
**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
-Sede di Forlì-

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA in
MACCHINE:

**Selezione di trasduttori per la misura di portata
fluidi nei motori a combustione interna**

Candidato:
Giacomo Giunchi

Relatore:
Prof. Enrico Corti

Anno Accademico 2014-2015
Sessione III

INDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUZIONE | 2 |
| 1. GENERALITA' | 3 |
| 2. MISURE DI FLUSSO | 4 |
| 2.1 Misure di portata dalla velocità locale | 4 |
| 2.2 Misure di portata volumetriche | 7 |
| 3. PORTATE DI INTERESSE | 27 |
| 4. ANALISI E SCELTA DEL MISURATORE | 30 |
| 5. TEORIA SUGLI ULTRASUONI | 41 |
| 6. REALIZZAZIONE DEL MISURATORE | 52 |
| 7. ALLESTIMENTO BANCO PROVA | 62 |
| 8. MISURE | 66 |
| 8.1 Tipi di misura | 66 |
| 8.2 Sistemi di acquisizione | 70 |
| 9. ANALISI DEI DATI | 74 |
| 9.1 Liquidi | 74 |
| 9.2 Aeriformi | 81 |
| 10. CONCLUSIONI | 90 |
| BIBLIOGRAFIA | 94 |
| RINGRAZIAMENTI | 95 |

INTRODUZIONE

Obiettivo di questa tesi è dimostrare se è possibile realizzare una serie di misuratori di portata, principalmente per la strumentazione di banchi prova motori, mantenendo bassi i costi a fronte di una buona accuratezza di misura.

In particolare, dopo una analisi di mercato, si vuole rispondere alla domanda:

data l'economicità dei componenti elettronici, per raggiungere prezzi di vendita di varie migliaia di euro, è necessario un know how o tecnologie speciali oppure è possibile percorrere una strada alternativa?

Sia in caso di risposta affermativa che in caso di risposta negativa, si produrranno delle conseguenze. Nel primo caso ad esempio si può pensare di fornire nuove tecnologie ad aziende o laboratori di ricerca, oppure, proseguendo con il lavoro di ricerca, produrre un nuovo misuratore che sia competitivo sul mercato e che potenzialmente possa modificarne gli equilibri. Nel secondo caso si ha un'idea più chiara sulle misure di portata e sullo stato dell'arte degli strumenti, oltre che un approfondimento sulle loro prestazioni e possibilmente su come utilizzarli per altri scopi.

Quel che è certo è che il campo delle misure di portata, nell'automotive così come in tanti altri settori merceologici, è di grande interesse e possiede forti possibilità di crescita. Si pensi ad esempio al nuovo regolamento tecnico di Formula 1, introdotto nel 2014, che impone un limite di consumo istantaneo di combustibile. È chiaro che misurare con precisione la portata del combustibile è un aspetto importante

nell'ottimizzazione delle prestazioni di un propulsore o, in ultima analisi, potrebbe garantire un vantaggio illecito nel caso di misuratori a bassa accuratezza (più è ampio lo scostamento dal valore reale più un team può eccedere nei consumi).

1. GENERALITA'

Le misure di portata e di velocità rivestono grande importanza nel campo scientifico industriale ed economico.

Il numero e la tipologia degli strumenti di misura sul mercato è estremamente vario, tenuto conto delle diverse caratteristiche fisiche, del fluido oggetto della misura (fluido comprimibile o incompressibile), della distribuzione del campo di velocità (flusso laminare o turbolento), del tipo di moto (regime subsonico, sonico, supersonico), delle caratteristiche metrologiche richieste (accuratezza, ripetibilità, risposta in frequenza, range di misura, ecc.) e del costo.

Il metodo più immediato per la misura di una portata è basato sulla stessa definizione e consiste nel misurare la massa o il volume di un fluido che fluisce in moto stazionario in un determinato intervallo di tempo. Tale metodo, lento e laborioso, non ha applicazioni industriali. Una seconda possibilità consiste nel determinare la velocità locale del fluido in vari punti per poi risalire al valore di portata, nota la sezione di passaggio della condotta nella quale scorre la corrente fluida. Una terza possibilità riguarda strumenti che indicano come output un valore proporzionale alla portata e questi vengono largamente utilizzati in campo industriale per il controllo dello stato di funzionamento degli impianti.

Di seguito si tratteranno sistemi appartenenti alla seconda ed alla terza possibilità descritta.

2. MISURE DI FLUSSO

2.1. MISURE DI PORTATA DALLA VELOCITA' LOCALE

- TUBO DI PITOT:

E' un sensore che consente di determinare la velocità attraverso la misura di due pressioni.

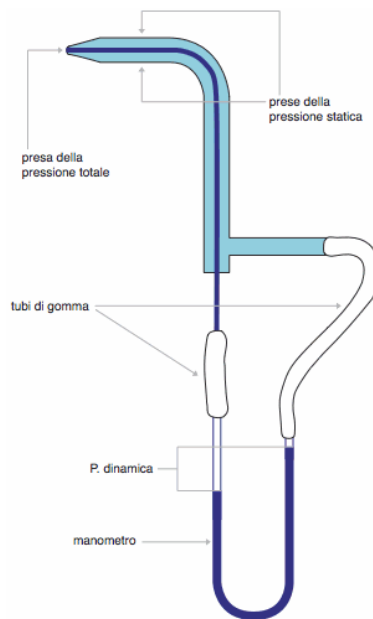


Figura 1: Tubo di Pitot

Considerando un flusso monodimensionale stazionario di un fluido incompressibile e non viscoso possiamo ricavare la nota relazione:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_{tot} - p_{stat})}{\rho}} \quad (1)$$

v = velocità del flusso; p_{tot} = pressione totale; p_{stat} = pressione statica; ρ = densità del fluido

In un tubo di Pitot si possono verificare deviazioni dal risultato teorico dell'equazione(1), a causa di diversi fattori. Se ρ fosse noto in modo

accurato, gli errori potrebbero essere ricondotti a misure non accurate delle pressioni. Di solito risulta più difficile la misura della pressione statica. La differenza tra il valore della pressione vera e quella misurata può essere dovuto alle seguenti motivazioni:

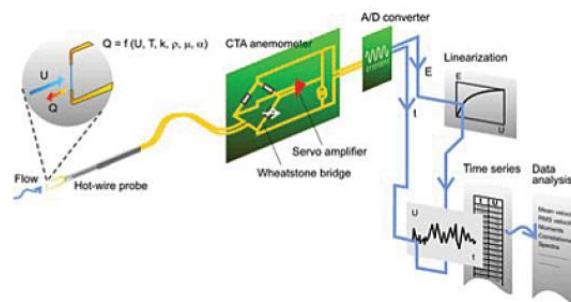
a) disallineamento dell'asse del tubo col vettore velocità. Ciò espone le prese statiche anche a una componente dovuta alla velocità.

b) Le linee di flusso prossime al tubo devono essere più dense e lunghe di quelle del flusso indisturbato. Ciò comporta un aumento di velocità. Questo evento è accompagnato da una diminuzione della pressione statica.

c) Influenza del ristagno in corrispondenza del bordo d'attacco del supporto del tubo. Questo incremento di pressione comporta che anche la pressione statica a monte del bordo d'attacco del supporto risulti più elevata. Se le prese statiche saranno troppo vicine al supporto la misura risulterà più elevata.

Tuttavia gli errori b e c tendono a compensarsi in un punto per continuità della pressione.

- ANEMOMETRO A FILO CALDO:



L'anemometro a filo caldo consente la misura del modulo della velocità di un fluido attraverso la determinazione dello scambio termico

convettivo tra un filo, riscaldato elettricamente, e il fluido in moto. L'elemento sensibile, un piccolissimo filo metallico teso tra due supporti della sonda, ha dimensioni sufficientemente contenute, tali da non produrre apprezzabili perturbazioni alla corrente fluida e da assicurare una buona risoluzione spaziale della misura.

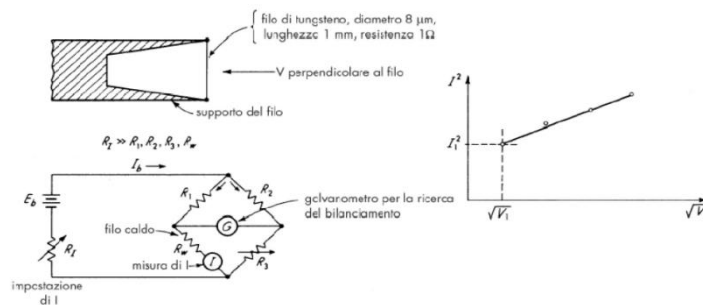


Figura 2: Anemometro a filo caldo

L'anemometro a filo caldo, nella versione a temperatura costante, è caratterizzato da una buona risoluzione temporale e, pertanto, viene impiegato principalmente per la misura puntuale della velocità in campi di moto turbolenti.

Alcune limitazioni sono intrinseche alla struttura della sonda e al principio stesso di operare:

- a) il processo di scambio termico dipende non solo dalla velocità del fluido, ma anche dalla differenza di temperatura tra filo e gas, dalle proprietà fisiche del fluido, dalle dimensioni e proprietà fisiche del filo;
- b) il filo risulta fragile e soggetto a contaminazioni delle eventuali impurità del fluido;
- c) la misura, essendo basata su quella di una grandezza scalare come lo scambio termico, non può fornire informazioni dirette sulle caratteristiche vettoriali della velocità;

d) la necessità di mantenere il filo ad una temperatura maggiore di quella del fluido rende la sonda inapplicabile in ambienti ad alta temperatura;

e) la sonda non è utilizzabile in fluidi bifase per la difficoltà, in questo caso, di ricavare univocamente la velocità dalla misura dello scambio termico.

In condizioni di equilibrio possiamo scrivere l'equazione di bilancio energetico per il filo come:

$$I^2 R_w = hA(T_w - T_f) \quad (2)$$

I = corrente nel filamento; R_w = resistenza nel filo; T_w = temperatura del filo; T_f = temperatura del fluido; h = coefficiente di scambio termico del filo; A = area di scambio termico.

La dipendenza dalla velocità è racchiusa nel coefficiente di scambio termico che è esprimibile attraverso il numero adimensionale di Nusselt, Nu , il quale a sua volta dipende dalle caratteristiche del filo e del fluido attraverso un gran numero di parametri geometrici e fisici: $Nu = f[Re, Pr, T_w, T_f, L, d, \alpha]$ ove Re rappresenta il numero di Reynolds, Pr il numero di Prandtl, L la lunghezza del filo, d il diametro del filo e α l'angolo tra la direzione del moto e l'asse del filo.

2.2. MISURE DI PORTATE VOLUMETRICHE

- MISURATORI A OSTRUZIONE:

Uno dei principi più usati per la misura di portata; fa uso di una restrizione della superficie di efflusso, nella condotta che trasporta il

fluido. Questo restringimento causa nel flusso una caduta di pressione che è proporzionale alla portata.

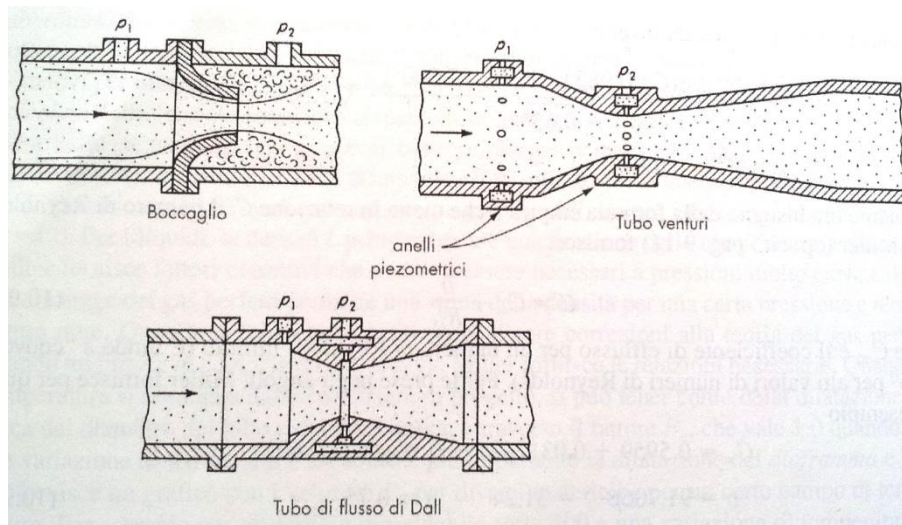


Figura 3: Misuratori ad ostruzione (Venturi)

Diaframma, boccagli, tubi di venturi e tubi di flusso di Dall funzionano tutti sullo stesso principio e sono descritti da equazioni del tipo:

$$G = \frac{C_d \cdot A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3)$$

Nel caso si trattino fluidi incompressibili e dove G = portata volumetrica; A_2, A_1 = sezioni nelle quali vengono misurate le pressioni rispettivamente a valle e a monte della restrizione; p_1, p_2 = pressioni nelle sezioni A_1 e A_2 ; ρ = densità del fluido; C_d = coefficiente di efflusso del tubo o dell'accidentalità.

Per fluidi comprimibili l'espressione è differente in quanto la densità del fluido cambia dalla sezione 1 alla sezione 2, ma il principio alla base è il medesimo e questi misuratori per fluidi comprimibili si descrivono con l'equazione:

$$G = \frac{\pi D^4}{128 \mu L} \Delta p \quad (4)$$

Ove G = portata volumetrica; D = diametro della condotta; μ = viscosità del fluido; L = lunghezza del tubo fra le prese di pressione; Δp = perdita di carico.

A causa delle variazioni di area del flusso meno repentine, i boccagli e i tubi venturi hanno coefficienti di efflusso maggiori dei diaframmi, fino ad un massimo di 0,99. I venturi possono avere una perdita di carico permanente molto bassa, quindi sono di gran lunga i preferiti in situazioni con elevate portate potendo ottenere grossi risparmi nei costi di pompaggio.

I boccagli sono più costosi dei diaframmi, ma più economici dei venturi e vengono spesso usati per flussi di vapore ad alta velocità, essendo dimensionalmente più stabili alle alte temperature e velocità rispetto ai diaframmi. Per fare un confronto imparziale tra i vari misuratori ad ostruzione, dobbiamo mantenere costante l'accuratezza del sistema di misura della pressione, il che richiede che la differenza di pressione sia la stessa per tutti i misuratori.

I diaframmi, i boccagli e i venturi possono essere costruiti "in casa" (vedi in Bibliografia [3]) o possono essere acquistati come modelli standard o speciali da diversi fornitori. I produttori di trasduttori di pressione differenziale costruiscono anche misuratori di portata completi.

- ROTAMETRI:

Un rotametro è composto da un tubo verticale di forma conica, in cui un galleggiante assume una determinata posizione lungo la direzione verticale, corrispondente a una determinata portata che percorre il tubo.

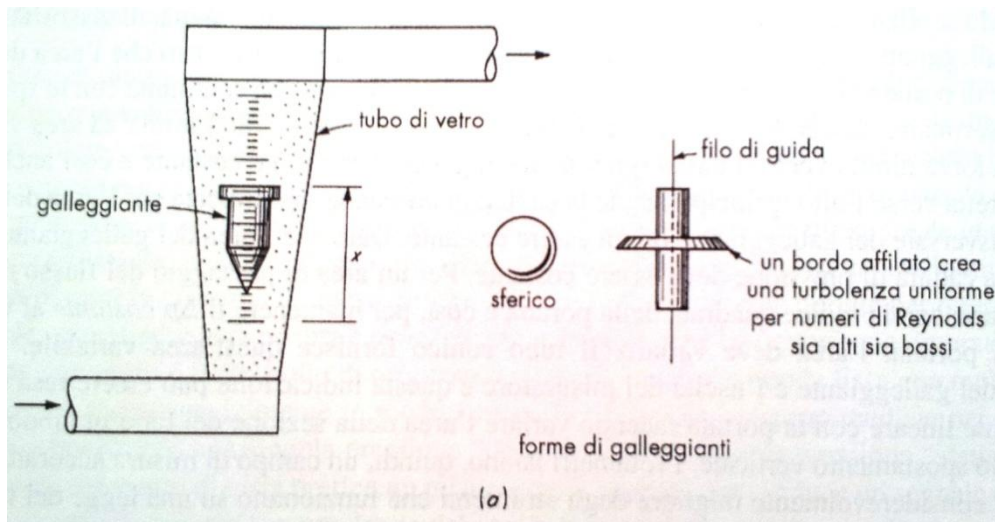


Figura 4: Rotametro

Per una data portata il galleggiante rimane in equilibrio quando si bilanciano le forze verticali di pressione differenziale, di gravità, di viscosità e la forza di galleggiamento. L'equilibrio si mantiene senza interventi esterni, dato che l'area del misuratore di portata (area anulare tra galleggiante e tubo) varia con continuità con lo spostamento verticale; quindi, lo strumento può essere pensato come un diaframma ad area variabile. La forza diretta verso il basso (gravità meno galleggiamento) è costante e così anche la forza diretta verso l'alto (principalmente la caduta di pressione moltiplicata per l'area della sezione trasversale del galleggiante) dovrà essere costante. Dato che l'area del galleggiante è costante, allora anche la caduta di pressione dovrà essere costante. Per un'area di passaggio del flusso fissata, Δp varia con la radice quadrata della portata e così, per mantenere il Δp costante al variare della portata, l'area deve variare. La conicità del tubo fornisce quest'aria variabile. La posizione verticale del galleggiante è l'uscita del misuratore e questa può essere resa lineare con la portata facendo variare l'area della sezione del tubo in modo lineare con lo spostamento verticale. L'accuratezza è solitamente del 2% del fondo

scala (1% se tarato) con una ripetibilità di circa lo 0,25% della lettura. Se si considera un fluido incomprimibile e il modello semplificato sopra descritto, si può ottenere questo risultato:

$$Q = \frac{C_d(A_t - A_f)}{\sqrt{1 - [(A_t - A_f)/A_t]^2}} \sqrt{2gV_f \frac{w_f - w_{ff}}{A_f w_{ff}}} \quad (5)$$

Dove Q=portata volumetrica; Cd=coefficiente di efflusso; At=area del tubo; Af=area del galleggiante; g=accelerazione di gravità; Vf=volume del galleggiante; wf=denistà del mariale del galleggiante; wff=densità del fluido.

- MISURATORI A TURBINA:

se si inserisce una turbina in un tubo contenente un fluido in movimento, la velocità di rotazione del rotore nella turbina dipenderà dalla portata di fluido. Riducendo l'attrito dei cuscinetti e riducendo le altre perdite al minimo, si può progettare una turbina la cui velocità vari linearmente con la portata; quindi una misura di velocità permette una misura indiretta di portata. La velocità si può misurare molto semplicemente e con buona accuratezza misurando la frequenza con la quale una paletta passa per un determinato punto dello statore, utilizzando un dispositivo magnetico di prossimità, per produrre impulsi di tensione. Passando questi impulsi di tensione ad un misuratore di impulsi si può ricavare la portata; inoltre accumulando il numero totale di impulsi in un determinato intervallo di tempo si può misurare il flusso totale.

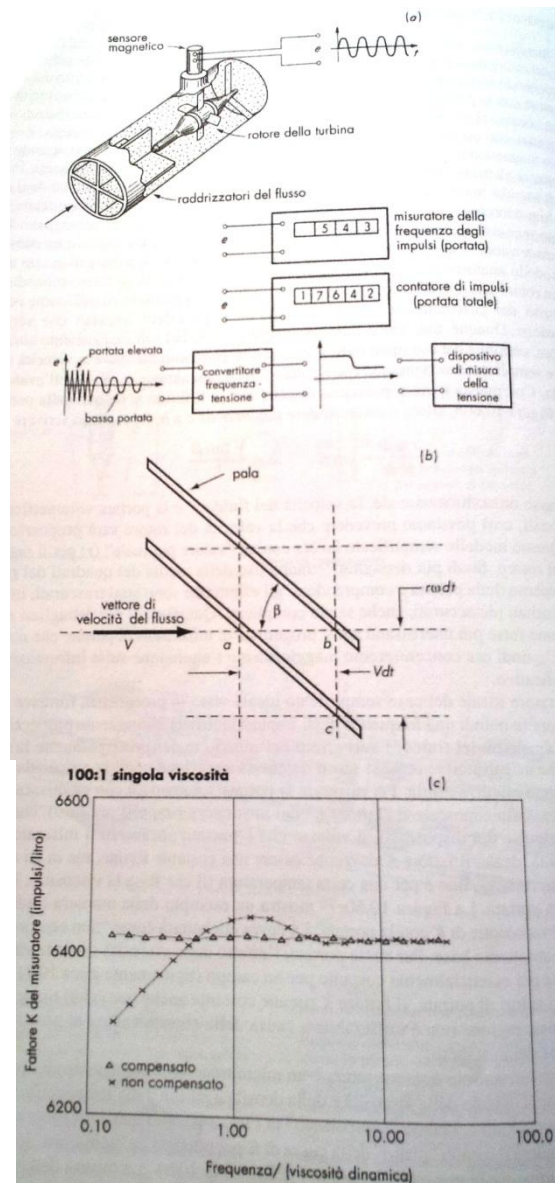


Figura 5: Misuratore a turbina

Il modello analitico più semplice di questo misuratore ipotizza un flusso monodimensionale e un rotore che non dia coppie, il cui effetto è quello di produrre ritardi, come per esempio l'attrito dei cuscinetti, la viscosità del fluido o gli effetti inerziali che sorgono in accelerazione. Dunque, dato che nel modello considerato il fluido non avverte nulla nell'attraversare il misuratore, è possibile calcolare la velocità di rotazione del rotore immaginando che esso scivoli lateralmente a causa

dell'avanzamento rettilineo del fluido. Su questa ipotesi allora si può dire che, come da figura, se il fluido si muove da a a b allora il rotore si deve muovere da c a b e si può scrivere:

$$\frac{r\omega dt}{v dt} = \tan(\alpha) \Rightarrow \omega = \frac{v \tan(\alpha)}{r} \quad (6)$$

Per un flusso monodimensionale, la velocità del fluido V e la velocità di rotazione ω sono proporzionali, così possiamo prevedere che la velocità di rotazione lo sia anche con la portata. Questo modello approssimato lavora con un valore “puntuale” per il raggio delle palette del rotore. Studi più dettagliati fanno uso della media dei quadrati del raggio interno ed esterno della paletta e comprendono gli effetti che sono stati trascurati, in modo da ottenere risultati più accurati.

I vari effetti trascurati, principalmente la viscosità, fanno sì che un misuratore reale si scosti da questa astrazione perfetta e richieda una taratura per avere effettiva utilità. Per misurare la portata con un misuratore a turbina è necessario conoscere il fattore K della turbina, ovvero gli impulsi per litro, che fornisce, per ogni impulso del dispositivo, il volume che è passato attraverso il misuratore. Da un punto di vista ideale il fattore K dovrebbe essere costante, ma in un misuratore reale, per un certo liquido e per una certa temperatura, il fattore K varia con la portata. Sperimentalmente si nota che questo fattore diventa costante per portate più elevate, quindi si definisce un range di utilizzo del misuratore. Il limite superiore della zona di costanza del fattore K è dato dall'eccessiva caduta di pressione fra monte e valle del misuratore e dall'aumento delle perdite per attrito nei cuscinetti. Tuttavia sono note varie soluzioni di compensazione che consente di estendere il range di misurazione anche a portate più basse, come ad esempio costruire un misuratore a doppio rotore

oppure inserendo un sensore di temperatura e un microprocessore che consenta di calcolare accuratamente la densità e viscosità del fluido. In commercio sono disponibili misuratori a turbina con fondo scala da $45\text{cm}^3/\text{min}$ a $136\text{cm}^3/\text{min}$ per liquidi e da $238\text{cm}^3/\text{min}$ a $424\text{cm}^3/\text{min}$ per l'aria. La non linearità nel campo di utilizzo può raggiungere lo 0,05% nei modelli più grandi.

- MISURATORI DI PORTATA ELETTROMAGNETICI:

I misuratori elettromagnetici sono una applicazione del principio di induzione. Se un conduttore di lunghezza l si muove con una velocità trasversale v attraverso un campo magnetico di intensità B , verranno prodotte delle forze sulle particelle cariche del conduttore, che muoveranno le cariche positive verso una estremità del conduttore e le particelle negative verso l'altro capo.

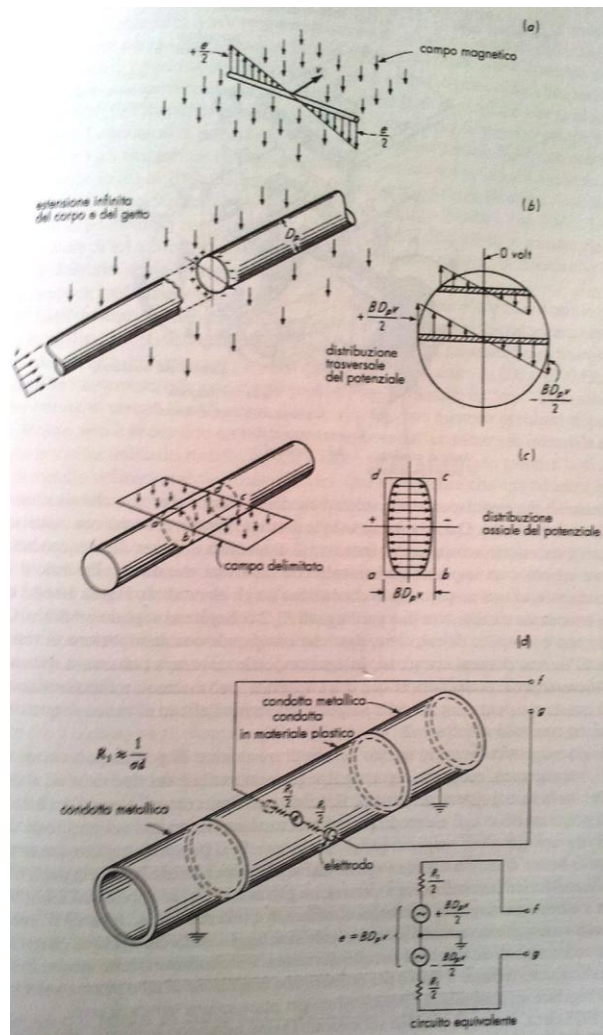


Figura 6: Misuratore a effetto elettromagnetico

Quindi si viene a creare un gradiente di potenziale attraverso il conduttore e ci sarà una differenza di potenziale E tra le due estremità. La relazione quantitativa tra le variabili è data dalla ben nota equazione:

$$E = Blv \quad (7)$$

dove l è la lunghezza del conduttore.

