

Wavelet

Wavelet, analisi wavelet, e trasformata wavelet si riferiscono alla rappresentazione di un segnale mediante l'uso di una forma d'onda oscillante di lunghezza finita o a decadimento rapido (nota come wavelet madre). Questa forma d'onda è scalata e traslata per adattarsi al segnale in ingresso.

La parola wavelet, ondina, ha origine nei primi anni ottanta ed è dovuta a Morlet e Grossman che infatti usavano la parola francese ondelette - "piccola onda". Più tardi la parola venne convertita in inglese ottenendo wavelet. Le trasformate wavelet sono classificate a livello generale nella trasformata wavelet discreta (Discrete Wavelet Transform, DWT) e nella trasformata wavelet continua (Continuous Wavelet Transform, CWT). La differenza di principio fra le due è il fatto che la trasformata continua opera su tutte le possibili scale e traslazioni, mentre la trasformata discreta usa un sottoinsieme discreto di tutti i valori possibili.

In termini semplici, la wavelet madre $\psi(t)$ deve soddisfare:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(t) dt = 1, \text{ cioè } \psi \in L^2(\mathbb{R}) \text{ e possiede un'energia finita} \quad (\text{B.8})$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \text{ cioè a media nulla} \quad (\text{B.9})$$

Questo significa che la wavelet madre deve essere non nulla e avere una media nulla. Tecnicamente, la wavelet madre deve soddisfare un criterio di ammissibilità. In più una wavelet esiste solo in un intervallo finito $(-T, T)$ dove assume sia valori positivi che negativi (media nulla). Alcuni esempi di wavelet madre sono:

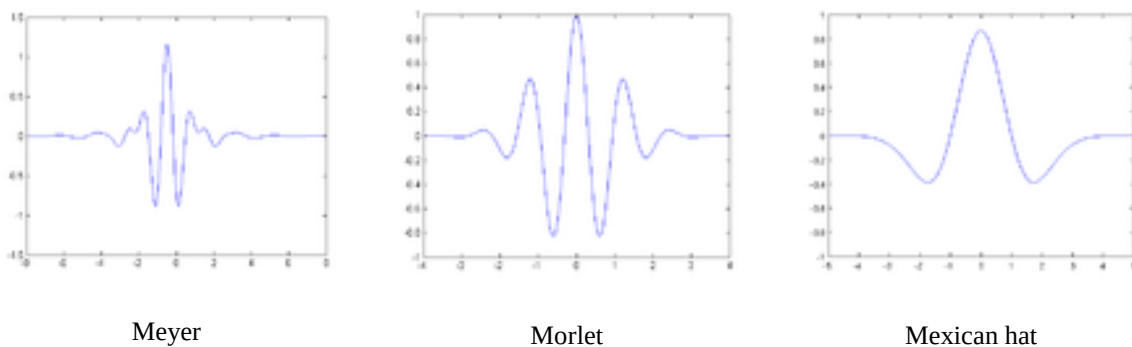


Fig. 11 – vari tipi di wavelet madre

La wavelet madre è scalata (o dilatata) di un fattore “a” e traslata (o mossa) di un fattore “b” per dare (nella formulazione originaria di Morlet):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{B.10})$$

Quindi la trasformata wavelet continua (CWT) è definita come integrale del segnale $s(t)$ moltiplicato per la wavelet scalata:

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{B.11})$$

Se la wavelet viene dilatata ($a \gg 1$) contiene prevalentemente basse frequenze e fornisce un'approssimazione globale del segnale

Se la wavelet è compressa ($a \ll 1$) contiene prevalentemente alte frequenze e dà un'immagine dettagliata su una piccola porzione del segnale $s(t)$.

Calcolare i coefficiente di una CWT per ogni possibile scala richiede uno sforzo computazionale molto elevato e produce una quantità elevata di dati spesso ridondanti. La Discrete Wavelet Transform è una wavelet che si basa su un sottoinsieme di scale: infatti se si scelgono scale e posizioni basate sulle potenze di 2 (scala diadica), l'analisi è molto efficiente e non perde accuratezza. Essa decompone il segnale in:

Approssimazioni: componenti di bassa frequenza (scala alta)

Dettagli: componenti di alta frequenza (scala bassa)

Ricavando, per filtraggio, due segnali (approssimazioni e dettagli) si raddoppia il numero di campioni. Si ricorre così al downsampling: per ogni segnale filtrato si mantiene solo un campione ogni due ma avendo su segnali si ottiene lo stesso numero totale di campioni.

Confronto con Fourier

La trasformata wavelet è spesso paragonata alla trasformata di Fourier, dove i segnali sono rappresentati come somma di sinusoidi. La differenza principale è che le wavelet sono localizzate sia nel tempo che nella frequenza mentre la trasformata di Fourier standard è localizzata solo in frequenza. La trasformata di Fourier a tempo breve (STFT) è localizzata in tempo e in frequenza, ma ci sono dei problemi di risoluzione e le wavelet spesso offrono una migliore rappresentazione del segnale grazie all'uso dell'analisi multirisoluzione.

La trasformata wavelet inoltre è anche meno complessa computazionalmente parlando, richiedendo un tempo $O(N)$ al contrario del tempo $O(N \log N)$ richiesto dalla trasformata di Fourier veloce (N indica la dimensione dei dati).