Collegando le estremità del conduttore ad un circuito esterno la tensione indotta produrrà su esso un flusso di corrente i . Questo flusso di corrente attraverso il conduttore mobile causa una caduta di

potenziale iR , cosicché la tensione ai terminali del conduttore mobile diventa $E-iR$.

Ora si consideri un flusso cilindrico di fluido conduttore con un profilo di velocità uniforme, che attraversa un campo magnetico. In un liquido conduttore, gli ioni positivi e negativi vengono spostati ai lati opposti del getto, formando una distribuzione di potenziale come in figura. La massima differenza di potenziale si trova ai capi di un diametro orizzontale e vale BDv . In un caso reale il campo magnetico è di estensione limitata, quindi non viene indotta nessuna tensione nella parte del getto che risulta esterna al campo. Dal momento che anche questa parte di fluido è comunque un conduttore, tende in qualche misura a cortocircuitare le tensioni indotte nella sezione esposta al campo; quindi, la tensione risulta ridotta rispetto al valore BDv . Se il campo magnetico è sufficientemente lungo, questo effetto sarà piccolo al centro della lunghezza della zona interessata dal campo magnetico. Una lunghezza di circa tre diametri di solito è sufficiente.

In un misuratore reale il “getto” è contenuto all'interno di una tubatura con flusso stazionario. La condotta deve essere non magnetica per permettere al campo magnetico di attraversare il fluido. Inoltre normalmente questa è realizzata in materiale non conduttore, esempio plastica, così da non fornire un cammino di cortocircuito tra i potenziali indotti sulla superficie del fluido. Questa condotta ha due elettrodi posti nei punti in cui si ha la massima differenza di potenziale. Questi elettrodi forniscono un segnale in tensione a un apparato esterno di lettura o di registrazione. È stato dimostrato matematicamente che E corrisponde alla velocità media di qualsiasi profilo che sia simmetrico rispetto al centro del tubo. Dato che non è possibile costruire un'intera condotta di materiale non conduttore, è necessario accoppiare un tratto corto di

tubatura in materiale non conduttore (il misuratore stesso) a un impianto tradizionale con tubazioni metalliche. Essendo il fluido stesso un conduttore ci sarà un percorso di conduzione tra gli elettrodi.

Tra i vantaggi generali di misuratori di portata elettromagnetici ci sono: l'assenza di qualsiasi ostruzione del flusso; la capacità di misurare flussi inversi; insensibilità alla viscosità, densità e disturbi nel flusso purchè il profilo di velocità si mantenga simmetrico; un vasto campo lineare; una risposta veloce alle variazioni di portata.

- MISURATORI DI FLUSSO ULTRASONICI:

i disturbi di pressione di piccola entità si propagano in un fluido con una determinata velocità (la velocità del suono) dipendente dal fluido. Se il fluido è anche caratterizzato da una velocità, allora la velocità assoluta della propagazione del disturbo di pressione è la somma algebrica delle due. Poiché l'entità della portata dipende dalla velocità del flusso, questo effetto può essere utilizzato in svariati modi come principio operativo dei misuratori di flusso ultrasonici. Il termine ultrasonico si riferisce al fatto che, nella pratica, i disturbi di pressione sono usualmente brevi treni di onde sinusoidali la cui frequenza è superiore al campo udibile dell'orecchio umano, che arriva fino a circa 20000 Hz. I due principali metodi (tempo di volo e doppler) per impiegare il principio sopra citato dipendono dall'esistenza di emettitori e ricevitori di energia acustica. Un approccio comune è quello di utilizzare trasduttori a cristalli piezoelettrici per entrambe le funzioni. In un trasmettitore viene data in ingresso al cristallo energia elettrica sotto forma di impulsi di tensione ad alta frequenza, che mettono in vibrazione il cristallo.

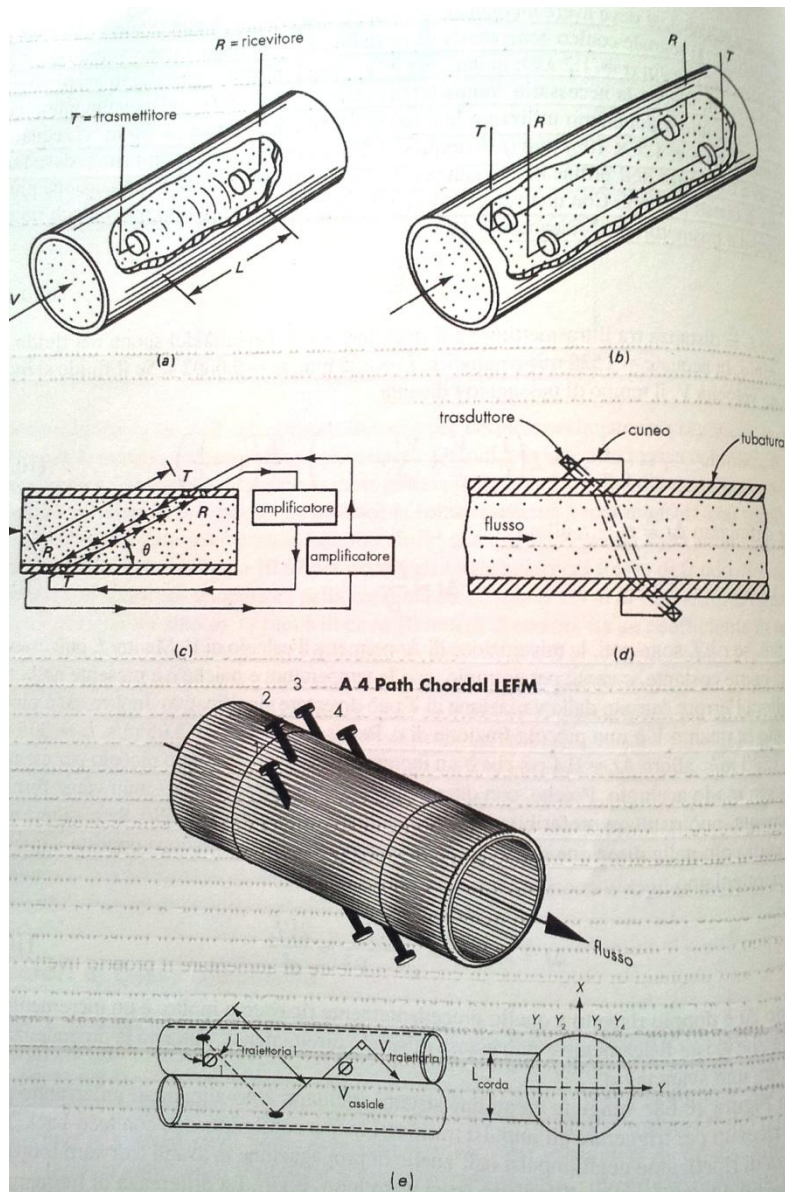


Figura 7: Misuratore ultrasonico

Se il cristallo è in contatto col fluido, la vibrazione verrà comunicata al fluido e si propagherà attraverso di esso. Il cristallo ricevitore è esposto a queste fluttuazioni e risponde vibrando. Queste vibrazioni producono un segnale elettrico ad esse proporzionale. La necessità di avere un campo acustico sufficientemente stretto e ben definito, giustifica l'utilizzo di frequenze elevate. Per un cristallo che deve risultare un efficiente trasmettitore di energia acustica, si deve avere un diametro D

grande rispetto alla lunghezza d'onda λ dell'oscillatore. Il segnale conico generato da un cristallo circolare ha un mezzo angolo del cono, detto α , dato da $\sin\alpha=1.2 \lambda/D$; quindi, per avere angoli piccoli è necessario avere un rapporto λ/D piccolo. Poiché la necessaria compattezza richiede valori D ragionevolmente piccoli ($\approx 1\text{cm}$), allora occorre utilizzare lunghezze d'onda dell'ordine di 1mm. L'acqua, per esempio, ha $\lambda=1.5 \times 10^6/f$ mm (f =frequenza in Hz) e quindi risulta chiaro che si deve far ricorso a frequenze nell'ordine del MegaHertz. La figura mostra l'applicazione di questi principi. Con una velocità di flusso nulla il tempo di passaggio t_0 degli impulsi diretti dal trasmettitore al ricevitore è dato da $t_0 = \frac{L}{c}$ (8)

dove L =distanza tra il trasmettitore e il ricevitore e c =velocità del suono nel fluido.

Per esempio in acqua $c \approx 1430\text{m/s}$, al una distanza $L=305\text{mm}$ il $\Delta t=0,0002$ s.

Se il fluido si muove a una velocità v , il tempo di passaggio t diventa:

$$t = \frac{L}{c+v} = L \left(\frac{1}{c} - \frac{v}{c^2} + \frac{v^2}{c^3} - \dots \right) \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{v}{c} \right) \quad (9)$$

Quindi, se c e L sono noti, la misurazione del Δt permette il calcolo di v .

Mentre L può essere assunta come costante, c varia, per esempio, con la temperatura e poiché c è presente nella forma c^2 , allora l'errore causato dalla variazione di temperatura può diventare significativo. Inoltre, Δt è piuttosto piccolo in quanto v è una piccola frazione di c . per esempio, se $v=3.05$ m/s, $L=305\text{mm}$ e $c=1520$ m/s, allora $\Delta t=0.4\mu\text{s}$ che è un incremento temporale troppo piccolo per essere misurato in modo accurato. Poiché, con questo schema, la misurazione di t_0 non viene

fornita direttamente, può risultare preferibile la modifica illustrata nel disegno b) della figura.

Se t_1 rappresenta il tempo di volo nella direzione del flusso e t_2 il tempo di volo in direzione opposta a quella del flusso, otteniamo:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2vL}{c^2 - v^2} \approx \frac{2vL}{c} \quad (10)$$

Questo Δt è doppio rispetto al precedente e inoltre è un incremento di tempo che esiste fisicamente e può essere misurato direttamente. Tuttavia la dipendenza da c è ancora uno svantaggio.

Nel disegno c) della figura vengono creati due sistemi oscillanti auto-alimentati utilizzando gli impulsi ricevuti per triggerare gli impulsi trasmessi in una configurazione con feedback. La frequenza di ripetizione degli impulsi nell'anello di propagazione in avanti (forward loop) è $1/t_1$, mentre quella nell'anello all'indietro (backward loop) è $1/t_2$. La differenza di frequenza è $\Delta f = 1/t_1 - 1/t_2 = 2v \cos \alpha / L$ poiché $t_1 = L/(c + v \cos \alpha)$ e $t_2 = L/(c - v \cos \alpha)$.

Questa scrittura è indipendente dalla velocità del suono e così non è soggetta ad errori dovuti alla sua variazione. Tale tecnica è stata utilizzata per molti anni, ma è stata rimpiazzata a seguito dei progressi nelle misure di tempo digitali per ciò che concerne l'accuratezza e la risoluzione, da metodi basati su misure dirette dei due tempi di volo e sulla susseguente rielaborazione dei dati:

$$v = \frac{L}{2} \frac{t_2 - t_1}{t_2 t_1} \quad (11)$$

I dettagli riguardanti la misura di tempo variano a seconda del costruttore e solitamente sono oggetto di brevetti, comunque normalmente è necessario procedere a una media di alcune

misurazioni prima di riportare il valore della velocità del flusso. Per tagliare i costi e ridurre gli errori legati alle variazioni della lunghezza del cammino, provocate dall'accumulo di depositi sulle facce del trasduttore, molti misuratori di portata fanno uso, oggi, di due trasduttori, invece di quattro. Questo è stato realizzato attraverso la divisione temporale dei compiti della singola coppia di trasduttori, in modo da disporre di un utilizzo alternato: nel verso della propagazione della corrente e controcorrente. Tutto ciò è reso possibile da interruttori ad alta velocità e, poiché ora c'è un singolo valore di L (invece di due valori che si avrebbero quando si accumulano strati di deposito differenti), si eliminano gli errori sistematici ($\Delta t \neq 0$ quando $v=0$) e si conserva l'indipendenza da c .

Nel misuratore ultrasonico di tipo "clamp on", disegno d della figura, i trasduttori si trovano al di fuori dal tubo, fatto che elimina i problemi di sporcizia appena descritti e garantisce un'installazione estremamente conveniente evitando i problemi di compatibilità trasduttore/fluido. Generalmente, può essere impiegato lo stesso tubo già esistente e i trasduttori vengono collegati per mezzo di morsetti meccanici o di vincoli adesivi lasciando il tubo intatto e libero da ostruzioni. Questi misuratori (clamp on) hanno dei problemi caratteristici come i "cortocircuiti acustici". Altri problemi sono costituiti dalle variazioni di percorso del "raggio acustico" causate dallo slittamento dei morsetti, da espansioni termiche ecc. Comunque, questi problemi possono essere superati attraverso un'opportuna progettazione, o l'utilizzo di metodi di compensazione.

Un problema comune ad entrambe le tipologie è la sensibilità al profilo di velocità del flusso. Diversamente dai misuratori elettromagnetici, i quali forniscono valori di velocità media corretti fintanto che il profilo del

flusso non diventa asimmetrico, i misuratori ultrasonici del tipo descritto sopra forniscono letture diverse per profili di velocità asimmetrici di diversa forma, ma dotati di medesimo valore di velocità media. La ragione risiede nel fatto che il tempo di volo dell'impulso è legato all'integrale della velocità del fluido lungo il percorso. Così 1cm di percorso nella zona centrale, anche se i contributi delle aree anulari del flusso di queste due regioni non sono uguali. Se definiamo un "coefficiente del misuratore" pari ad 1 per un profilo uniforme, questo si abbassa a 0.75 per un flusso laminare e varia tra 0.93 e 0.96 per flussi turbolenti. È dimostrato (sul testo citato in Bibliografia [4]) che, se invece di utilizzare un percorso per il segnale di tipo diametrale inclinato, come fatto sin qui, ci si riferisce ad un cammino lungo la corda, allora il coefficiente del misuratore è circa lo stesso sia per flussi laminari sia per flussi turbolenti.

Un altro approccio è quello di adoperare molte traiettorie diverse per il segnale e di mediare i risultati. Inoltre, se le condizioni di flusso sono riproducibili, possono sempre essere applicate delle correzioni di tipo computazionale, anche nel caso di misuratori a singola traiettoria diametrale.

L'altra categoria principale di misuratori ultrasonici commerciali si basa sull'effetto Doppler. Laddove i misuratori a tempo di volo discussi sin ora richiedano un fluido relativamente pulito per minimizzare l'attenuazione e la dispersione dei segnali, i misuratori a effetto Doppler non funzionano se non sono presenti in quantità sufficienti particelle e/o delle bolle. Per esempio, in un tubo da 203mm è necessario che il 10% del volume sia costituito da elementi riflettenti del diametro di $40\mu\text{m}$, oppure che lo 0.2% del volume sia costituito da elementi riflettenti del

diametro di 100 μ m. i misuratori a effetto Doppler solitamente impiegano una configurazione di tipo clamp on.

Grazie alla disponibilità di misuratori sia per fluidi puliti, sia per fluidi sporchi, della quasi totale assenza di ostruzione o di cadute di pressione, di una modalità di funzionamento che ben si presta all'utilizzo di sensori clamp on e del buon campo di misura, i sistemi ultrasonici vanno incontro a un successo sempre crescente. I misuratori ultrasonici sono stati utilizzati principalmente per i liquidi, ma trovano anche applicazioni per i gas e il vapore (l'attuale mercato ha circa queste proporzioni: 70% liquidi, 30% gas; il clamp on è attualmente utilizzato solo per i liquidi). Un'applicazione piuttosto comune è la misura sui gas infiammabili nelle raffinerie. Un'unità della "Panameric, Inc." utilizza una tecnica basata sul tempo di volo, insieme a metodi brevettati per la misura del peso molecolare medio, al fine di fornire la velocità (da 30mm/s fino a 85mm/s) la portata volumetrica e massica (sono richiesti anche sensori di temperatura e pressione). Un misuratore per il vapore, dello stesso costruttore, è in grado di misurare la portata in volume di vapore acqueo e la portata in massa di vapore saturo o surriscaldato, anche in questo caso richiedono sensori di pressione e temperatura oltre alle tabelle di vapore. Le applicazioni per alta temperatura possono necessitare di tecniche speciali

L'American Gas Association ha studiato, e ora anche approvato, l'utilizzo di misuratori ultrasonici multi-traiettorie per il controllo del trasporto del gas naturale, un ampio mercato che necessita di grande accuratezza.

- MISURATORI VORTEX:

il fenomeno del distacco dei vortici a valle di un corpo solido dai bordi smussati, immerso in una vena fluida, che si verifica quando un flusso stazionario lo investe, è ben noto nella meccanica dei fluidi ed è la base dei misuratori di flusso a distacco di vortici.

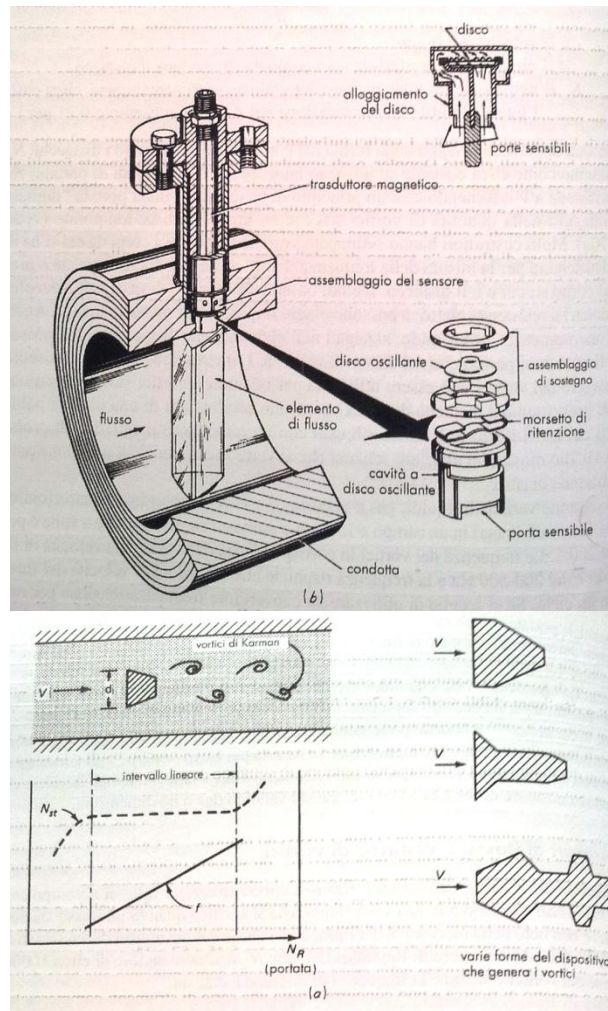


Figura 8: Misuratore Vortex

Quando il numero di Reynolds del tubo risulta maggiore di circa 10000, la formazione dei vortici è sicura e la frequenza di distacco è data da:

$$f = \frac{N_{st}v}{d} \quad (12)$$

dove v =velocità del fluido, d =dimensione caratteristica del corpo da cui avviene il distacco, N_{st} =numero di Strouhal, numero determinato sperimentalmente, circa costante nell'intervallo utile alla misurazione.

Con un opportuno disegno del corpo di distacco è possibile rendere la frequenza f proporzionale alla velocità e fornendo così un principio di misurazione della portata "digitale" basato sul conteggio della quantità di vortici staccati su una certa base temporale. Molti costruttori hanno sviluppato svariate forme per i corpi da cui si ha il distacco e svariate schemi per la misura della frequenza. I vortici causano forze alternate o pressioni locali sul corpo su cui c'è il distacco: metodi basati sull'impiego di materiali piezoelettrici o di termo-anemometri a film caldo, annegati nell'elemento che distacca i vortici, possono avvertire le fluttuazioni periodiche del flusso di velocità. l'interruzione di fasci ultrasonici, dovuta al passaggio dei vortici può essere utilizzata per misurare i vortici stessi.

Una grande varietà di liquidi gas e vapori può essere sottoposta a misurazioni con questo metodo. Intervalli lineari in un campo 15:1 sono piuttosto comuni mentre a volte è possibile arrivare a 200:1. Le frequenze dei vortici in corrispondenza della massima velocità di flusso sono dell'ordine dei 200-500Hz e la frequenza di risponde alle variazioni di velocità del flusso al massimo in un ciclo. Quando si ha necessità di una risposta più rapida possibile è disponibile una configurazione che fa uso di sensori ultrasonici e di un piccolo elemento per il distacco di vortici a sezione triangolare. Un fascio ultrasonico ad alta frequenza attraversa la tubatura in corrispondenza del vortice e viene modulato dalla frequenza di distacco dei vortici. Il filtraggio estrae l'involuppo del segnale modulato, che è la frequenza di distacco.

Se non è necessario avere la risposta più veloce, possiamo ottenere un'accuratezza maggiore mediando diversi impulsi; questa tecnica è comunemente usata in tutti i misuratori vortex. Come per i misuratori ultrasonici le caratteristiche assai valide dei misuratori a distacco di vortici hanno permesso loro di sottrarre ai tipi di strumenti più tradizionali una parte di mercato dei misuratori di portata.

- MISURATORE AD EFFETTO CORIOLIS:

In un sistema di riferimento uniformemente rotante, un corpo in movimento appare (ad un osservatore nello stesso sistema di riferimento), come soggetto ad una forza radiale rispetto al movimento del sistema, detta Forza di Coriolis. Se si fa quindi passare un fluido in un tubo circolare (solitamente a forma di U) si genera una deformazione del tubo per effetto della forza di Coriolis che induce uno spostamento del tubo. Questo spostamento è proporzionale alla portata massica, che può così essere misurata.

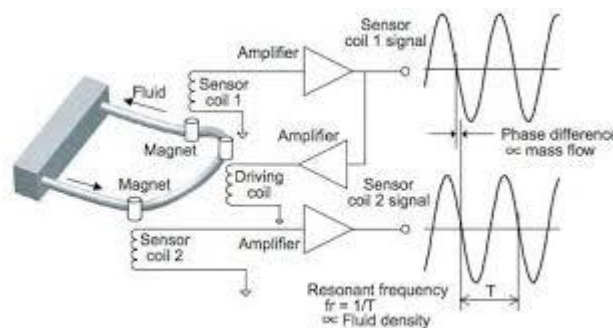


Figura 9: Misuratore ad effetto Coriolis

Questo tipo di misuratore è in grado di fornire direttamente la misura della portata in massa, in quanto l'effetto Coriolis è di tipo gravitazionale. I vantaggi di questo flussometro sono diversi a partire dalla precisione che può arrivare anche a $\pm 0.5\%$, l'insensibilità a variazioni di densità, viscosità, temperatura, pressione, detiene la

possibilità di rilevare la portata, la densità e la temperatura del fluido in transito.

Da fare attenzione però che tale misuratore non è applicabile in zone limitrofe all'equatore in quanto l'effetto Coriolis è nullo.

3. PORTATE DI INTERESSE:

L'obiettivo è quello di ricavare un misuratore di portata da applicare come strumentazione per l'allestimento di un banco prova motori. Naturalmente una misura di portata è una misura di interesse generico applicabile in tanti altri settori oltre che quello automotive, ma focalizzare ciò che è di interesse semplifica la successiva fase di ricerca e scelta del misuratore e, dunque, del principio di misura ottimale per il caso specifico.

Una convenzionale configurazione di banco prova motori si presenta come in figura.



Figura 10: Esempio di un tipico banco prova motori

Troviamo un propulsore montato su un apposito supporto e collegato a un freno, tipicamente elettromagnetico a correnti parassite, il quale tramite celle di carico consente di ricavare il valore di coppia erogata a determinati numeri di giri. Si notano tubazioni per ingresso o uscita fluidi, in particolare sulla sinistra della figura si notano tubazioni di materiale metallico, con alle estremità due sonde lambda, che si occupano dell'uscita dei gas di scarico. Sulla destra si notano tubazioni in gomma tipicamente utilizzate per l'ingresso e l'uscita dal motore del fluido refrigerante, acqua tipicamente, i quali sono collegati allo scambiatore di calore. Altre tubazioni difficili da notare sono quella per l'ingresso carburante, tubazione di plastica dura o gomma rinforzata, e

quella per il circuito del lubrificante, tubo in treccia metallica o gomma rinforzata. Infine il condotto di aspirazione che in questo caso si trova sopra la V formata dai cilindri ed è racchiusa dall'involucro nero, ma che tipicamente è un condotto convergente che presenta una forma a "tromba" nell'estremità libera in ambiente per favorire l'immissione di aria. Quelle elencate sono tubazioni necessarie al funzionamento corretto di un motore. In altre configurazioni (non presenti in figura) possono trovarsi anche la tubazione per il circuito EGR e il circuito Blow-By, ovvero masse d'aria che dalla camera di combustione trafilano in coppa attraverso le fasce elastiche e i giochi dei pistoni e che tipicamente vengono reintrodotti in aspirazione.

Per lo sviluppo dei motori è importante misurare la portata del fluido che scorre all'interno di ognuna di queste tubazioni, ma essendo fluidi molto diversi fra loro e che si trovano in stati fisici differenti è logico pensare che i misuratori debbano avere caratteristiche differenti.

In particolare per quanto riguarda il liquido di raffreddamento ci si trova a misurare la portata di acqua con temperature anche superiori ai 90°C, dunque anche se l'acqua di per sé non comporta particolari problemi, essendo un liquido chimicamente inerte con qualunque materiale di costruzione di un misuratore, occorre che il sensore che fisicamente effettua la misura possa raggiungere questi valori di temperatura. Ragionamento analogo può essere fatto anche per l'olio lubrificante; generalmente non causa problemi di corrosione ma raggiunge temperature anche di 150°C dunque il sensore deve essere adatto per questi livelli di temperatura. Più complesso invece è per la misura della portata combustibile: oltre dover effettuare la misura in un condotto di dimensioni ridotte, che generalmente implica l'uso di raccordi che introducono perdite di carico importanti, la misura riguarda un fluido

corrosivo per molte materie plastiche, quindi è opportuno valutare misuratori metallici (tipicamente ottone, alluminio o inox).

Per ciò che riguarda le portate d'aria occorre fare delle distinzioni.

La prima portata d'aria che esaminiamo è quella in aspirazione: si tratta di aria ambiente che quindi non comporta particolari problemi ad un sensore.

La seconda è quella chiamata 'Blow-By', che oltre ad essere ad una temperatura maggiore di quella ambiente, possiede particelle e vapori di olio motore, dunque è considerabile come un fluido bifase. Ultima portata in esame, la più complessa, riguarda l'EGR, ovvero una porzione di gas di scarico che vengono reintrodotti in aspirazione per l'abbattimento delle emissioni in particolari zone del regime di funzionamento del motore. È molto importante dosare bene questa massa d'aria reintrodotta, dunque sarebbe interessante misurarne la portata con precisione, tuttavia l'EGR è un gas ad alta temperatura, oltre i 150° nella zona di misura, e che presenta particelle di particolato solido, prodotti incombusti e altri residui della combustione che possono creare incrostazioni sul misuratore oltre che complicare la misura.

4. ANALISI E SCELTA DEL MISURATORE:

Avendo note, a questo punto, le varie tipologie di misuratori e dei loro principi di misura, si è passati alla valutazione dei prodotti già disponibili nel mercato, pesandone i pro ed i contro.

La valutazione esamina prezzo, accuratezza, ripetibilità, principio di misura, compatibilità col fluido e prontezza.

Per quanto riguarda la misura di portata per un liquido come l'acqua si possono trovare un numero enorme di diversi misuratori anche molto

economici, in particolare sono stati valutati misuratori a turbina e misuratori ultrasonici. I misuratori a turbina considerati sono il modello NT7 dell'azienda Nixon, in acciaio inossidabile con buone prestazioni di misura (accuratezza e ripetibilità) e di media fascia di prezzo (670£), e il misuratore a turbina Bio-Tech, decisamente economico (25€) e con prestazioni di livello medio basso. Le principali differenze, come si vede dai datasheet di seguito, sono il materiale di costruzione, il range di temperatura sopportabile e l'accuratezza di misura.



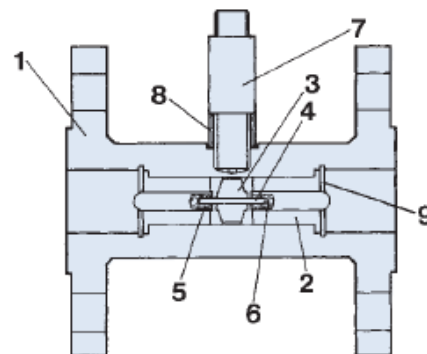
Industrial Type Turbine Flowmeter



Technical Data

| | |
|--------------------------------|---|
| • Linear Accuracy | ±0.5% over 10:1 range |
| • Repeatability | ±0.1% of reading |
| • Response Time | 50 milliseconds for 50% step change in flowrate |
| • Output Signal | Sinusoidal pulses 50mV - 800mV peak varying with flowrate |
| • Operating Pressure | Twice the pressure drop across the meter plus vapour pressure of liquid |
| • Pressure Drop | 0.2 - 0.5 bar depending on meter size |
| • Flow Range | 10:1 as standard |
| • Temperature | Wider ranges possible -30°C min 150°C max (standard coil) 400°C special design 120°C intrinsically safe |
| • Transmission Distance | 500 metres max without pre-amplifiers for low noise environment |
| • Mounting Attitude | Horizontal or vertical (flow upwards) or inclined |
| • Maximum Pressure | Limited only by end fittings |

Parts and Material



| | | |
|----------|----------------|--|
| 1 | Housing | 316 Stainless Steel |
| 2 | Bearing Hanger | 316 Stainless Steel |
| 3 | Rotor | 431 Stainless Steel |
| 4 | Spindle | Tungsten Carbide |
| 5 | Bearing Bushes | PTFE/Carbon filled or Tungsten Carbide |
| 6 | Thrust Ball | Tungsten Carbide |
| 7 | Pick off coil | Stainless Steel body |
| 8 | Collar | 316 Stainless Steel |
| 9 | Circlip | 302 Stainless Steel |

Figura 11: Turbina NT7 Nixon

chflussmesser


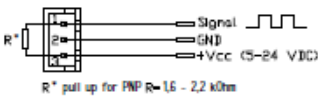
| | | |
|--------------------------------------|--|---|
| Technical specification | Anwendung: Wasser, Benzin, Diesel, Heizöl u.a. nicht aggressive, Flüssigkeiten. Application: Water, Fuel, Diesel, Oil and other non aggressive liquids. | Serie: FCH-m-POM-LC Art.-Nr: 150391 |
| Measurement principle | Turbine |  <p>Q mit Düse/ with nozzle size: D= 1,0 mm, Q= 0,015- 1,0 L/min. Impulse/L, Pulses/ Litre: ca. 10000</p> <p>D= 3,0 mm, Q= 0,05- 3,0 L/min. Impulse/L, Pulses/ Litre: ca. 2.500</p> <p>Gegenstecker mit Kontakten und Düse D= 1 mm im Lieferumfang enthalten. <i>Connector with crimp contacts and nozzle D= 1 mm Included.</i></p> <p>Steckerbelegung / Electrical connection</p>  <p>R* = nicht integriert/ not integrated (für / for PNP use pull-up R*\geq 1kΩ)</p> |
| Sensing principle | Hall-Sensor/ Hall effect, non-contacting | |
| Output: square wave | NPN open collector sinking | |
| Flow direction | in Pfeilrichtung / at arrow-direction | |
| Flow range LPM | 0,05 – 3,0 L/ min (H ₂ O bei / at 20°C) | |
| Nozzle | D= 3,0 mm integriert/ integrated | |
| Pulses output/ Litre | ca. 2.500 Impulse/Litre / H ₂ O 20°C | |
| Viscosity ν | 0,5 - 10 mPas | |
| Accuracy ($\nu = 1$ mPas) | +/- 2% (bei gleichen Betriebsbedingungen) | |
| Repeatability of frequency response | +/- 0,5 % (bei gleichen Betriebsbedingungen) +/- 0,5 % (at the same operating conditions) | |
| Operating pressure Burst pressure | -0,7- 4 bar >10 bar (bei / at 20°C) | |
| Running temperature | -10°C... + 80°C | |
| Installation position | beliebig/ any | |
| Port Connection | 2x G 1/8" AG + M5 IG/ male /female thread | |
| Materials/ Rotor/ Gasket | POM-natur / PVDF/ FKM | |
| Axle/ Bearing | Achse / Axle= PVDF | |
| Voltage supply | 5- 24 VDC max. | |
| Output current max. | 25 mA max. | |
| Weight | 25 Gramm (incl. connector) | |
| Dimensions in mm | s. Zeichnung / see drawing | |

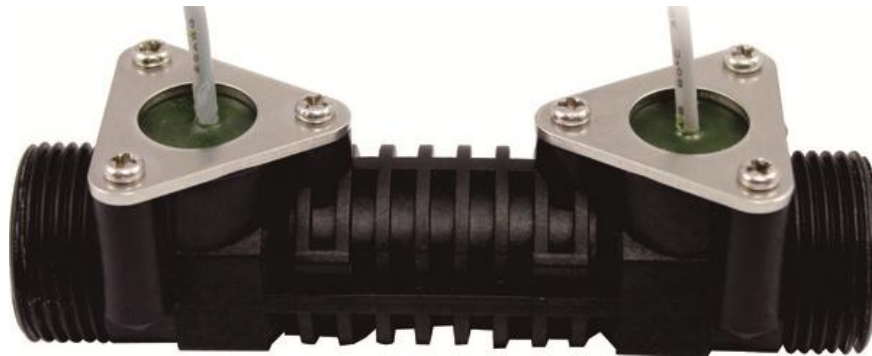
Figura 12; Turbina in plastica Bio-Tech

Risultato giustificato, visto la differenza di prezzo di vendita.

Il misuratore ultrasonico considerato è un prodotto dell'azienda Audiowell.

Tubo costituito da materiale plastico, passaggio del fluido coassiale all'impianto e capsule ultrasoniche montate perpendicolarmente rispetto

all'asse (monta due specchi per deviare le onde da un sensore all'altro).



| | | | |
|----------------------------|---------------------------|---------|--------------------------------|
| 连接螺纹 D Connecting Thread | 英制 | 3/4G | 螺纹规 Thread Gauge |
| 工作温度 Operating Temperature | °C | 0.1~+50 | |
| 储存温度 Storage Temperature | °C | -25~+55 | |
| 压力损失 Pressure Loss | KPa | ≤40 | Q=2.5m ³ /h, T<30°C |
| 安装位置 Installation Position | 进水管 Inlet | | |
| 安装形式 Installation Mode | 管螺纹连接 Threaded connection | | |

5. 测量精确度 (Accuracy):

(1)测量精确度:

Accuracy of measurement:

| 测试流量点 Tested flow rate | 实际测量精度 Actual measurement accuracy | 国家二级表测量精度 National standard for Class 2 Water Meter |
|---------------------------|---------------------------------------|--|
| Q1 | ±2.5% | ±5% |
| Q2 | ±2.5% | ±5% |
| Q3 | ±1% | ±2% |

Figura 13: Tubo Audiowell a ultrasuoni

Per la misura di olio e combustibile la valutazione è molto simile, nel senso che si sono considerati sempre misuratori a turbina e ultrasonici, ma ottimizzati per questo fluido.

In particolare si presenta di seguito un misuratore a turbina Bio-Tech in ottone e un tubo con sensori ultrasonici Audiowell in ottone.



is:er


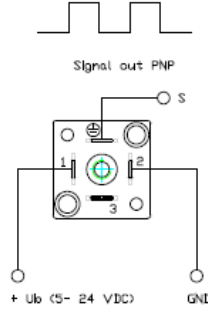
| | | |
|---------------------------------------|--|--|
| Technical specification | Anwendung: Wasser und andere flüssige, nicht aggressive Medien. Application: water and other aqueous, non aggressive liquids. | Serie: FCH-C-Ms-N Art.-Nr: 503592 |
| Measurement principle | Turbine |  <p>Steckerbelegung / Electrical connection PIN 1: +4,5 to 24 VDC PIN 2: GND (0V) ⊕ - Masse-PIN: Signal</p>  <p>Signal out PNP</p> <p>+ U_b (5- 24 VDC) GND</p> |
| Sensing principle | Hall- Effect berührungslos / non contacting | |
| Output: square wave | PNP (Pull-up R= 2k2 integrated) | |
| Flow direction | in Pfeilrichtung / at arrow-direction | |
| Flow range LPM | 0,50- 30,0 L/ min (H ₂ O bei / at 20°C) | |
| Nozzle | D= 9 mm integriert / integrated | |
| Pulses output/ Litre | 435 Impulse/Liter / H ₂ O 20°C | |
| Viscosity v | 0,5... 20 mPas | |
| Accuracy (v = 1 mPas) | +/- 2% (bei gleichen Betriebsbedingungen) | |
| Repeatability of frequency response | + - 0,5 % (bei gleichen Betriebsbedingungen) + - 0,5 % (at the same operating conditions) | |
| Continuous pressure Burst pressure | -0,7- 10 bar (bei / at 20°C) 20 bar (bei / at 20°C) | |
| Running temperature | -10°C... + 80°C | |
| Installation position | beliebig / any | |
| Port Connection | 2x G 1/2" AG / male thread BSP | |
| Materials/ Rotor/ Gasket | Ms / brass / PA / POM / O-Ring: NBR | |
| Axle/ Bearing | Achse / Axle= V4A (316L) | |
| Voltage supply | 5-24 max. VDC | |
| Output current I _{max} | 10 mA max. | |
| Weight | 105 Gramm | |
| Dimensions in mm | s. Zeichnung / see drawing | |

Figura 14: Turbina Bio-Tech ottone



Figura 15: Tubo Audiowell in ottone

È stato valutato anche un altro misuratore per la misura della portata combustibile. Sempre sul principio ultrasonico ed è il Flowsonic che appartiene all'azienda Sentronic. Promette prestazioni elevate anche nella configurazione base e viene venduto ad un prezzo elevato (circa 7000£). Questo componente è quello utilizzato dalla Formula1 per il controllo del consumo carburante.

FlowSonic

Ultrasonic Fuel Flow Sensor Series

The all-new FlowSonic line of ultrasonic fuel flow sensors from Sentronics Limited is specifically designed to help limit peak engine power, balance performance, and promote energy efficiency in motorsport. It is offered in three specifications – Elite, Super, and Pro – to suit the full spectrum of racing categories, from F1 to F4 and LMP1 to GT3, as well as touring and rally cars. Key features and benefits include:

- ✓ Accurate to +/- 0.25% of reading
- ✓ Repeatability to +/- 0.05% of reading
- ✓ Flow rate of +/- 8000 ml/min
- ✓ 0°C - 105°C operating temperature
- ✓ Solid state with no moving parts
- ✓ Compact and lightweight
- ✓ Compatible with all fuel types
- ✓ Internal processing and diagnostics

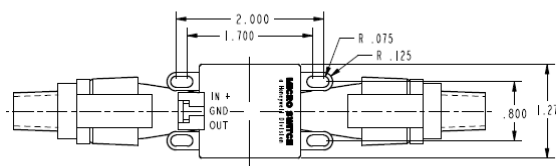


Figura 16: Flowsonic by Sentronic

Ciò che incuriosisce di questo prodotto è la geometria. Infatti diversamente da come viene rappresentato generalmente un misuratore ultrasonico, i condotti di ingresso e uscita del fluido sono in posizione verticale rispetto all'asse del corpo, mentre le capsule emettitore e ricevitore sono poste agli estremi orizzontali. Configurazione del tutto opposta a quella disegnata da un produttore come ad esempio Audiowell (configurazione a specchi convenzionale).

Nel mercato per la misura della portata di un fluido come l'aria si trovano principalmente anemometri a filo o film caldo. Oltre ai comuni debimetri da auto è stato valutato un altro strumento rappresentato nel datasheet che segue.

In generale questi strumenti sono poco attendibili, infatti hanno accuratze basse e dipendono molto dallo stato in cui si trova il filo (se è sporco principalmente). Per questo motivo infatti anche in campo automotive, essendo questa tecnologia comunemente applicata sui motori, si dà per scontata la bassa attendibilità della misura di un debimetro a filo caldo.



REAL-RING

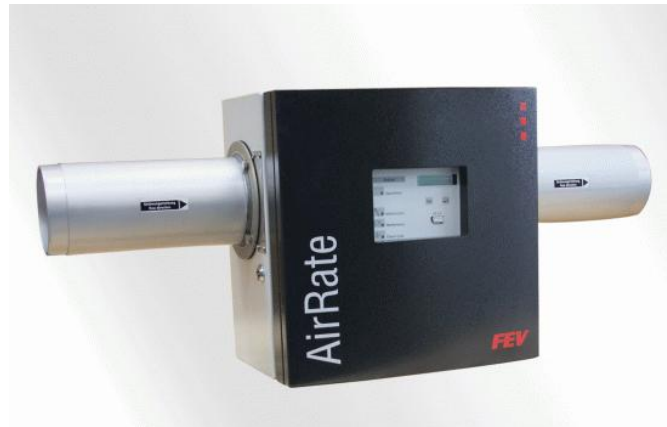
 AWM5102VN

| SPECIFICATIONS | |
|--|--|
| RECOMMENDED POWER SUPPLY Δ | 10.00 ± 0.1 VDC |
| MINIMUM POWER SUPPLY | 8.0 VDC |
| MAXIMUM POWER SUPPLY | 15 VDC |
| POWER CONSUMPTION | 100mW MAX |
| OUTPUT TYPE | LINEAR, I TO 5 VDC |
| CALIBRATION GAS | NITROGEN |
| GAS FLOW RANGE $+$ | 0-10 SLM $+$ |
| OUTPUT @ LASER TRIM POINT | 5 VDC @ FULL SCALE FLOW |
| DIFFERENTIAL PRESSURE @ FULL SCALE | SEE PRESSURE VS. AIRFLOW CHART |
| NULL OUTPUT | 1.00 ± 0.05 VDC |
| NULL OUTPUT SHIFT, 0 TO +50°C | ± 0.050 VDC TYP, ± 0.100 VDC MAX |
| FULL SCALE OUTPUT SHIFT, 0 TO +25°C / +25° TO 50°C | +7.0% READING MAX |
| LINEARITY ERROR Δ | ± 3.0% READING |
| REPEATABILITY & HYSTERESIS | ± 0.5% F.S.O. |
| RESPONSE TIME | 60.0 mSEC MAX |
| STORAGE TEMPERATURE RANGE | -20° TO 70°C |
| OPERATION TEMPERATURE RANGE Δ | 0° TO 50°C |
| TERMINATION (.100 CENTERS) | .025 SQUARE |
| CONNECTOR (4 PIN RECEPTACLE) Δ | AMP (103956-3) |
| WEIGHT | 30 GRAMS (2.120Z) |
| SHOCK RATING | 100 g PEAK, 6 mSEC HALF-SINE (3 DROPS EACH DIRECTION OF 3 AXES) |
| OVERPRESSURE | 50 PSI MAX |
| LEAK RATE, MAX | 0.1 PSI/MIN AT STATIC CONDITION |

Figura 17: Misuratore a filo caldo

Tuttavia questi componenti sono decisamente economici (75€ circa) e molto facili da reperire.

Altri misuratori, ben più accurati e ben più costosi (27000€), sfruttano come principio di misura gli ultrasuoni ed in particolare si è valutato l'Air-Rate dell'azienda FEV.



Technical Data

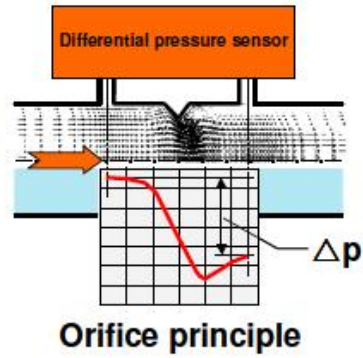
| | |
|----------------------------|---|
| Measuring | |
| Measured value | Air mass flow (volume flow, temperature and pressure) |
| Duct diameter | DN100; DN150 |
| Measured component | Air |
| Measuring principle | Ultrasonic propagation time delay measurement 4 path measuring paths for increased accuracy |
| Measuring range | DN100: 10 ... 1400 kg/h DN150: 30 ... 3000 kg/h |
| Typical accuracy | < ± 1,0% of measuring value for 0,01 Qmax up to Qmax |
| Typical reproducibility | < ± 0,25% of measuring value for 0,01 Qmax up to Qmax |
| Temperature measurement | Built in; Thermo-couple Ni-CrNi „Type K“. |
| Pressure measurement | Built in; 660 ... 1100 mbar (Abs. pressure) |
| Display | |
| 2-line LC-Display | Measured value, warning and fault messages |
| LED | Status, fault |
| Output | |
| Analogue output | 4... 20 mA, max. 760 Ohm Refresh rate 10/s |
| Interface | |
| Bus protocol | For parameter setting via PC by means of a terminal program 1 x AK via RS 232 1/s in Logging mode 10/s in Burst mode |
| Installation | |
| Combustion air temperature | -20 ... +50 °C |
| Combustion air pressure | 900 ... 1100 mbar (Abs. pressure) |
| Connections | Hose connection AirRate 100: DN 118 AirRate 150: DN 168 |
| Power supply | |
| Voltage | 90...140 V AC / 190...260V AC, 50/60Hz |
| Power consumption | Approx. 20 W |
| Ambient conditions | |
| Temperature range | -20 ... +50 °C |
| Enclosure rating | IP65 |
| Dimensions | |
| L x H x D (mm) | AirRate 100: 973 x 253 x 380 AirRate 150: 1125 x 360 x 500 |
| Weight | AirRate 100: 25 kg AirRate 150: 52 kg |

Figura 18: AirRate FEV

Un prodotto diffuso per la misurazione del Blow-By è quello dell'azienda AVL. Come principio di misurazione adotta un sistema ad ostruzione

misurando una caduta di pressione per ricavare poi la velocità del fluido. Si tratta di un prodotto accurato e molto costoso.

The AVL Blow By Meter determines the flow rate using the orifice measurement principle. A differential pressure transducer measures the different gas pressures in front of and after the orifice and the volume of gas flowing through the orifice can be calculated from this difference.



Following areas of measurement are available:

| measurement range : | |
|---------------------|---------------|
| 0,2 | to 10 l/min |
| 1,5 | to 75 l/min |
| 3 | to 150 l/min |
| 6 | to 300 l/min |
| 12 | to 600 l/min |
| 24 | to 1200 l/min |
| 48 | to 2400 l/min |



View: Different orifices

| Technical Details AVL Blow By Meter | |
|-------------------------------------|--|
| Type: | AVL 442 |
| Measurement principle: | Differential pressure |
| Measurement range: | 0.2 ... 10 l/min 1.5 ... 75 l/min 3 ... 150 l/min 6 ... 300 l/min 12 ... 600 l/min 24 ... 1200 l/min 48 ... 2400 l/min |
| Measurement accuracy: | ≤ 1% FSO fine linearization (option) ≤ 1.5% FSO standard linearization |
| Interfaces / output signal: | RS232 (AK-compliant), analog I/O, 0 ... 10 V |
| Power supply: | 24 V direct current |
| Power consumption: | 35 W |
| Ambient temperature: | -10 ... 55° C |
| Dimensions (W x H x D): | Approx. 330 x 350 x 75 mm (MR:3–150 l/min) |

Figura 19: Blow-By meter AVL

Dalle valutazioni del mercato si è capito che i vari misuratori di portata hanno prezzi e prestazioni molto differenti. Addirittura apparentemente ingiustificati, in riferimento ai prodotti AVL e FEV, in quanto la tecnologia di base è di fatto semplice ed economica. Dunque sulla base dell'analisi si è scelto di proseguire l'esperienza scegliendo come principio di misura quello ultrasonico. La scelta è stata determinata non solo dal fatto che un misuratore ultrasonico opportunamente progettato è completamente "contact less", e quindi le prestazioni del motore vengono meno disturbate rispetto ad altri misuratori come ad esempio quello a turbina, ma anche perché, considerando le portate di interesse, questa tecnologia è applicabile in tutte.

Naturalmente sappiamo già che dovrà seguire una progettazione ottimizzata per ogni fluido, ma la fisica alla base di questa misura è la medesima.

5. TEORIA SUGLI ULTRASUONI

Teoria delle onde:

Le onde costituiscono un importante fenomeno naturale sia per l'eleganza e l'ingegnosità dei metodi matematici e sperimentali che sono stati sviluppati dall'uomo nel corso dei secoli per descriverle, sia perché le onde permeano moltissimi aspetti della nostra vita attraverso le più diverse applicazioni tecnologiche.

Significato di onda in fisica:

L'onda è una perturbazione che si propaga nello spazio e che può trasportare energia da un punto all'altro. Tale perturbazione è costituita

dalla variazione di qualunque grandezza fisica (es. variazione di pressione, temperatura, intensità del campo elettrico, posizione, ecc..).

Molti fenomeni naturali sono descritti in termini di onde: nell'acqua, nella luce, elettromagnetiche, meccaniche e sonore.

In particolare queste ultime verranno approfondite meglio, per comprendere alcuni concetti che verranno successivamente discussi.

Il fenomeno sonoro:

Siccome verranno utilizzati sensori ad ultrasuoni è bene spiegare la definizione di onda sonora. Le onde sonore sono un particolare tipo di onda in cui la perturbazione è la variazione di pressione indotta dal corpo vibrante nel mezzo circostante. Tale variazione di pressione è in grado di propagarsi nel mezzo come una successione di rarefazioni e condensazioni (cioè di variazioni di densità).

È possibile evidenziare quattro fasi di cui pensiamo esse siano sempre costituite:

1. produzione di onde meccaniche ad opera di una sorgente che vibra detta sorgente sonora. Qualunque fenomeno che provoca uno "spostamento d'aria" avente caratteristiche fisiche opportune (non ogni spostamento d'aria viene poi da noi "sentito" come evento sonoro).
2. propagazione delle onde attraverso un mezzo elastico (di solito l'aria); tale propagazione è il fenomeno ondulatorio vero e proprio e verrà d'ora in poi chiamato onda sonora;
3. ricezione e percezione dell'onda sonora da parte di un opportuno apparato in grado di trasformare (ed eventualmente elaborare) l'energia sonora in energia di altra forma;
4. elaborazione del segnale trasformato.

Se analizzassimo microscopicamente le particelle d'aria vedremmo abbastanza chiaramente zone di rarefazione e di addensamento delle molecole, noteremmo oltretutto che ciò che "avanza" è il fronte d'onda, cioè la compressione del mezzo e non le molecole d'aria, che subiscono solo piccoli spostamenti attorno a punti di equilibrio fissi.

Se vogliamo analizzare quantitativamente l'onda sonora dobbiamo determinare le caratteristiche misurabili del fenomeno.

Proprietà del mezzo

Se ci concentriamo sul mezzo possiamo, punto per punto nello spazio, ed istante per istante nel tempo, misurare:

- la differenza di pressione dell'aria rispetto alla normale pressione atmosferica: questa differenza è detta pressione acustica.

L'insieme delle pressioni acustiche locali in tutto lo spazio formerà un "campo di pressione". È il caso di sottolineare fin dall'inizio che la pressione acustica rappresenta una piccola "increspatura" rispetto al valore standard di pressione atmosferica: anche nel caso di suoni estremamente intensi, il suo valore è di circa mille volte inferiore a quello della pressione atmosferica;

- la differenza di densità dell'aria rispetto alla densità dell'aria in quiete;
- lo spostamento delle molecole d'aria dalla loro posizione di equilibrio e la loro velocità. Avremo in tal caso "un campo di spostamenti" e "un campo di velocità".