Bibliografia

- [1] O. Braun, J.-L. Kueny, F. Avellan, “Numerical Analysis of flow phenomena related to the unstable energy-discharge characteristic of a pump-turbine in pump mode”, *Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition*, Luglio 2005.
- [2] G. Pavesi, G. Cavazzini, G. Ardizzon, “Time-frequency characterization of the unsteady phenomena in a centrifugal pump”, *International journal of Heat and Fluid Flow*, October 2007.
- [3] G. Pavesi, G. Cavazzini, G. Ardizzon, “Time-frequency characterization of rotating instabilities in a centrifugal pump with a vaned diffuser”, *International journal of rotating machinery*, vol 2008, articolo ID 202179, Agosto 2008.
- [4] G. Pavesi, G. Cavazzini, G. Ardizzon, “Experimental characterization of a rotating instabilities in a centrifugal pump”, *Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*, Austria 2009.
- [5] G. Pavesi, G. Cavazzini, G. Ardizzon, “Pressure instabilities in a vaned centrifugal pump”, *Journal of power and Energy*, Agosto 2011
- [6] GS. Berten, Philippe Dupont, Laurent Fabre, M. Kayal, F. Avellan, M. Farhat, “Experimental investigation of flow instabilities and rotating stall in a high-energy centrifugal pump stage”, *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Agosto 2009.
- [7] J. Yang, G. Pavesi, G. Cavazzini, S. Q. Yuan, “Numerical characterization of pressure instabilities in a vaned centrifugal pump under part load condition”, Settembre 2013.
- [8] T. Staubli, C. Widmer, T. Tresch, M. Sallaberger, “Starting pump-turbine with unstable characteristic”.
- [9] M. Amelio, S. Bova, G. Florio, N.M. Scornaienchi, “Primi risultati del banco prova di pompe-turbine dell’università della Calabria”.
- [10] F. Mallamo, “le turbopompe”, Laurea a distanza in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino.

- [11] N. Krause, K. Zaharinger e E. Pap, “time-resolved particle image velocimetry for the investigation of rotating stall in a radial pump”, *Exp. Fluids*, 2005
- [12] M. Sinha, A. Pinarbasi e J. Katz, “the flow structure during onset and developed states of rotating stall within a vaned diffuser of a centrifugal pump”, *Journal of Fluids Eng.*, 2001
- [13] T. Sano, Y. Nakamura, Y. Yoshida e Y. Tsujimoto, “alternate blade stall and rotating stall in a vaned diffuser”, *JSME int. J.*, 2002
- [14] K.M. Guleren e A. Pinarbasi, “numerical simulation of the stalled flow within a vaned centrifugal pump”, *Journal of Meccanical Engineering Science* ,2004
- [15] T. Sano, Y. Nakamura, Y. Yoshida, Y. Tsujimoto e T.Matsushima, “numerical study of rotating stall in a pump vaned diffuser”, *Journal of Fluids Eng.* ,2002
- [16] F. Mallamo, “Macchine idrauliche”, Laurea a distanza in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino.
- [17] M. Farge, “Wavelet transforms and their application to turbulence”, *Annual review of fluid mechanics*, 1992.
- [18] H. Li, “Identification of coherent structure in a turbulent shear flow with wavelet correlation analysis”, *Journal of Fluids Eng.*, 1998.

Ringraziamenti

Al termine di questa esperienza universitaria, sento l'esigenza di ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine. In modi e tempi diversi, queste persone hanno condiviso con me tempo, esperienze ed emozioni e per questo voglio dedicargli le ultime pagine di questa tesi.

In anzi tutto vorrei ringraziare la miei genitori e mio fratello che con il loro supporto (non solo quello economico) mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Vorrei ringraziare i miei compagni di corso pier, teo, marta, elena, spadino, erika, mary, anna, simone, mauro, roby (volutamente ho scritto i vostri soprannomi) perche sono stati indispensabili in questi anni. Non ce l'avrei fatta senza gli appunti di qualcuno (vero pier?) ma soprattutto non ce l'avrei mai fatta senza la vostra compagnia: sapere di trovarvi a lezione in questi anni mi ha aiutato ad affrontare anche i corsi più difficili e quelli più noiosi. La vostra importanza mi è stata ancora più chiara in questo ultimo anno in cui dovevo solo studiare e preparare esami: credo sia stato l'anno più difficile della mia carriera universitaria. Quindi vi ringrazio ancora di aver condiviso con me questi anni, di avermi sopportato e di essermi stati vicini: vi auguro un bellissimo futuro.

Vorrei ringraziare la mia ragazza, Giulia. Perché se il rapporto uomo-donna è difficile, il rapporto ingegnere-psicologa lo è ancora di più. Soprattutto in periodo esami. La ringrazio perché mi ha sempre sostenuto e nonostante tutto è ancora al mio fianco.

Vorrei ringraziare tutti gli amici vari che mi hanno sopportato e mi hanno perdonato le sparizioni in periodo esami. Perché le amicizie vere sono quelle che rimangono nel tempo anche quando non ci si vede spesso.

Vorrei ringraziare il prof. G. Pavesi e la dottoranda J. Yang che mi hanno accompagnato in questa tesi. Con la loro competenza e professionalità sono riusciti a guidarmi in questa esperienza: spero che i risultati ottenuti siano d'aiuto al lavoro di entrambi.

E per finire vorrei ringraziare un ultima persona. C'è chi ci crede e chi no, chi non l'ha mai sentito e chi invece lotta con il frastuono di tutti i giorni per sentire la sua voce. Vorrei ringraziarlo per i doni che mi ha fatto in questi anni e per la sua vicinanza. Grazie.