Proprietà dell'onda

Tuttavia, se focalizziamo la nostra attenzione sull'onda, anziché sul mezzo in cui essa si propaga, potremo misurare, ad esempio:

- il periodo T della perturbazione, che è il tempo che intercorre tra l'istante in cui, in un punto prefissato, si verifica la massima pressione e l'istante in cui questa situazione si verifica nuovamente nello stesso punto; più semplicemente, nel caso di una molecola di riferimento, è il tempo che essa impiega a compiere un'oscillazione completa attorno alla sua posizione di equilibrio.
- la frequenza f rappresenta il numero di vibrazioni complete che avvengono in un secondo. La relazione fra periodo e frequenza è la seguente: l'unità di misura della frequenza rappresentata da un'oscillazione al secondo, si chiama Hertz (Hz). Nel caso della molecola è il numero di volte in cui avviene una sua oscillazione, nell'unità di tempo;
- la lunghezza d'onda λ : è la distanza percorsa dall'onda in un periodo o la distanza che intercorre, in un certo istante, tra due zone consecutive di maggior addensamento, zone nelle quali la pressione acustica è massima;
- l'ampiezza dell'oscillazione, cioè lo spostamento massimo delle molecole rispetto alla loro condizione di riposo; è strettamente legata al massimo valore che può raggiungere la pressione acustica;
- la velocità con cui la perturbazione avanza nel mezzo, come rapporto tra λ e T .

Si noti che questa velocità non coincide affatto con la velocità con cui si muovono le singole molecole. Essa è sempre diretta nel senso della propagazione dei fronti di pressione, mentre quella delle molecole cambia verso ad ogni tempo periodo.

Effetti

Tutte le onde hanno un comportamento comune in situazioni standard e possono subire i seguenti effetti o fenomeni:

- Attenuazione dell'ampiezza durante la propagazione nel mezzo.
- Riflessione, il cambio di direzione di propagazione a causa di uno scontro con un materiale riflettente.
- Rifrazione, il cambio di direzione di un'onda causata dal cambio del mezzo di propagazione (ad esempio di densità diversa).
- Diffrazione, la diffusione delle onde, per esempio quando passano attraverso una fessura stretta.
- Dispersione, la divisione di un'onda in sotto onde in dipendenza della loro frequenza.
- Interferenza, la somma vettoriale (possono annullarsi) di due onde che entrano in contatto tra loro.
- Effetto Doppler, lo spostamento di frequenza di un'onda periodica viaggiante rispetto alla direzione di osservazione.

Velocità del suono

Un ulteriore concetto da integrare è la velocità di propagazione del suono.

La possibilità di propagarsi, cioè di spostarsi nello spazio-tempo è una caratteristica generale di tutte le onde, tanto che essa fa parte, come visto, della definizione di onda, indipendentemente dalla sua natura. Le onde sonore si propagano con velocità differenti al variare del mezzo di propagazione (ad esempio, il suono si propaga più velocemente nell'acqua che non nell'aria), e varia anche al variare delle proprietà del mezzo, specialmente con la sua temperatura. In un fluido gli atomi o le molecole sono liberi di scorrere, e quindi le onde trasversali non

possono manifestarsi; il suono si propaga solo per mezzo di onde di pressione longitudinali. Ricaviamo ora l'equazione utile per il calcolo della velocità del suono.

Considerando un tubo cilindrico orizzontale, rigido, di sezione S (Fig 10), contenente un fluido comprimibile in cui si propaga una piccola perturbazione, assimilabile ad una superficie (fronte d'onda) attraverso cui sono discontinue le caratteristiche fisiche del fluido; scegliamo ora un sistema di riferimento parallelo all'asse del tubo e solidale con la superficie di discontinuità; ipotizziamo inoltre che il fenomeno sia stazionario (tutte le grandezze sono indipendenti dal tempo).

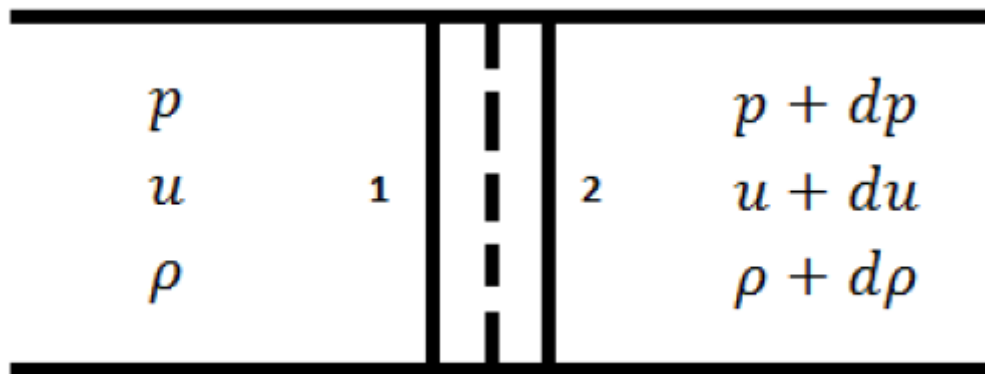


Figura 20

Chiamiamo ρ , u e p i valori di densità, velocità e pressione prima del fronte d'onda (sezione 1) e $\rho+dp$, $u+du$ e $p+dp$ quelli dopo (sezione 2); eguagliamo la portata in massa attraverso la sezione 1 a quella attraverso la sezione 2: difatti se le portate fossero diverse cambierebbe la massa contenuta tra 1 e 2 in disaccordo con l'ipotesi fatta.

$$\rho u S = S(\rho + d\rho)(u + du) \quad (13)$$

Cioè: $\rho u = \rho u + u d\rho + \rho du + d\rho du \quad (13.1)$

Trascurando gli infinitesimi di ordine superiore al primo resta:

$$\rho du + u dp = 0 \quad (13.2)$$

Applichiamo la legge di Newton $F=ma$, nella direzione orizzontale, alla massa m compresa fra le due sezioni 1 e 2 distanti dx .

La forza (data dal prodotto dell'area per la pressione) applicata in sezione 2 ha segno opposto a quella in sezione 1 da cui

$$F = Sp - S(p + dp) = -Sdp \quad (14)$$

La massa a meno di infinitesimi di ordine superiore vale $m = \rho S dx$;

l'accelerazione si può esprimere come $a = \frac{du}{dt}$; avremo quindi :

$$-Sdp = \rho S dx \frac{du}{dt} \quad (15)$$

Semplificando S e notando che $u = \frac{dx}{dt}$

$$-dp = \rho u du \quad (15.1)$$

Ma per la 13.2 quindi:

$$dp = u^2 d\rho \quad (15.2)$$

Si ottiene così:

$$\frac{dp}{d\rho} = u^2 \quad (16)$$

u è dunque la velocità con cui si sposta il fluido rispetto al suono e quindi anche la velocità con cui si sposta la perturbazione rispetto al fluido; indicando con c (celerità) tale velocità, avremo

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (17)$$

Riferendoci a un gas, la trasformazione in questo tipo di fenomeni può essere considerata adiabatica, dunque:

$$pV^\gamma = \text{cost} \quad (18)$$

Introducendo l'equazione di stato dei gas perfetti $p = \rho RT$, dove con R si è indicata la costante universale dei gas per unità di massa (per l'aria è 287 J/(kg·K)) e con T la temperatura assoluta (K), possiamo ricavare:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\gamma RT} \quad (19)$$

Dove $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, rapporto fra il calore specifico a pressione costante ed il calore specifico a volume costante, è chiamato *indice adiabatico*.

Onde periodiche

Un caso particolarmente interessante si presenta se la funzione d'onda della sorgente $\Psi(0;t)$, anziché sotto forma di un unico impulso, ha un andamento periodico. Si parla allora di onda periodica. Ovviamente essendo valida la relazione:

$$\Psi(x,t) = \Psi(x-vt,0) \quad (20)$$

ci aspettiamo che la funzione d'onda : $\Psi(x,t)$ sia anch'essa una funzione periodica, cioè tale che:

$$\Psi(x,t) = \Psi(x,t+kT) \quad (21)$$

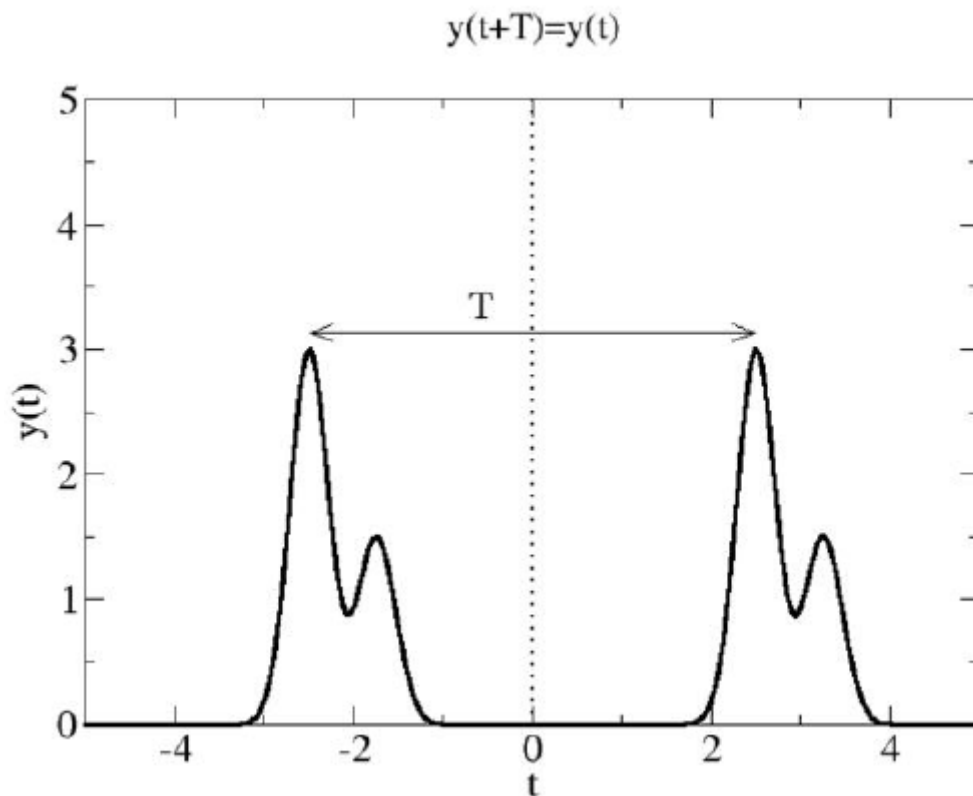


Figura 21: onda periodica

Dalla figura si può comprendere meglio il significato fisico della grandezza T (periodo). Strettamente correlato al concetto di periodo è il concetto di frequenza f che esprime il numero di oscillazioni compiute nell'unità di tempo. Non è difficile dedurre che la relazione tra periodo e frequenza è di proporzionalità inversa, cioè:

$$T = \frac{1}{f} \quad (22)$$

Se, come abbiamo detto, la perturbazione (vedi figura seguente), in questo caso periodica, della sorgente (il punto verde) si propaga verso sinistra con velocità v (la freccia rossa), l'onda si sposterà secondo una "forma" che ricalca esattamente la sorgente $\Psi(0;t)$ (se escludiamo fenomeni dissipativi che smorzano lentamente l'ampiezza dell'onda).

Le due immagini sono molto simili ma con alcune importanti differenze: l'immagine figura seguente è una "fotografia" dello spazio fisico reale ad un certo istante t e ad un istante successivo $t+\Delta t$.

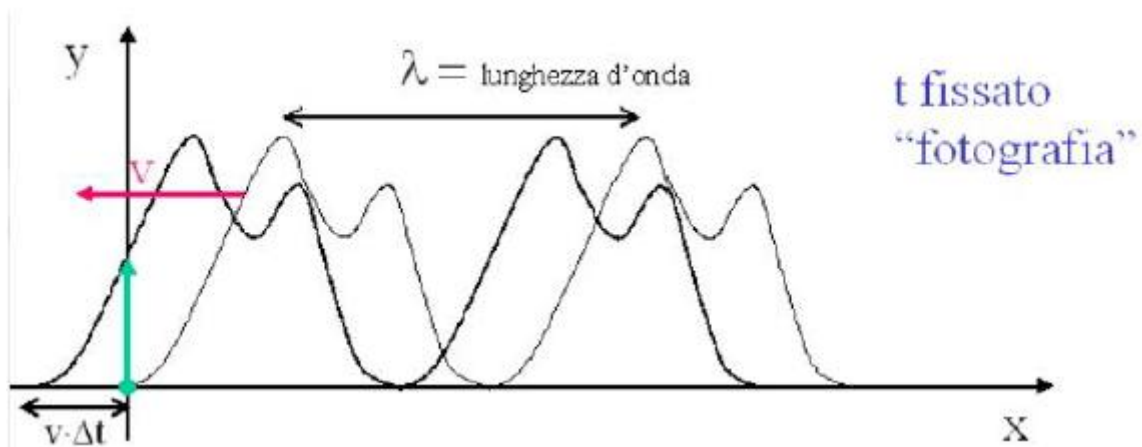


Figura 22

La distanza tra due massimi in figura (o comunque tra due punti "corrispondenti" all'interno della figura di periodicità) non rappresenta il tempo periodo, ma la distanza percorsa dall'onda in un periodo. Tale distanza, che è un parametro importantissimo per la descrizione dell'onda, prende in nome di lunghezza d'onda e si indica con λ .

Moto armonico

L'equazione che descrive la posizione del punto in funzione del tempo è una semplice senoide di ampiezza costante. Di conseguenza il

moto armonico è completamente descritto da soli tre parametri: il tempo periodo dell'oscillazione (o la sua frequenza), l'ampiezza dell'oscillazione, e la sua fase (che indica la posizione iniziale dell'oscillazione).

E' importante notare come supponendo che la velocità di un punto segua la legge armonica, allora anche l'accelerazione (derivata) e la posizione (integrale) di quel punto seguono una legge armonica.

Generalmente il moto oscillatorio di una sorgente è descritto dalla funzione:

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (23)$$

Dove A è l'ampiezza della sinusoide, è la ω velocità angolare [rad/s], legata al periodo T [s] dalla seguente relazione , mentre φ è la fase [rad], essa specifica la posizione iniziale della sorgente all'istante $t=0$, difatti

$$y(0) = A \sin(\varphi) \quad (23.1)$$

In questo caso diciamo che la sorgente oscilla di moto armonico, e quindi essa produce un'onda armonica.

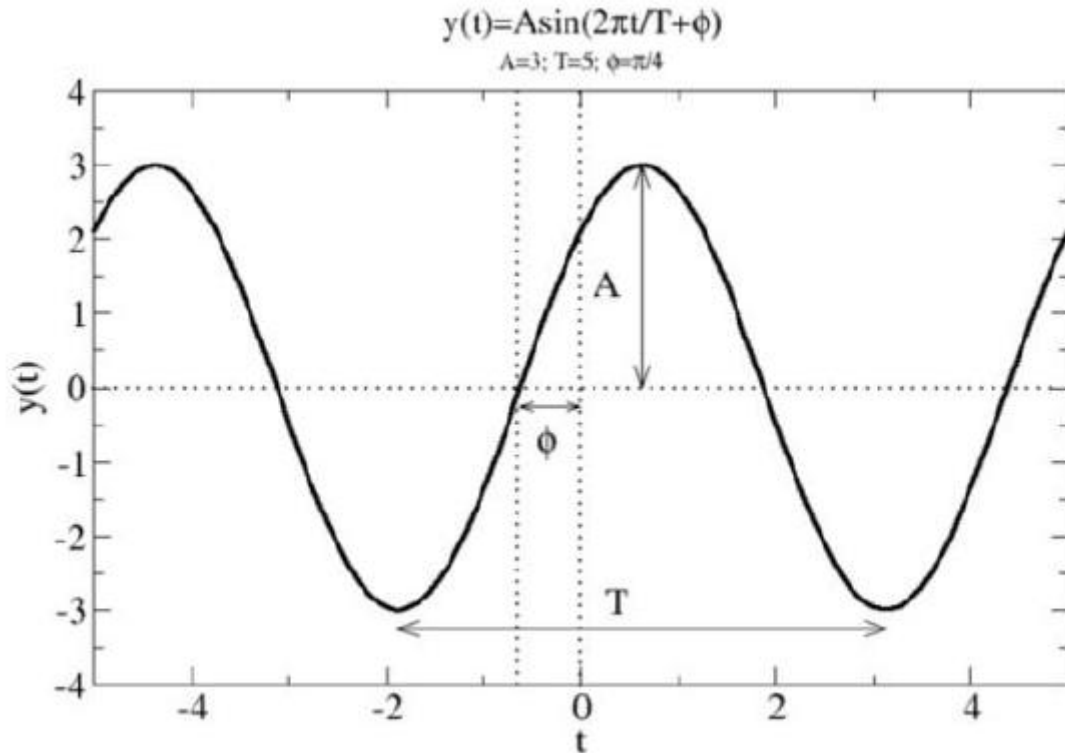


Figura 23: onda armonica

6. REALIZZAZIONE DEL MISURATORE

Gli ultrasuoni sono onde meccaniche sonore a frequenze superiori ai 20kHz. I misuratori che si andranno a realizzare si distinguono principalmente fra:

- Misuratori per liquidi;
- Misuratori per gas.

Nel primo caso si pensa per praticità di utilizzare come sistema di acquisizione una scheda Maxim MAX35103, un kit che restituisce come output il TOF_diff (Time Of Flight differential) e consente di impostare vari parametri di misura, quale ad esempio la frequenza di acquisizione. La scelta è determinata dal fatto che per la misura in liquidi tipicamente

si usano trasduttori ultrasonici da 1MHz e questa scheda ha settaggi di base per funzionare bene con queste frequenze anche se è possibile variarle fino ad un minimo di 125kHz.

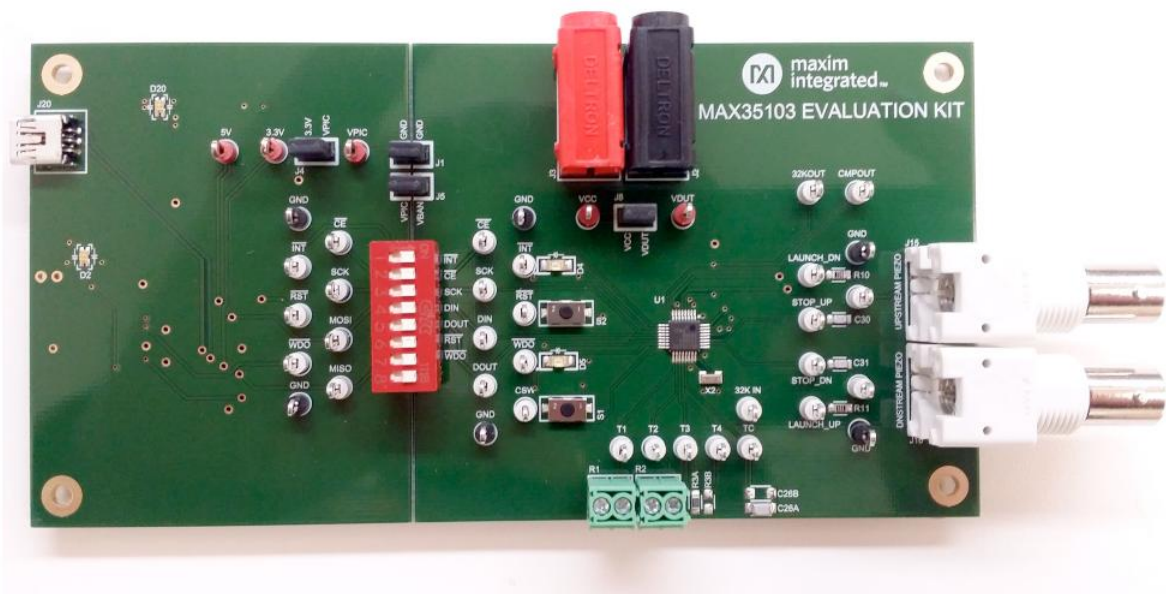


Figura 24: MAX 35103

Nel secondo caso, misura di gas, il discorso è più complicato. Prima di tutto non si possono usare trasduttori con frequenze nominali elevate in quanto la velocità del suono per questi fluidi è tipicamente molto bassa (343 m/s nell'aria a temperatura ambiente).

Per misurare efficacemente una differenza di tempo fra l'onda emessa e ricevuta da un trasduttore all'altro (dato che riporta alla velocità del fluido) occorre avere frequenze molto basse, tipicamente fra i 30 e i 200 kHz, per non avere fenomeni di interferenza fra un treno d'onda e il successivo o fra un treno d'onda di andata e quello di ritorno. In effetti provando a misurare una portata d'aria con la configurazione descritta per i liquidi non si misura nulla a prescindere della portata, ed il valore è superiore a quello di fondo scala per la scheda di acquisizione.

Dai datasheet Maxim ed osservando per verifica da oscilloscopio, sappiamo che la generazione e la ricezione del segnale acustico ha uno schema ben preciso come mostrato in figura seguente.

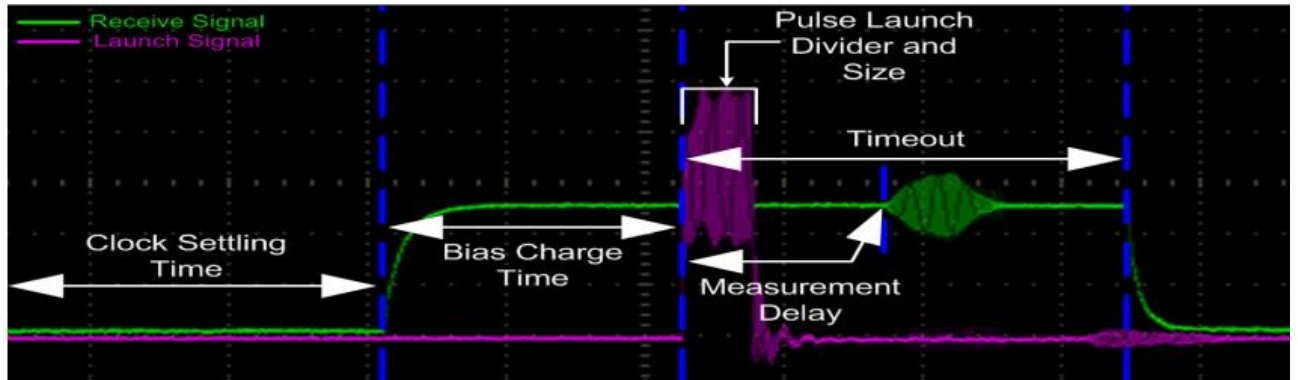


Figura 25: Diagramma impulsivi Maxim

Nella misura di portata aria con trasduttori ad alta frequenza nominale la linea verde che corrisponde alla ricezione del segnale emesso non appare in quella forma e di fatto non si misura nulla. Lo stesso problema lo si ha con i componenti commerciali, ad esempio provando sensori ultrasonici SONIC e Audiowell, quando si formano delle bolle in prossimità dei trasduttori.

All'atto pratico dunque si è optato per trasduttori Murata MA40, trasduttore a frequenza nominale di 40kHz, che di fatto hanno consentito di visualizzare il segnale in ricezione.



Figura 26: Murarata MA40

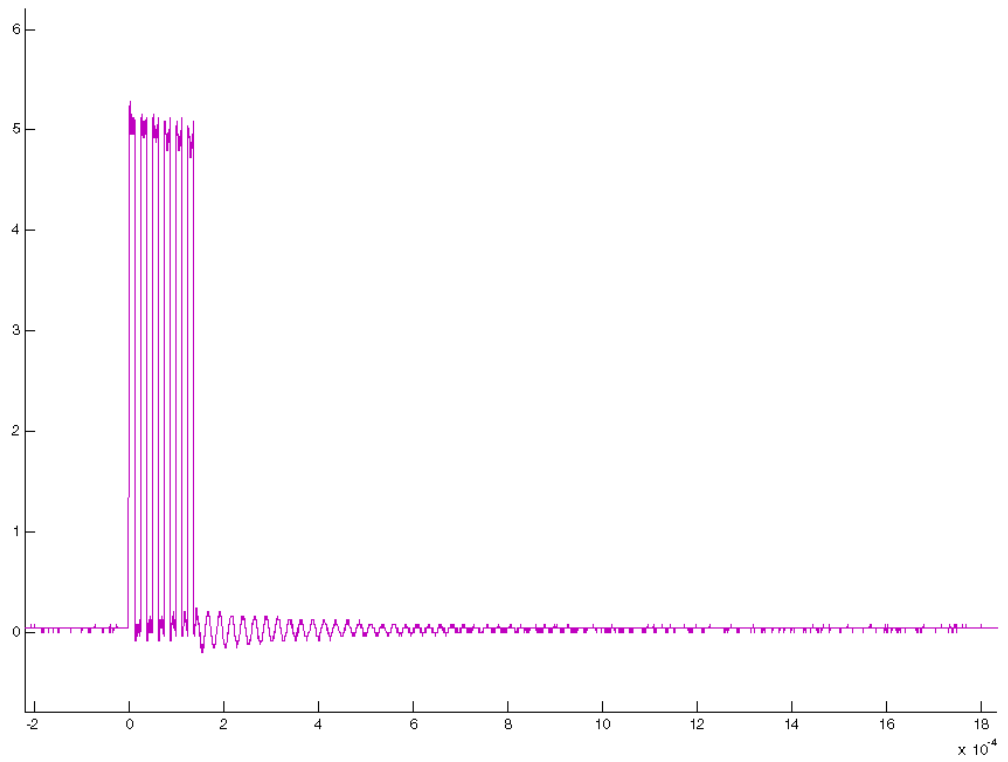


Figura 27: Launch signal 40kHz in air

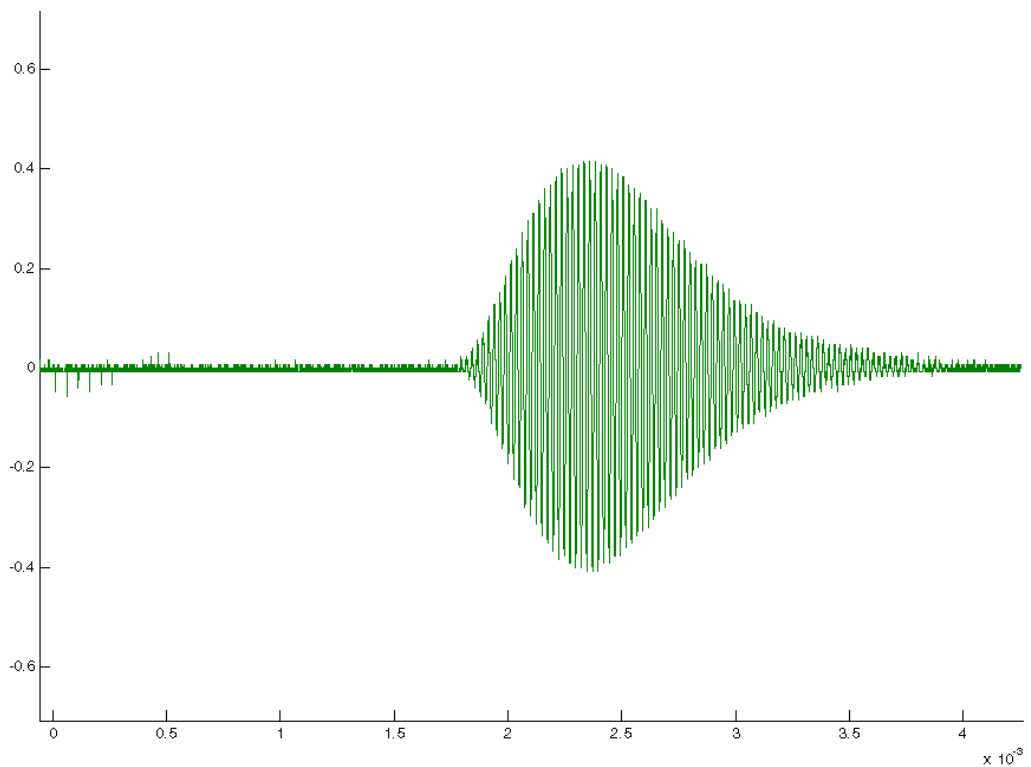


Figura 28: Receive signal 40kHz in air

I dati utili alla generazione di questi grafici sono stati salvati da oscilloscopio, mentre l'eccitazione dei trasduttori è effettuata da CompactRio grazie ad un programma LabVIEW realizzato dall'Ingegnere Roberto Bertacin.

Fatta la premessa sulla tipologia dei trasduttori ora si deve pensare alla geometria del tubo. Le configurazioni possibili sono innumerevoli: flusso rettilineo e trasduttori verticali e percorso d'onda specchiato oppure flusso rettilineo e trasduttori inclinati rispetto al flusso ma affacciati l'uno all'altro, ecc. Le considerazioni sulla posizione dei trasduttori va unita alle caratteristiche di impianto nel quale verrà collocato il misuratore.

Per questo si è disegnato un primo tubo per i liquidi, come nella figura seguente, che è stato realizzato tramite una stampante 3D, essendo di fatto un vero prototipo.

La geometria scelta in definitiva prevede ingresso e uscita fluido con disposizione a “V” mentre i trasduttori sono montati uno di fronte all’altro orizzontalmente rispetto alla V come si vede di seguito in figura.

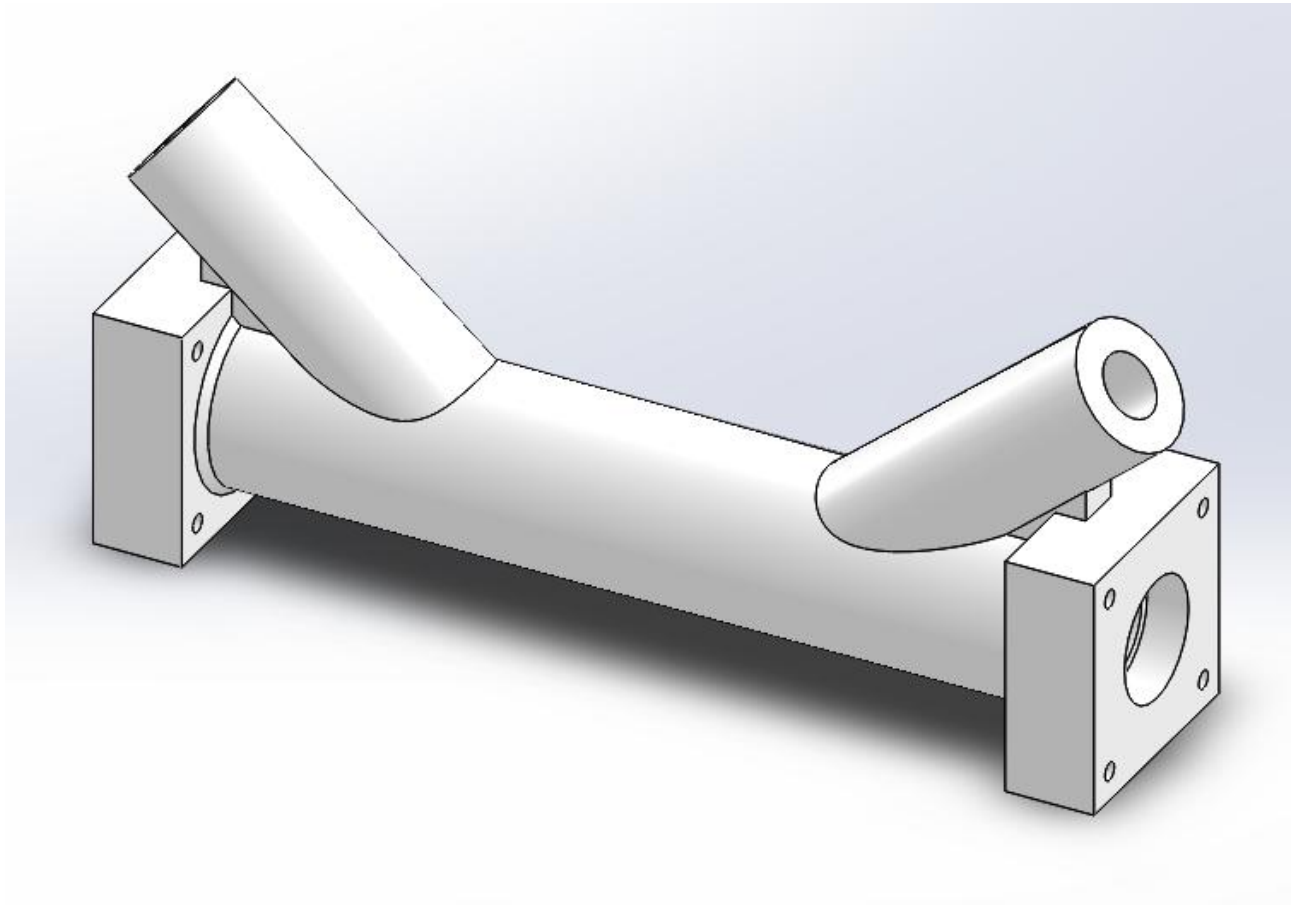


Figura 29: Tubo per liquidi in abs

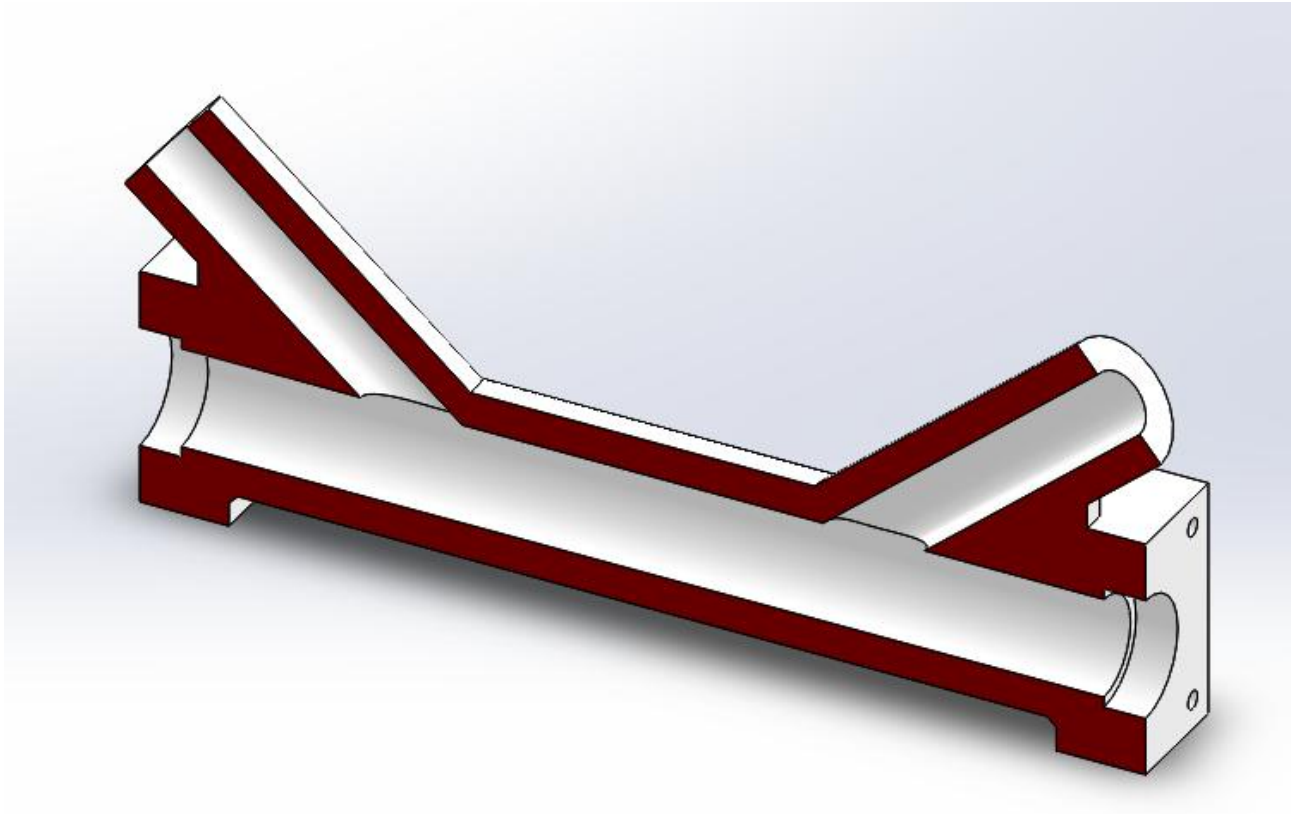


Figura 30: Sezione del tubo in abs

Questo design presenta il vantaggio che misurare la distanza fra i trasduttori è molto semplice rispetto ad altre disposizioni; inoltre consente di montare lo stesso strumento anche su tubazioni dal diametro molto ridotto come quelle ad esempio del carburante (7-10 mm). Il difetto di questa geometria è rappresentato dalle zone di ristagno che si possono creare nel volume evidenziato nella figura seguente.

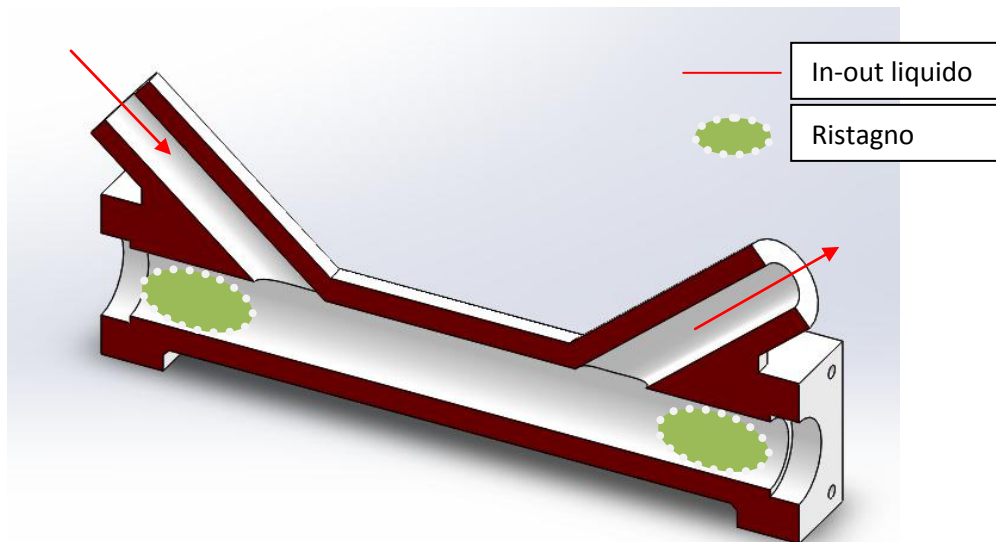


Figura 31

Tuttavia questo inconveniente può essere superato con una progettazione più accurata anche sfruttando simulazioni cfd; tuttavia per un primo step di studio non è necessario, in quanto il ristagno aumenta il rumore nella misura ed in casi estremi porterebbe alla lettura di una velocità non effettiva (gli ultrasuoni sarebbero influenzati dalla velocità dei vortici oltre che dalla velocità reale del fluido); ma non ha alcun effetto sul principio di misura quindi sul voler dimostrare la fattibilità.

La strada scelta per il misuratore per portate d'aria è differente.

Si è pensato ad un tubo di diametro maggiore, nello specifico 60mm, nel quale il canale del fluido è rettilineo mentre presenta due possibili disposizioni per i trasduttori:

- In linea
- A V

La principale differenza che ci si aspetta è un aumento di risoluzione passando dalla configurazione in linea ad una configurazione a V,

essendo di fatto la lunghezza del percorso onda circa doppia rispetto che nel caso in linea, anche se perde in prontezza dovendo attendere un tempo maggiore per ricevere l'onda emessa.

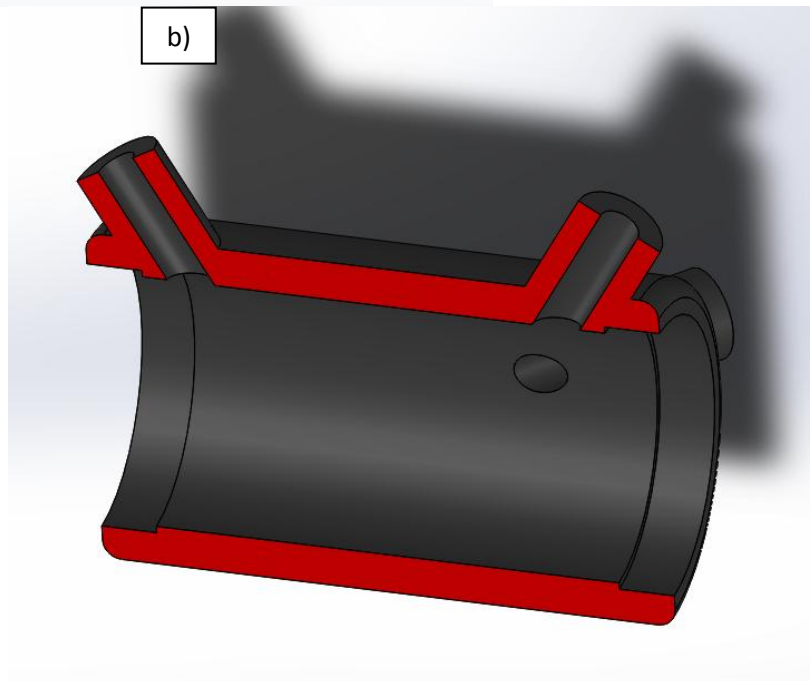
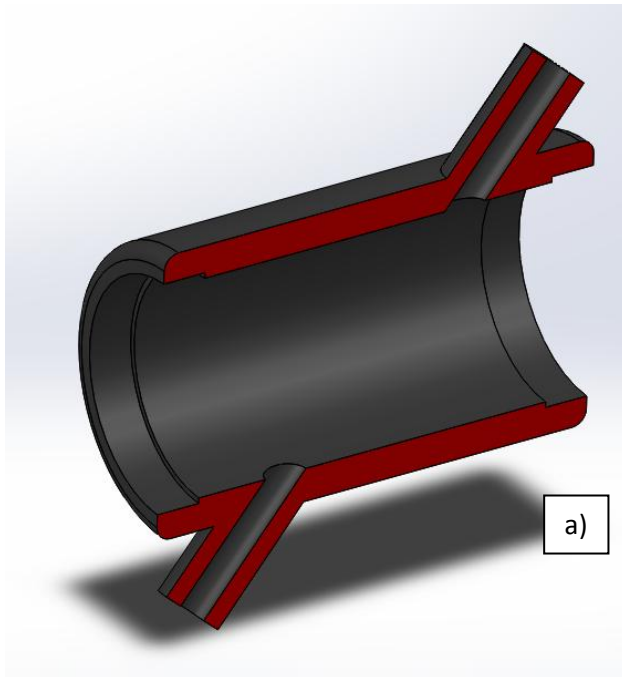


Figura 32: Tubo per portate d'aria e relative sezioni: a) configurazione in linea; b) configurazione a V.

Nota: in questo caso l'aumento di diametro nell'estremità del canale per il passaggio fluido serve unicamente per il calettamento del misuratore nell'impianto e non, come nel caso del misuratore per liquidi, per il montaggio dei trasduttori.

La produzione di questi componenti è stata piuttosto semplice. Dopo la fase di modellazione a cad, software utilizzato SolidWorks, si sono estratti i file in formato .step dei design definitivi e li si è fatti elaborare dal software di controllo della macchina di prototipazione rapida (comunemente stampante 3D) che ha convertito le coordinate del file cad in linguaggio macchina. Infine questa moderna macchina ha provveduto a "stampare" i componenti depositando materiale plastico a strati fino a generare il volume definitivo.

Questa tecnologia è sì molto comoda perché consente di essere molto creativi nel generare le geometrie e molto rapidi nell'ottenere un prodotto, ma è anche poco precisa rispetto a tecnologie per asportazione di truciolo. Infatti un problema che si è dovuto affrontare è stato quello dimensionale. Essendo il pezzo prodotto per strati di plastica fusa, naturalmente le tolleranze in termini di cilindricità o planarità sono molto basse, dunque nei punti di calettamento, dei trasduttori in particolare, è stata necessaria una ripassata alle macchine utensili. Intervento questo molto semplice e che non ha causato ritardi. Tuttavia un secondo problema è nato per il misuratore per portate di liquidi: la porosità. Al fine di risparmiare materiale e produrre più velocemente il prodotto, la stampante 3D crea il volume interno a struttura alveolare. Di norma questo non comporterebbe delle problematiche, tuttavia essendo presente un fluido in pressione all'interno, esso in qualche modo riesce ad uscire all'esterno passando per i "vuoti" del reticolo interno. Dall'esterno la superficie del misuratore

si presenta come “sudata”. Il problema è stato temporaneamente risolto isolando con prodotti siliconici la superficie esterna del tubo, sicuri del fatto che in campo industriale di certo la prototipazione rapida non è la tecnologia che darebbe origine a questi prodotti, bensì tecnologie come inietto-fusioni di plastiche o lavorazioni dal pieno di metalli, che non presentano problemi di porosità.

7. ALLESTIMENTO DEI BANCHI PROVA

Sono stati preparati due banchi prova per effettuare le prove di misurazione, uno per i liquidi ed uno per l’aria.

Quello per i liquidi è piuttosto semplice: prevede un serbatoio contenente acqua(1), una pompa ad ingranaggi (2) azionata da un inverter a frequenza regolabile (3); poi in successione, invertendo la posizione reciproca nelle varie prove, il misuratore ultrasonico SONIC (4), il misuratore ultrasonico stampato (5), che chiameremo d’ora in avanti Rapid, il misuratore ultrasonico Audiowell (6), ed un misuratore a turbina (7), che ha l’importante funzione di dare in output il valore di portata e non un tempo, di modo che si possa effettuare un confronto con una misura attendibile di portata e non un tempo come nel caso degli altri due sensori commerciali.

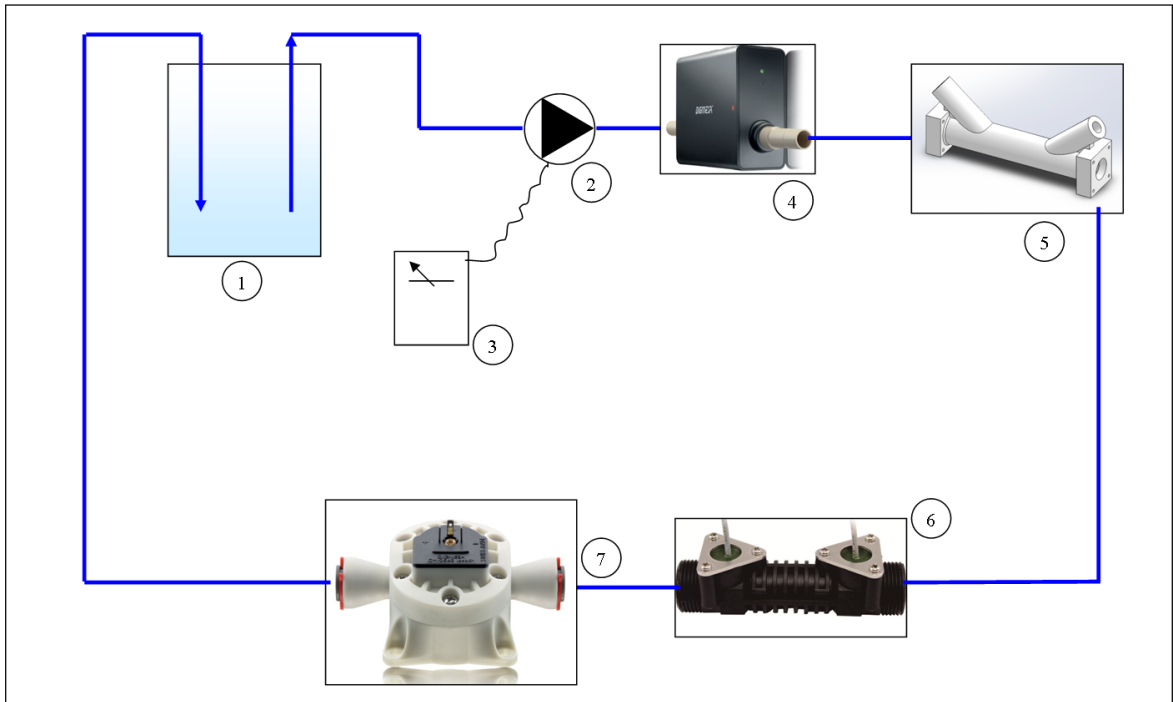


Figura 33: Schema di impianto prove acqua

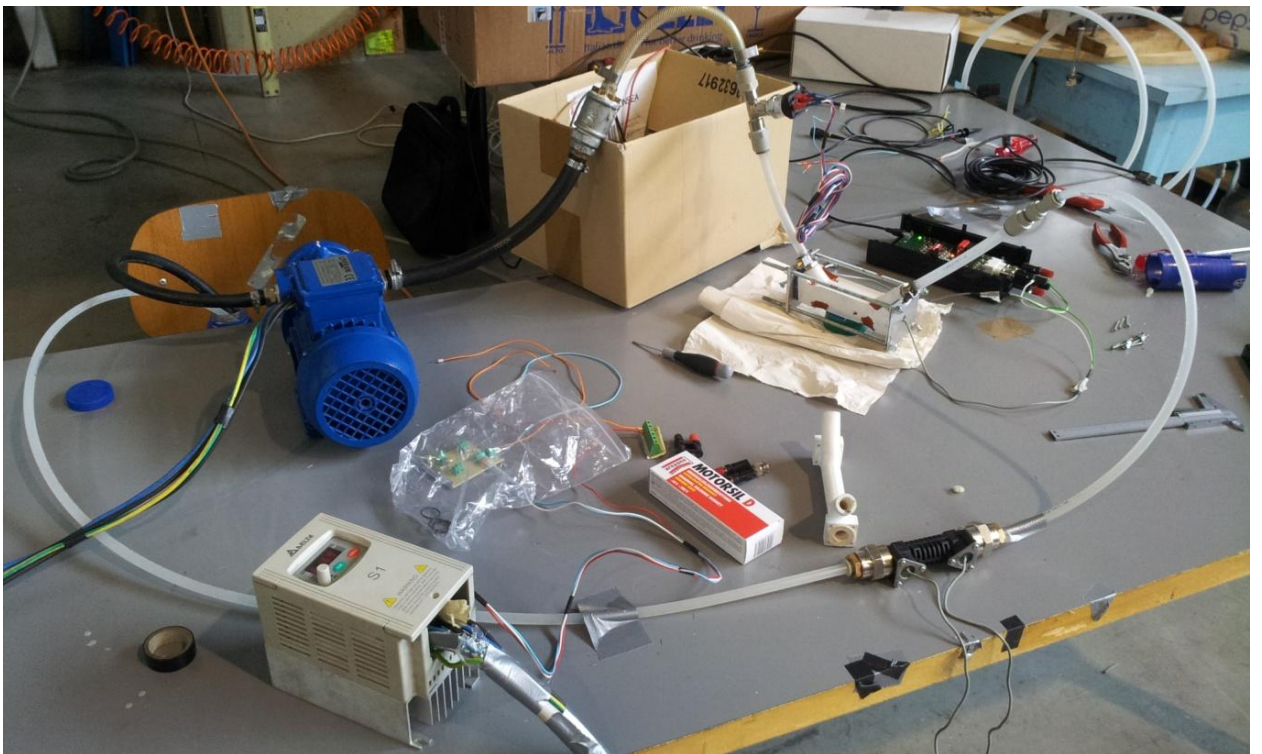


Figura 34: Banco prove acqua

Le acquisizioni di turbina e SONIC avvenivano da CompactRIO, mentre Audiowell e Rapid venivano acquisiti alternativamente tramite Maxim MAX35103.

Dopodiché tutti i dati venivano elaborati attraverso uno script matlab appositamente creato per aprire i file .tsv o .csv forniti da Maxim e cRIO e calcolare le portate, plottare i grafici e calcolare la standard deviation.

Le prove di misura portata aria sono state condotte direttamente su un banco prova motori. Come misuratore commerciale di riferimento di è utilizzato l'AirRate FEV. La configurazione è la seguente: motore Ducati montato al banco freno (1), a monte dell'air box del propulsore sono montati l'AirRate FEV (2) ed il misuratore stampato (3), che chiameremo RapidPro.

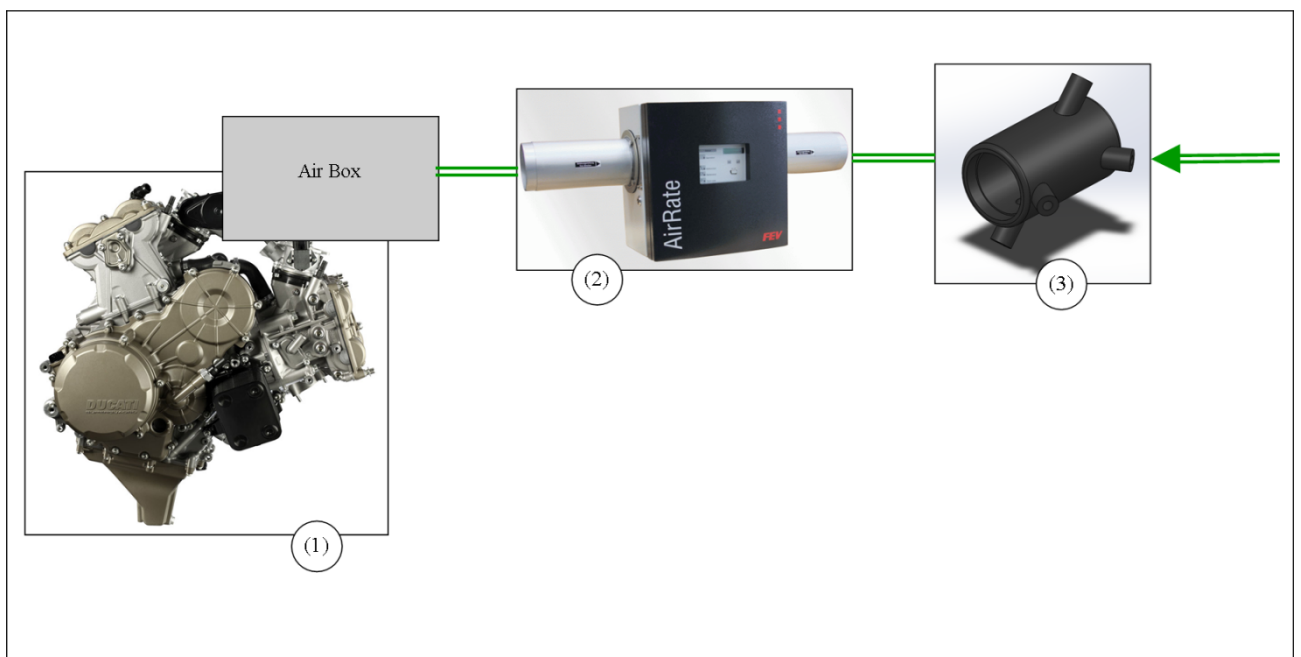


Figura 35: Schema del banco prova motori sul quale vengono condotte le misure di portata aria.

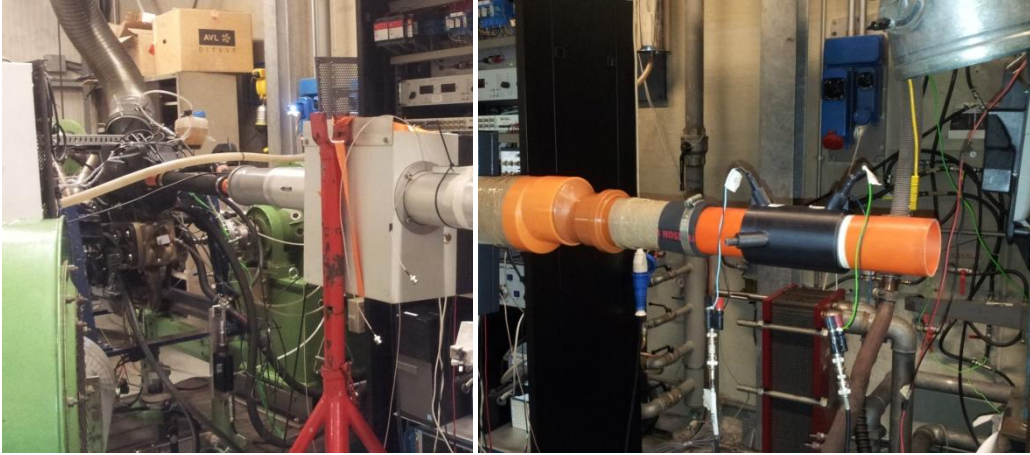
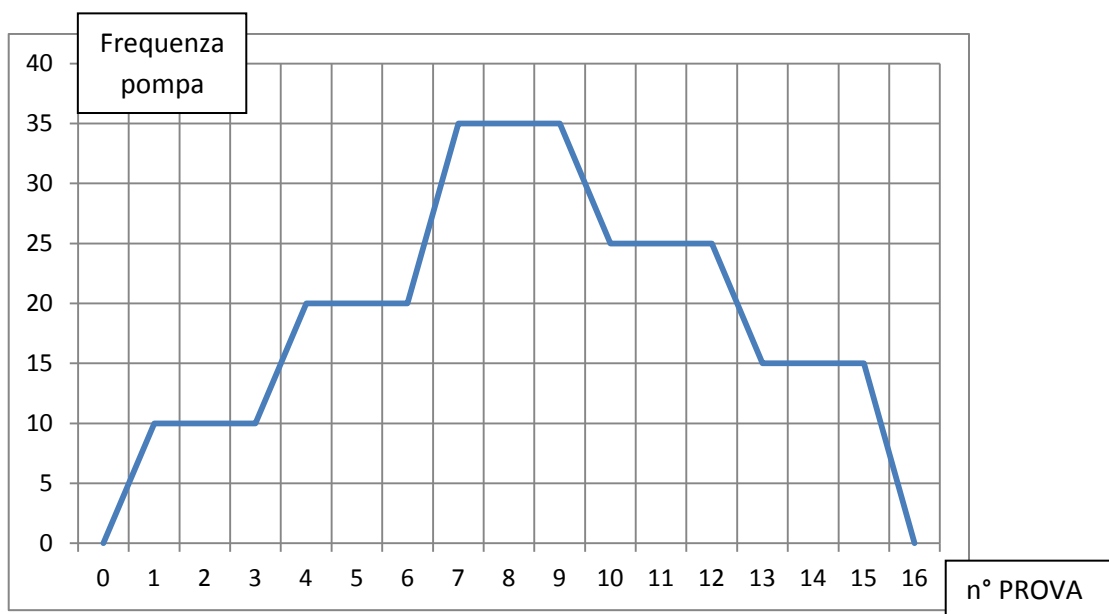


Figura 36: Panoramica banco allestito

8. MISURE

8.1 Tipi di misura

Liquidi: per i liquidi sono state effettuate diverse prove aumentando progressivamente la portata fino ad un valore massimo per poi tornare a flusso fermo. La variazione di portata è determinata dal cambiamento di frequenza di eccitazione del motore elettrico che comanda la pompa ad ingranaggi. L'aumento e il calo di portata è stato fatto a "scalini", cioè si passa in breve tempo da un valore di portata ad un altro distinto e lo si mantiene per un determinato tempo (vedi esempio grafico), in modo da stabilizzare il flusso e raccogliere più informazioni su ogni valore di portata.



Questo tipo di prova è stato eseguito più volte invertendo la posizione dei vari misuratori rispetto alla pompa, per cercare eventuali dipendenze dell'output dalla configurazione impianto, ed ha avuto lo scopo di portare considerazioni generali sulle differenze e sulle caratteristiche principali dei misuratori, quindi ad una valutazione qualitativa del misuratore prototipo.

Successivamente, per una valutazione quantitativa delle prestazioni del misuratore abbiamo eseguito varie prove a portate fisse e nelle medesime configurazioni di impianto. Questo ci ha dato modo di elaborare i valori di TOF_diff in funzione della portata fra i sensori ultrasonici e calcolare la standard deviation su un punto di portata specifico.

Gas: non avendo a disposizione una scheda di acquisizione completa come nel caso dei liquidi, la misura che si va ad effettuare in questo caso è diretta sul segnale, che poi verrà rielaborata in matlab. Ovvero tramite cRIO si generano un determinato numero di impulsi ad una frequenza nota, inizialmente quella nominale dei trasduttori (40kHz), poi attraverso oscilloscopio oppure tramite cRIO e LabVIEW vengono acquisiti i segnali di eccitazione dell'emettitore e di ricezione del ricevitore ed associati al valore di portata indicato dall'AirRate FEV. Ciò che ci si aspetta dunque è che variando la portata, ovvero variando il numero di giri di rotazione del motore aprendo o chiudendo la valvola a farfalla, è che i segnali rimangano invariati, ma che quello di ricezione venga letto più tardi all'aumentare della portata. Quando si elaborano questi dati (in Volt dunque) si può calcolare la variazione di tempo fra un segnale ad una certa portata e l'altro, calcolare la portata avendo ricavato la velocità dal Δt e a questo punto fare un confronto con il misuratore FEV.

Come percorso è sicuramente più elaborato, tuttavia la preparazione di una scheda elettronica che sintetizzi tutti questi passaggi e dia come output direttamente il valore di TOF come Maxim non è materia di questa tesi e richiederebbe molte ore di sviluppo.

I parametri che è possibile impostare per la generazione del segnale sono la frequenza di pulsazione dell'onda emessa (Pulse_Freq), il

numero di pulsazioni (N_{pulses}), e l'intervallo di tempo fra un treno d'onde e il successivo (Ping Period).

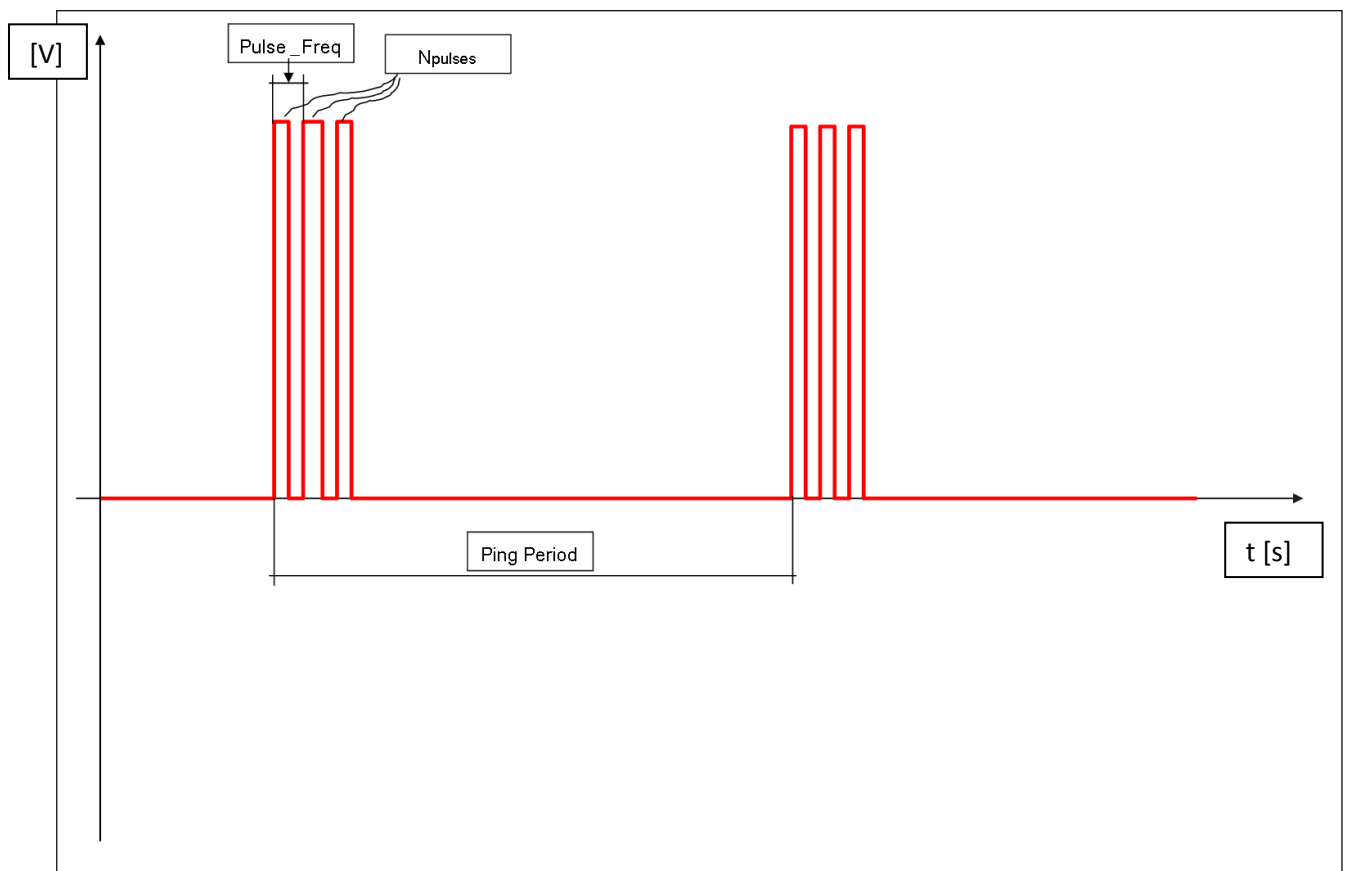


Figura 37: Schema della forma del segnale emesso

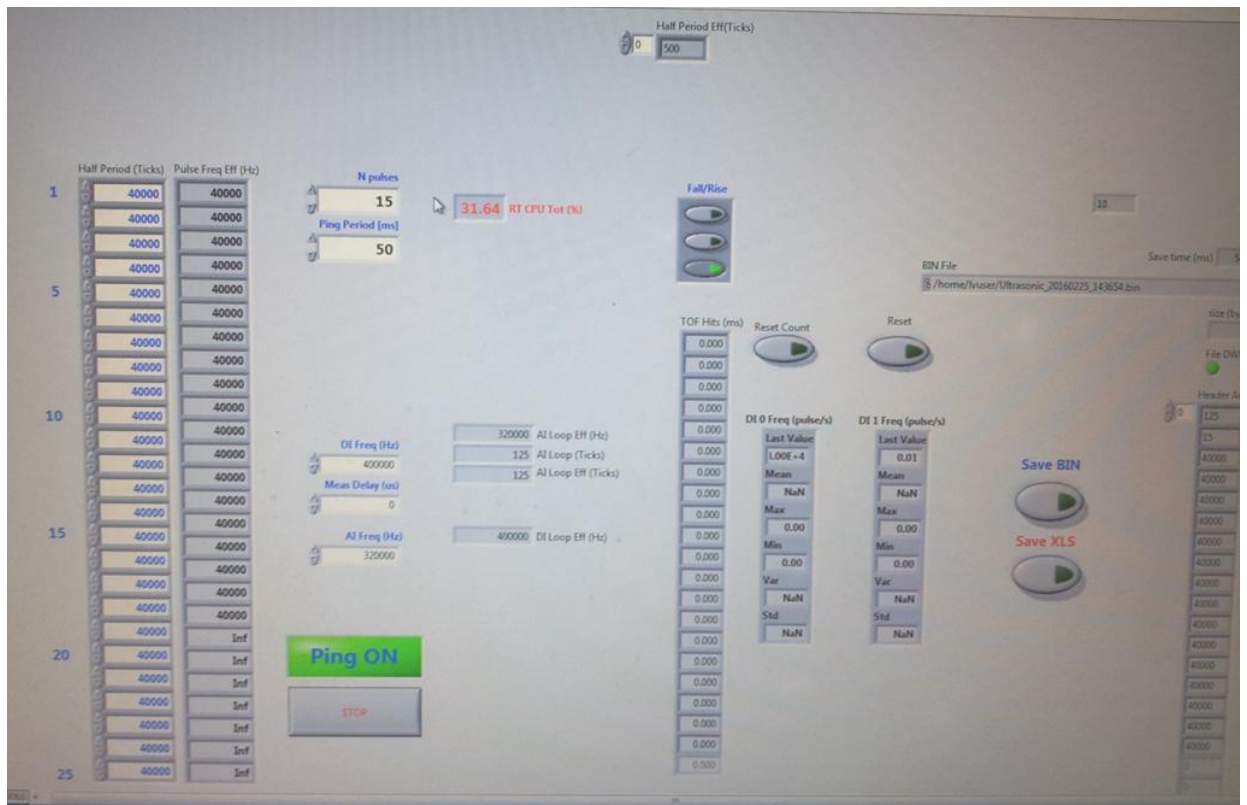


Figura 38: Interfaccia LabVIEW per il settaggio del segnale emesso

Come si può vedere nella colonna di valori a sinistra dell'interfaccia LabVIEW è possibile impostare la frequenza di pulsazione di ogni pulsazione emessa dal trasduttore ultrasonico emettitore (sender). Naturalmente non ha senso discostarsi troppo dal valore nominale di frequenza del trasduttore, altrimenti non si “vede” nulla.

Tuttavia poter modificare la frequenza di un determinato impulso può risultare utile nella successiva fase di riconoscimento delle onde, qualora si verifici una significativa modifica del segnale ricevuto, oppure per trarre ulteriori considerazioni nel caso si legga nel trasduttore ricevitore (receiver) un segnale più o meno pulito (nei capitoli seguenti verranno approfonditi questi temi).

8.2 Sistemi di acquisizione

Maxim MAX35103: Il kit fornisce l'hardware e software di interfaccia utente grafica (GUI) necessari a valutare il tempo di volo del segnale ad ultrasuoni e anche di temperatura.

Il TOF è misurato lanciando impulsi da un trasduttore piezoelettrico e ricevendoli su un secondo trasduttore. Il tempo che intercorre tra gli impulsi lanciati e ricevuti è definito come il tempo di volo. Il MAX35103 contiene le funzionalità necessarie per creare una serie di impulsi, percepire la stringa impulso di ricezione e misurare il tempo di volo.

La MAX35103 può misurare due TOF separati, che sono definiti come TOF_up e TOF_down.

Una misurazione TOF_up ha impulsi lanciati dal perno LAUNCH_UP, che è collegato al trasduttore downstream. L'impulso ultrasonico ricevuto al trasduttore a monte (rispetto alla direzione del flusso), che è collegato al perno STOP_UP. Una misurazione TOF_down ha impulsi lanciati dal perno DN_LAUNCH, che è collegato al trasduttore upstream. L'impulso ultrasonico è ricevuto dal trasduttore a valle, che è collegato al perno STOP_DN.

Misurazioni di TOF possono essere avviate con l'invio di entrambi i comandi TOF_UP, TOF_DN o TOF_DIFF.

I passi necessari per una singola misura TOF vengono descritti e mostrati in figura.

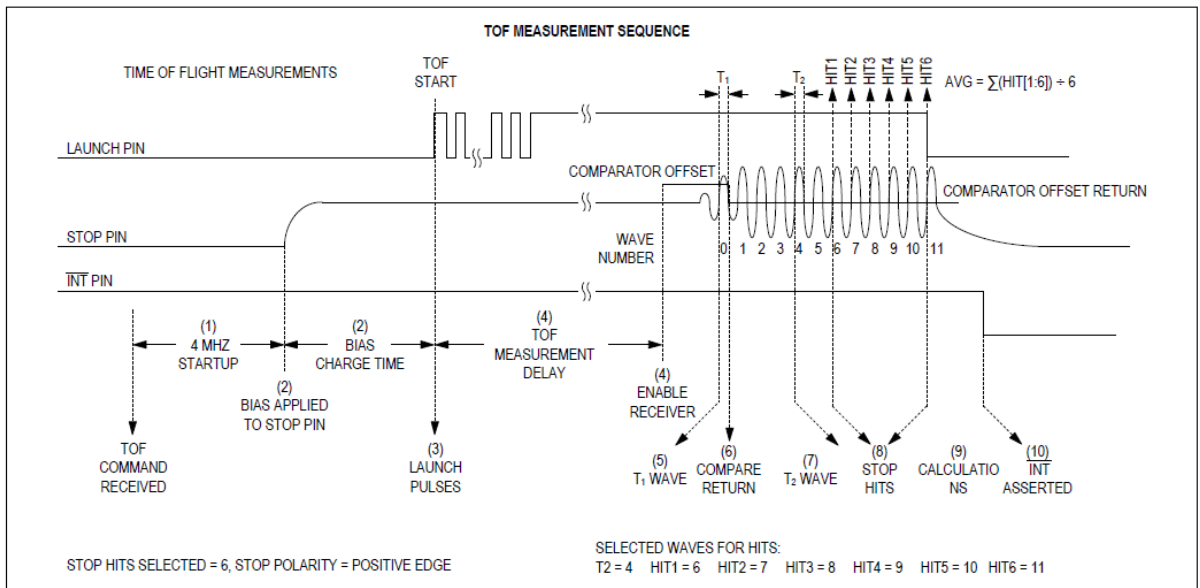


Figura 39: Time of flight sequence

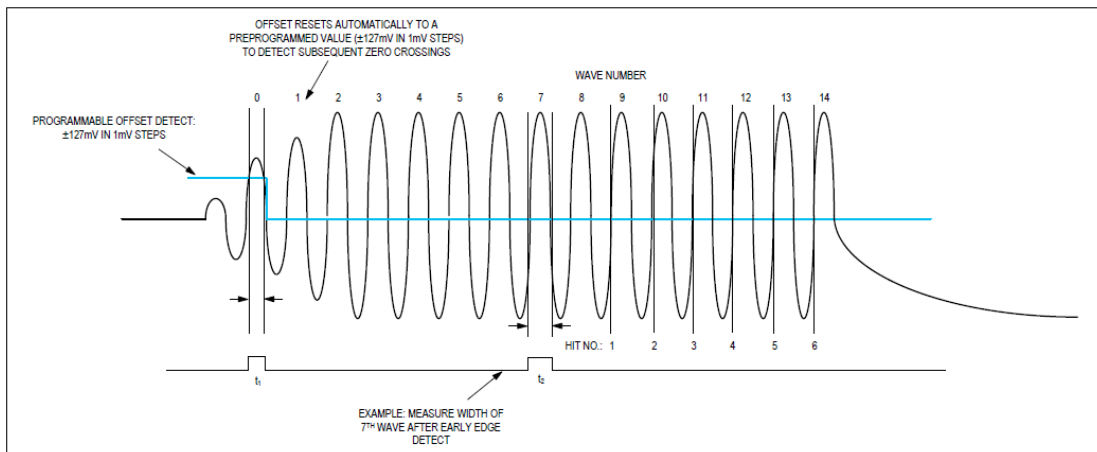


Figura 40: Offset sul segnale ricevuto

Dopo un tempo di ritardo programmabile (4) impostabile dall'utente, il comparatore rileva un valore soglia di tensione (offset) nel segnale ricevuto (STOP PN). La prima onda che supera il valore soglia è battezzata come "onda 0". Questo procedimento permette di ridurre il rumore in acquisizione.

La larghezza dell'impulso dell'onda che supera la tensione di offset del comparatore viene misurata e memorizzata come tempo t1.

L'onda t2 viene rilevata e la larghezza dell'impulso t2 viene misurata e memorizzata come il tempo t2. Il numero d'onda per la misura del t2 (nella figura 39 la numero 4, nella figura 40 la numero 7) è impostabile dall'utente tramite il software.

Poi vengono rilevati il numero di onde (impostato dall'utente) HIT, ovvero i fronti di salita di un numero di onde (tipicamente 6) successivi all'onda t2.

Dopo aver ricevuto tutti gli HIT programmati, il MAX35103 calcola la media dei valori registrati e li salva in nelle tabelle AVGUPINT e AVGUPFrac o AVGDNInt e AVGDNFrac.

Il calcolo del tempo totale di volo viene eseguito contando il numero di cicli completi e frazionari, del clock a 4MHz, intercorsi tra l'inizio lancio e un arresto hit come mostrato in figura.

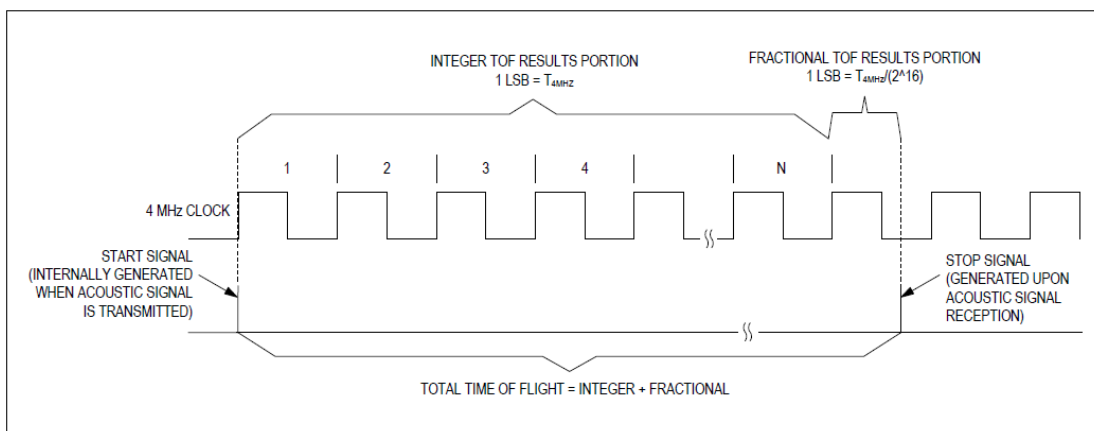


Figura 41: Clock counting Maxim

Il controller utilizzato per l'acquisizione dati nelle prove con aria è NI cRIO-9082 RT, il quale presenta le seguenti caratteristiche:

- Sistema multicore a prestazioni elevate per applicazioni di monitoraggio e controllo embedded complesse
- Processore 1.33 GHz dual-core Intel Core i7, memoria non volatile 32 GB, 2 GB DDR3 800 MHz RAM
- LabVIEW Real-Time per determinismo e affidabilità per operatività continua
- 1 MXI-Express, 4 USB Hi-Speed, 2 Gigabit Ethernet, 2 porte seriali
- Chassis 8-slot FPGA per funzioni personalizzate di temporizzazione, controllo ed elaborazione I/O
- Temperatura operativa da 0 a 55 °C

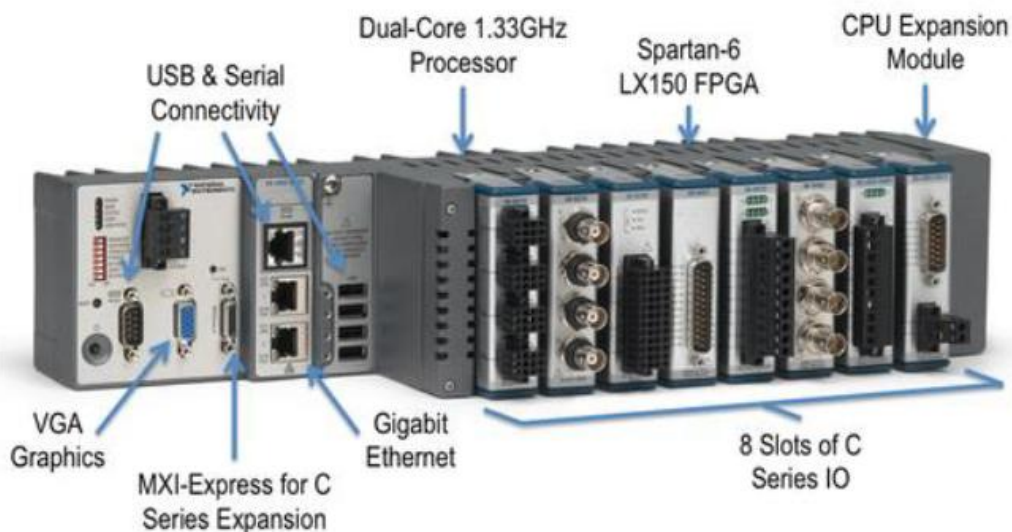


Figura 42: cRIO-9082RT

È disponibile una grande varietà di tipi di I/O . È possibile collegare direttamente i moduli con sensori ed attuatori, grazie al condizionamento del segnale integrato per intervalli estesi di tensione.

9. ANALISI DEI DATI

9.1 Liquidi

Come già detto le prime prove effettuate sono quelle “a scalini”.

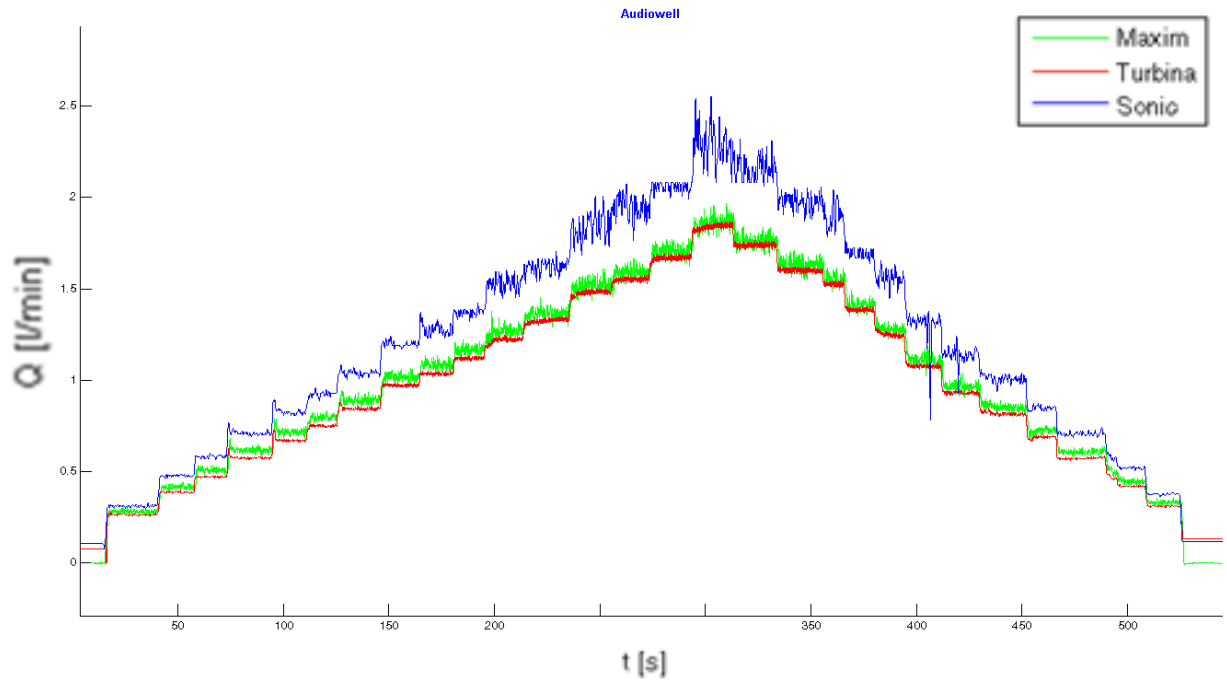


Figura 43: Prova a scalini con tubo Audiowell da Maxim

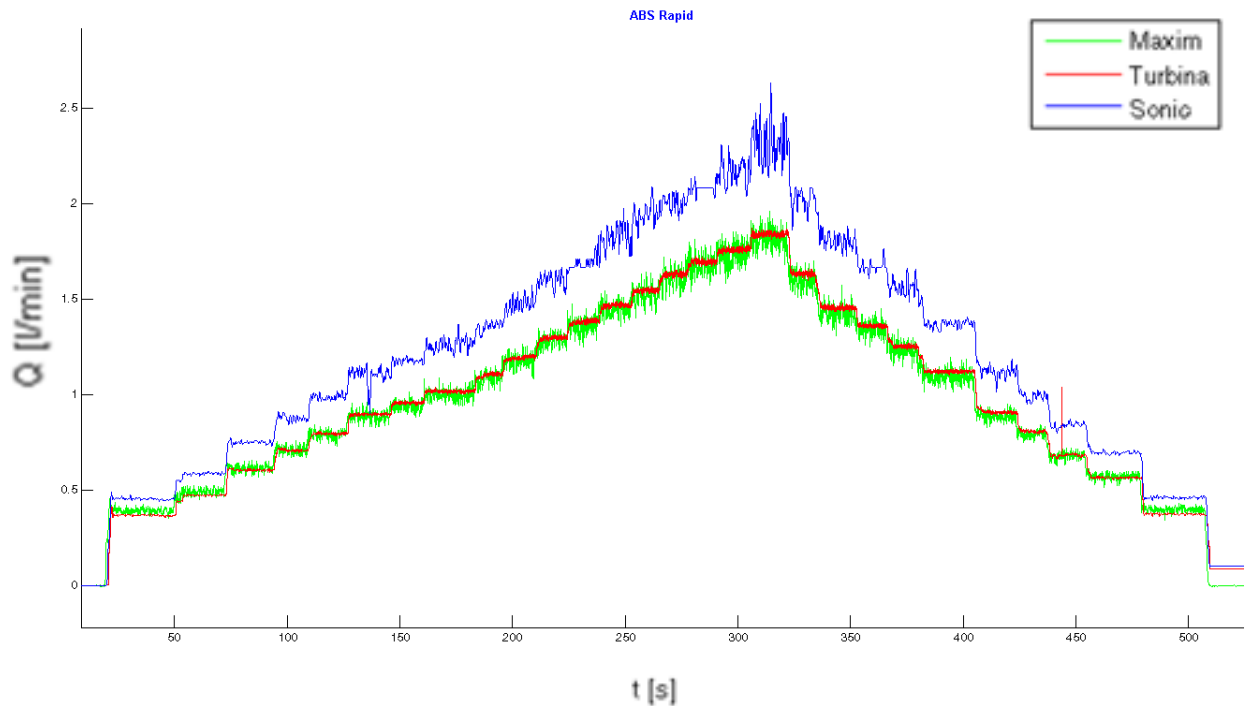


Figura 44: Prova a scalini con tubo Rapid da Maxim

Ciò che si nota a colpo d’occhio è quando il misuratore ultrasonico SONIC (linea in blu) sia decisamente inaffidabile per questo tipo di misura. Il rumore di questo segnale è talmente elevato da non notarsi nemmeno la differenza fra diversi “scalini” di portata, in particolare nei valori più alti.

Nota: il segnale SONIC è filtrato tramite la funzione `filtfilt` di matlab, filtro Zero-phase, con media mobile a 8 campioni..

Il misuratore a turbina risulta invece poco rumoroso, ma questo probabilmente non dipende da buone prestazioni del misuratore bensì da una scarsa prontezza in dinamica, tanto da non risentire delle pulsazioni di portata generate dalla pompa ad ingranaggi.

Infatti, a meno del rumore, anche nel tubo audiowell si presentano fluttuazioni repentine del segnale e ciò fa pensare che dipenda dall’impianto.

Nel confronto Rapid vs Audiowell, acquisiti entrambi da Maxim, il primo si presenta qualitativamente più rumoroso, ma va detto che nella prova presentata dal grafico il Rapid era più vicino alla pompa rispetto al tubo Audiowell, dunque è possibile che risentisse in forma maggiore delle pulsazioni dovute a questa particolare macchina.

Di seguito viene presentata una diversa configurazione di impianto, ovvero nella quale il Rapid si trova per ultimo.

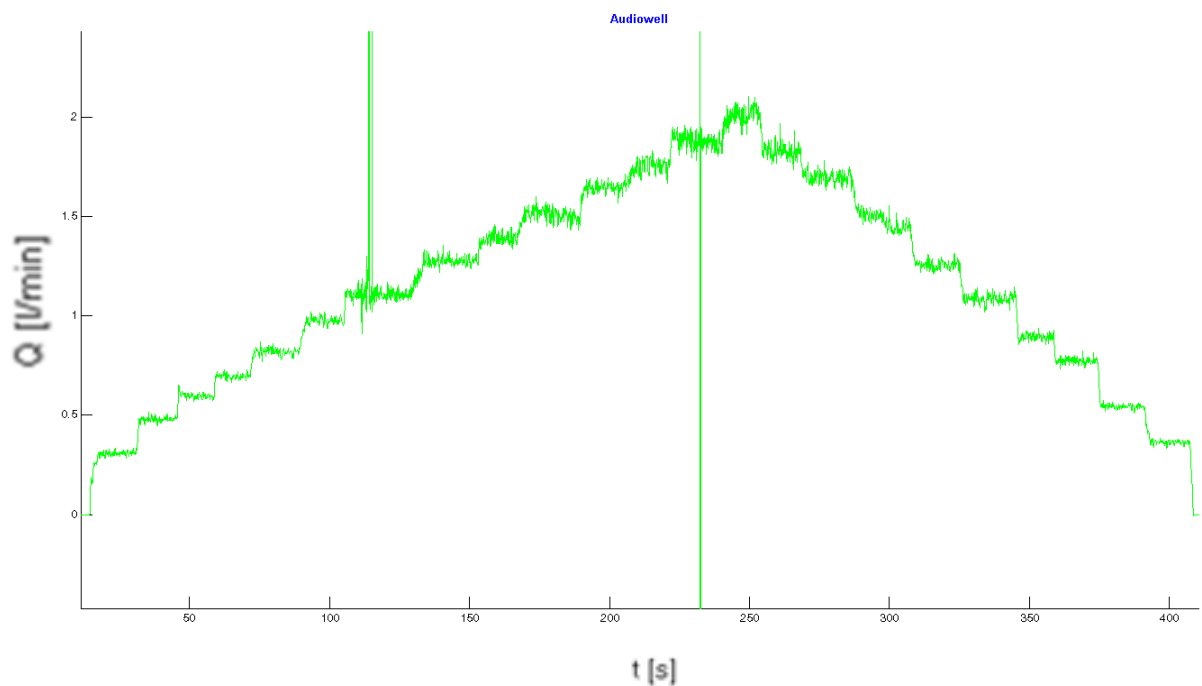


Figura 45: Tubo Audiowell da Maxim, config. 2

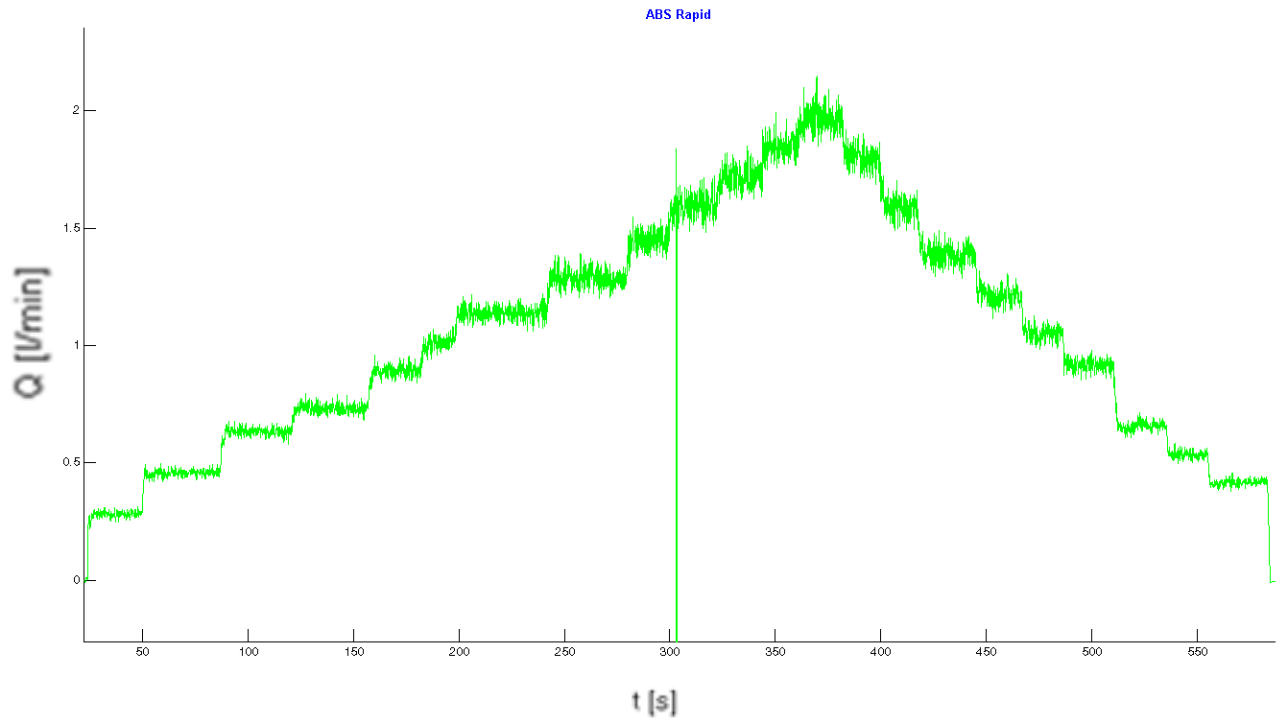


Figura 46: Tubo Rapid da Maxim, config. 2

Nonostante la variazione di posizione il Rapid si presenta ancora più rumoroso rispetto al tubo Audiowell. Questo fa pensare dunque che il rumore sia dovuto alla geometria e questo è plausibile, primo perché è il primo prototipo di misuratore, secondo perché la superficie interna presenta molte irregolarità dovute alla porosità ed alla tecnologia di realizzazione del Rapid, che possono portare alla formazione di micro turbolenze e bolle. Mentre sul tubo Audiowell, nonostante la presenza di specchi, il profilo di velocità è piuttosto regolare.

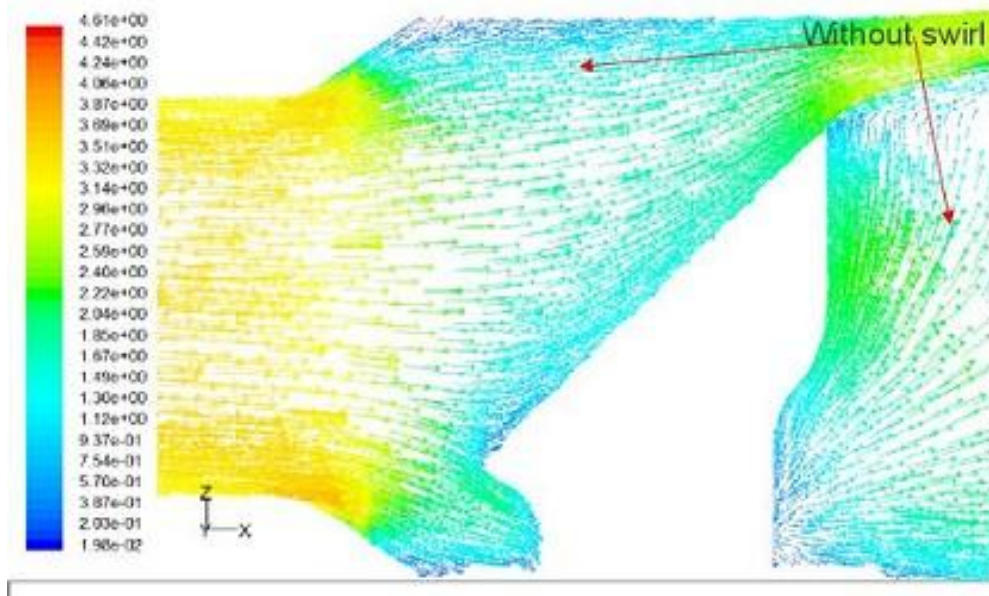


Figura 47: CFD del tubo Audiowell, immagine fornita nel datasheet sul sito www.audiowell.com

Tuttavia i risultati ottenuti sono incoraggianti perché non sono anomali; quindi la considerazione è che vale la pena fare una valutazione più accurata dell'entità della rumorosità.

Per questo sono state condotte più prove a portata fissa.

Per ognuno dei due sensori a confronto si acquisisce il TOF_diff, che è proporzionale alla portata, e lo si va a graficare in funzione della portata, valore noto grazie al misuratore a turbina il quale su livelli circa costanti di flusso lavora molto bene.

Per ogni punto di TOF_diff e di portata è calcolata la standard deviation, in modo da ricavare un grafico TOF_diff / portata che mostri anche l'errore.

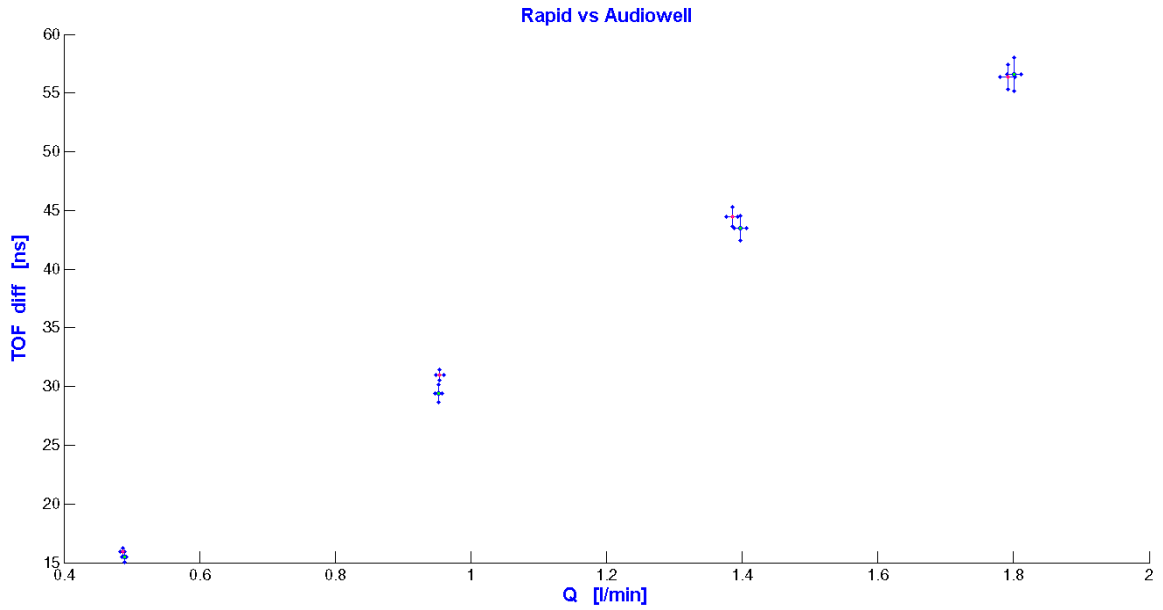


Figura 48: TOF_diff / Portata; su ogni punto è aggiunto l'errore di misura. Cerchio verde rappresenta il Rapid, mentre il diamante magenta Audiowell.

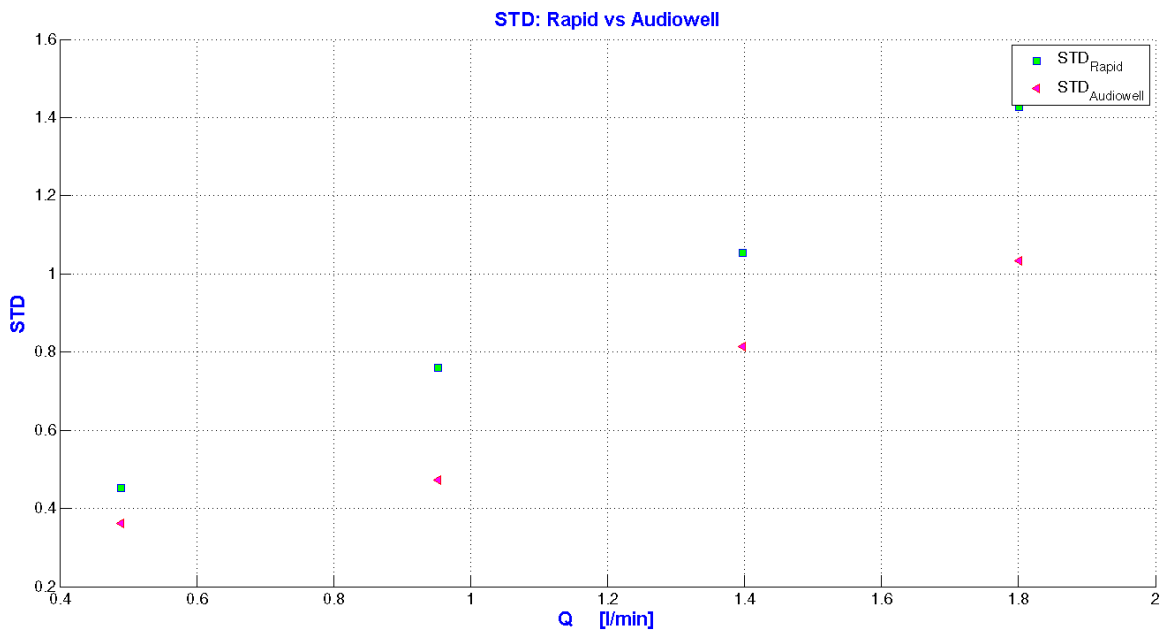


Figura 49: Standard deviation calcolata per ogni prova sul Rapid e su Audiowell

Come si era notato qualitativamente, questi grafici dimostrano che effettivamente la geometria Rapid risulta essere più rumorosa di quella Audiowell. In particolare però le condizioni peggiori si hanno nella seconda e nella quarta prova, ovvero per portate dell'ordine dei 0.95 e

1.79 l/min . Mediamente la standard deviation del misuratore Rapid è maggiore di un 25% rispetto a quella Audiowell. Tuttavia va considerato che la standard deviation media del misuratore Rapid è di 0.9236, per cui uno strumento dalla ripetibilità del 2,4%.

Nota: ripetibilità e accuratezza non sono la stessa cosa. La precisione, o anche ripetibilità, rappresenta la dispersione dei valori misurati, mentre l'accuratezza è lo scostamento dal valore nominale della misura. L'aspetto fondamentale è che l'accuratezza è correggibile con una adeguata calibrazione dello strumento, la ripetibilità no.

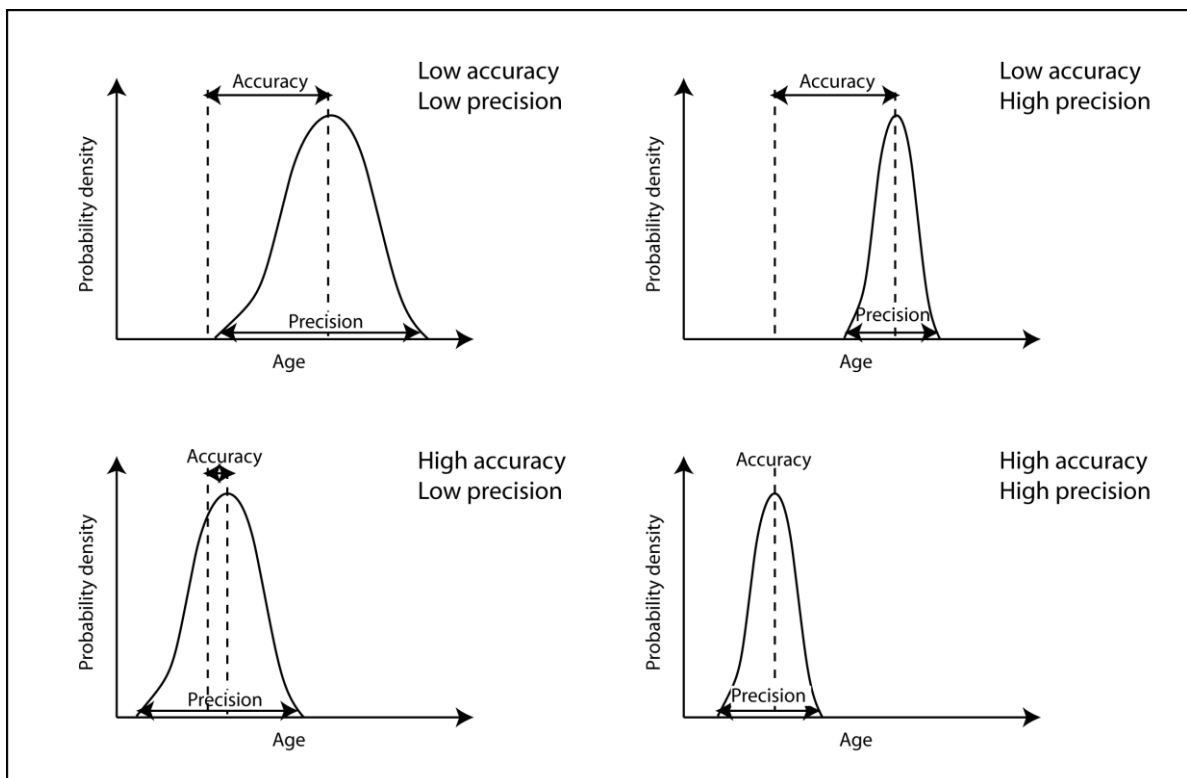
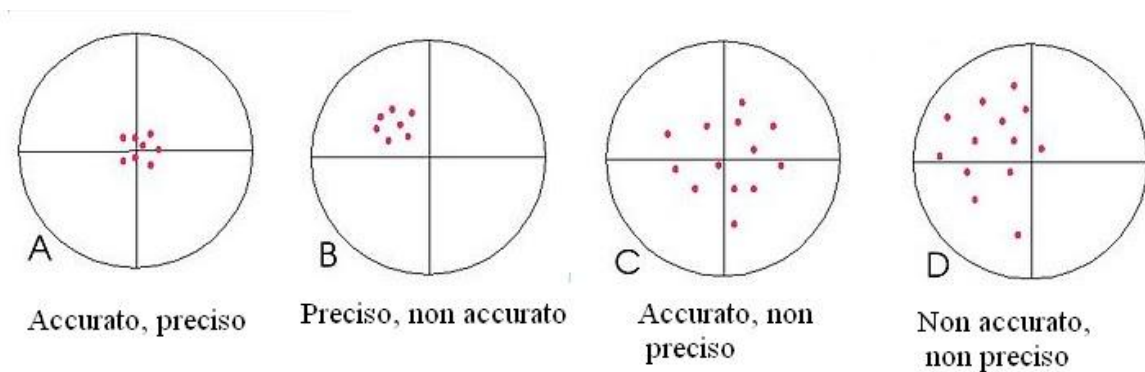


Figura 50: Differenza fra accuratezza e ripetibilità.

9.2 Aeriformi

Di seguito sono riportate le misurazioni durante le prove al banco motori di un motore Ducati, nelle quali è stato possibile acquisire il valore di portata del misuratore AirRate FEV per avere una serie di valori di portata di riferimento, ai quali associare le acquisizioni dei segnali nel misuratore RapidPro tramite cRIO.

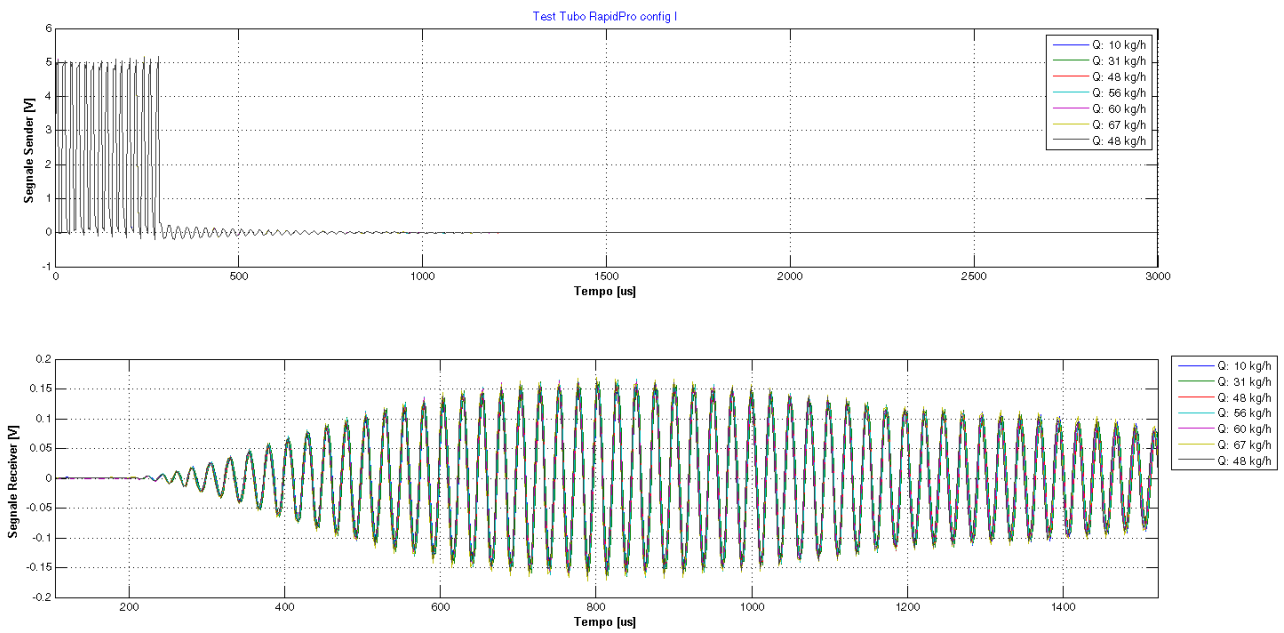


Figura 51: Configurazione in linea. Acquisizioni a portate variabili

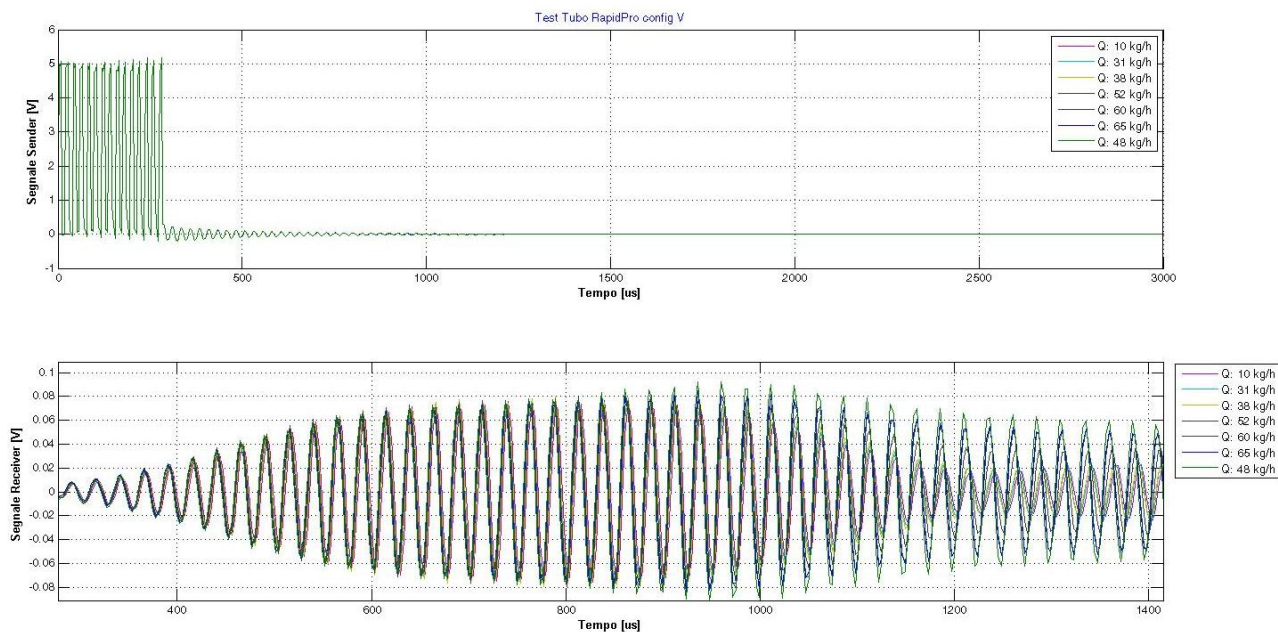


Figura 52: Configurazione a V. Acquisizioni a portate variabili

Ciò che si può notare in prima analisi è che a prescindere dalla portata, nella configurazione in linea il segnale ha una ampiezza maggiore. Questo rispetta ciò che la logica consiglia: nella configurazione in linea il percorso onda è più corto, in particolare è la metà rispetto alla configurazione a V, per cui l'onda risulta meno smorzata per via delle minori dissipazioni di potenza.

Infatti, nel primo caso non appena l'onda raggiunge la parete opposta del tubo viene acquisita, mentre nel montaggio a V dalla parete opposta rimbalza per arrivare al ricevitore posto sullo stesso piano dell'emettitore.

Una nota che non era prevedibile invece è che, come si nota, nella configurazione a V, il diagramma del segnale ricevuto varia per valori più bassi di portata, mentre nella configurazione in linea non cambia. La parte che varia tuttavia probabilmente non riguarda la misura perché è molto "avanti", quindi ipotizzando di calcolare il TOF con un procedimento simile a quello Maxim, questa porzione di segnale viene già scartata, anche perché molto influenzata da rimbalzi e echi del suono.

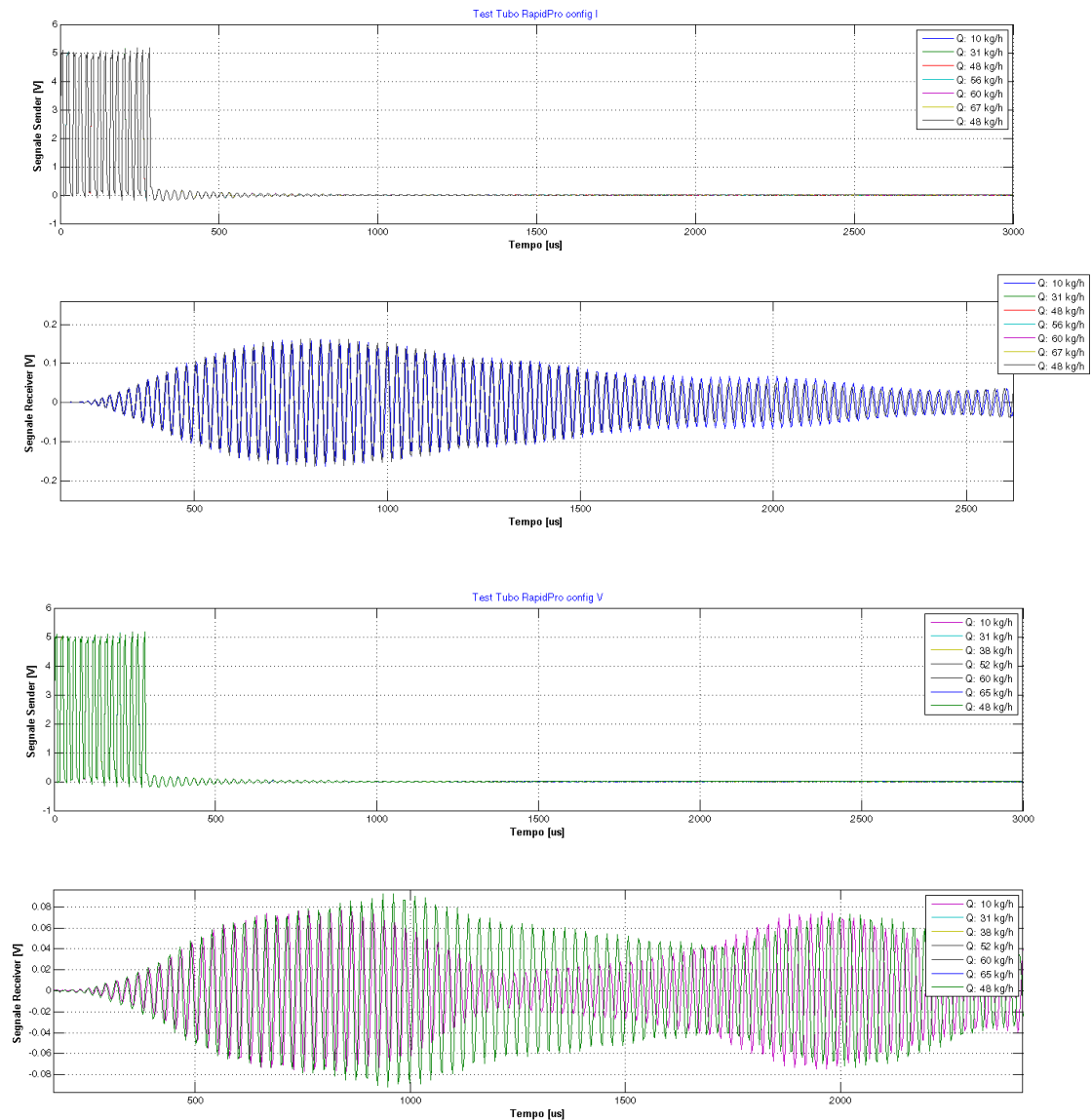


Figura 53: Confronto fra i profili alla minima e alla massima portata.

Tramite Matlab sono stati disegnati anche gli spettrogrammi di queste prove. Di seguito ne viene riportato uno. Uno spettrogramma è la rappresentazione grafica dell'intensità di un'oscillazione in funzione del tempo e della frequenza ω , in altre parole, è la rappresentazione grafica della funzione reale i delle variabili reali t ed f : $i(t, f)$. Sull'asse delle ascisse è riportato il tempo in scala lineare, sull'asse delle ordinate è riportata la frequenza in scala lineare. A ciascun punto di data ascissa e data ordinata è assegnata una tonalità di colore, rappresentante l'ampiezza del segnale in un dato istante di tempo e a una data

frequenza; la relazione fra l'ampiezza e la scala di colori può essere lineare o logaritmica.

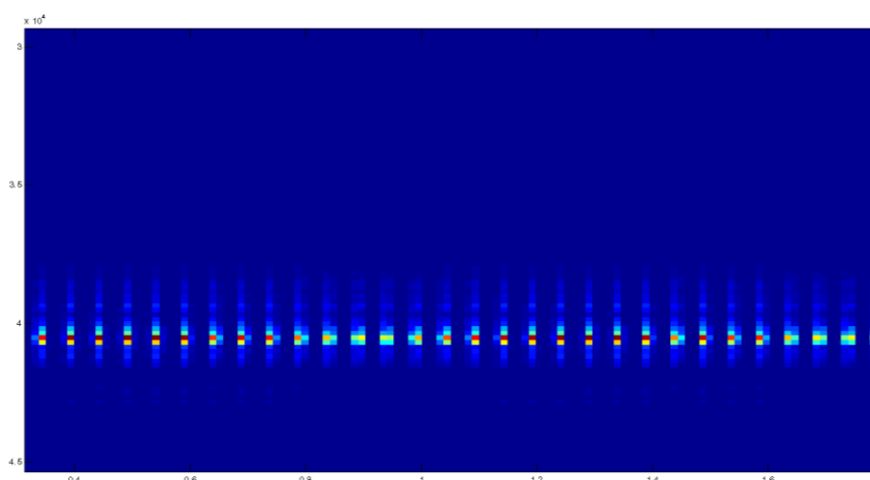


Figura 54: Spettrogramma del segnale ricevuto in configurazione a V con trasduttori posti controcorrente.

Osservazione: Uno spettrogramma si ottiene, di solito, suddividendo l'intervallo di tempo totale (cioè quello relativo all'intera forma d'onda da analizzare) in sottointervalli uguali e calcolando la trasformata di Fourier della parte di forma d'onda contenuta in ciascuna finestra (solitamente si usa la trasformata veloce di Fourier, o FFT), che fornisce l'intensità del suono in funzione della frequenza. Le trasformate di Fourier, relative alle diverse finestre temporali, vengono poi assemblate a formare lo spettrogramma.

Nell'esempio mostrato si nota un piccolo rumore, dovuto probabilmente ai rimbalzi acustici che si notavano nei grafici precedenti che "allungano" molto il segnale ricevuto rispetto a quello emesso. Questo rumore si nota dagli aloni azzurro/verdi attorno ai picchi di pressione rappresentati dalle macchie rosso/gialle.

Dopodiché con uno script in Matlab si sono calcolati i TOF_diff, la velocità del fluido e la portata, per entrambe le configurazioni.

Il procedimento di calcolo parte col definire un valore di soglia di tensione per battezzare l'onda "zero". Poi si considerano le onde con massimi di tensione oltre al valore soglia. A questo punto va precisato che i trasduttori montati sono specificatamente o emettitore o ricevitore,

per cui non è possibile generare un'onda di ritorno come nel caso del misuratore per liquidi, per un limite del trasduttore. Allora si è preso per riferimento il segnale acquisito a portata nulla, ovvero motore spento, (Nota: AirRate non misura portata sotto i 10 kg/h, dunque anche se è rappresentato come segnale 10kg/h in realtà è flusso fermo). Noto il riferimento si prendono i tempi fra i massimi di un determinato numero di onde successive e ne si calcola il Δt , ovvero il Time Of Flight, che per Maxim sarebbe indicato come TOF_up, essendo montaggio equicorrente. Tutti i parametri geometrici sono noti dai file CAD, in particolare $L_{path_V}=138.86\text{mm}$ $L_{path_line}=70.78\text{mm}$, $\alpha_V=60^\circ$ $\alpha_line=50^\circ$ e $D_{tubo}=60\text{mm}$, per cui il calcolo della velocità del fluido e di conseguenza della portata è immediato.

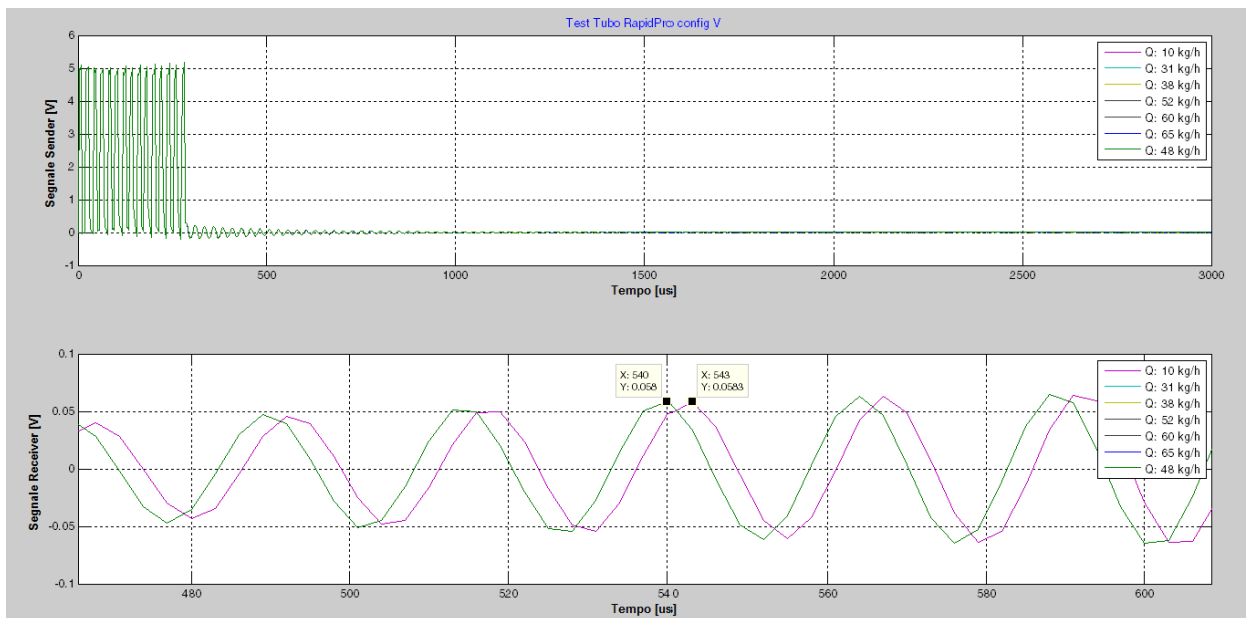
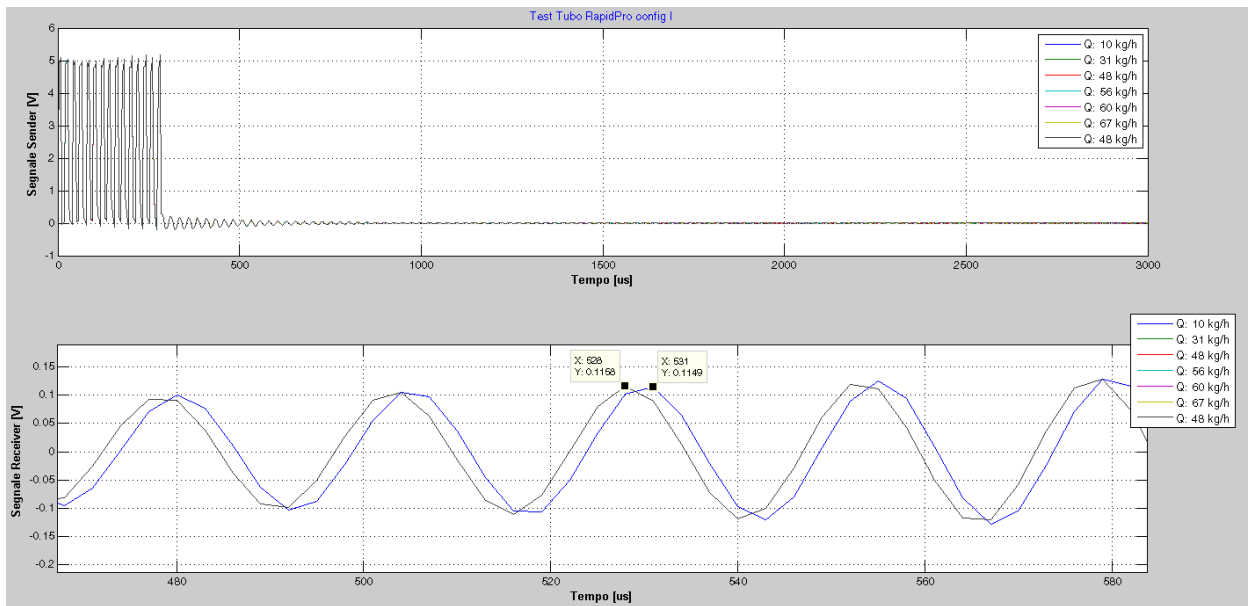


Figura 55: Punti considerati per il calcolo del TOF. Nota: l'onda a portata massima sembra anticipata rispetto quella a flusso nullo, questo è l'effetto del montaggio è equicorrente

Come si nota dall'immagine precedente il calcolo descritto viene effettuato, nel caso di esempio, con una portata di riferimento dal FEV di 48 kg/h.

I risultati ottenuti sono: $Q_{air_V}=54.4\text{kg/h}$ se si considera l'angolo esatto ricavato dal file cad, ma se considero il cono di apertura dell'onda sonora si può notare che ad un angolo di 51° di inclinazione del percorso onda la portata calcolata è di 48.1 kg/h (contro i 48.22 di FEV). questo risultato viene dall'eq:

$$v = \frac{c^2 * Dt}{2 * L * \cos(\alpha)}$$

dove Dt è il delta tempo fra il tempo di ricezione dell'onda a velocità nulla e il tempo di ricezione dell'onda a velocità non nulla.

Questa eq si ricava dalla differenza di tempo in quanto il tempo di ricezione a velocità nulla è pari a L/c , con c velocità del suono e L distanza fra i sensori, mentre con velocità non nulla il tempo è $L/(c+v*\cos(\alpha))$.

Lo stesso procedimento di calcolo è stato applicato nella configurazione in linea,ma dovendo l'onda compiere metà del percorso rispetto alla configurazione a V risulta:

$$v = \frac{c^2 * Dt}{L * \cos(\alpha)}$$

quindi $Q_{air_Line}=86.59\text{kg/h}$ (a pari confronto con il FEV).

Nota: $L_V=71.22\text{mm}$ e $\alpha_V=56.90^\circ$ $Dt_V=3*10^{(-6)}\text{s}$;
 $L_Line=77.44\text{mm}$ e $\alpha_Line=50^\circ$ e $Dt_Line=3*10^{(-6)}\text{s}$.

Con questo calcolo risultano portate differenti da quella indicata dall'AirRate, ovvero $Q_V=54,4\text{kg/h}$ e $Q_line=86.59\text{kg/h}$. Questo risultato però non deve preoccupare in quanto è una differenza dovuta all'inaccuratezza dello strumento, difetto che con una riduzione degli echi (quindi ottimizzazione del design) e con una adeguata taratura può essere corretto. Ragionamenti sulla ripetibilità con questa architettura del sistema di acquisizione e di calcolo non sono possibili perché si può valutare solo un impulso per volta.

Di seguito si è costruito un amplificatore operazionale per tentare di amplificare il segnale ricevuto e si sono raggiunti picchi di tensione fino a 3V circa, ma naturalmente la forma del segnale e quindi i risultati non cambiano.

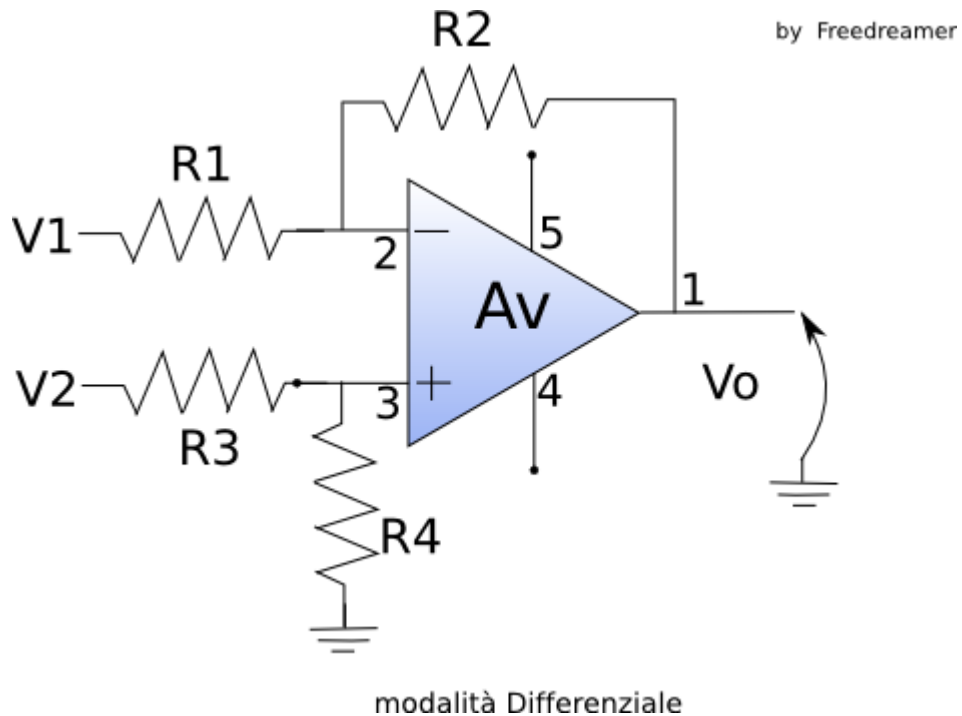


Figura 56: Schema tipico di amplificatore operazionale.

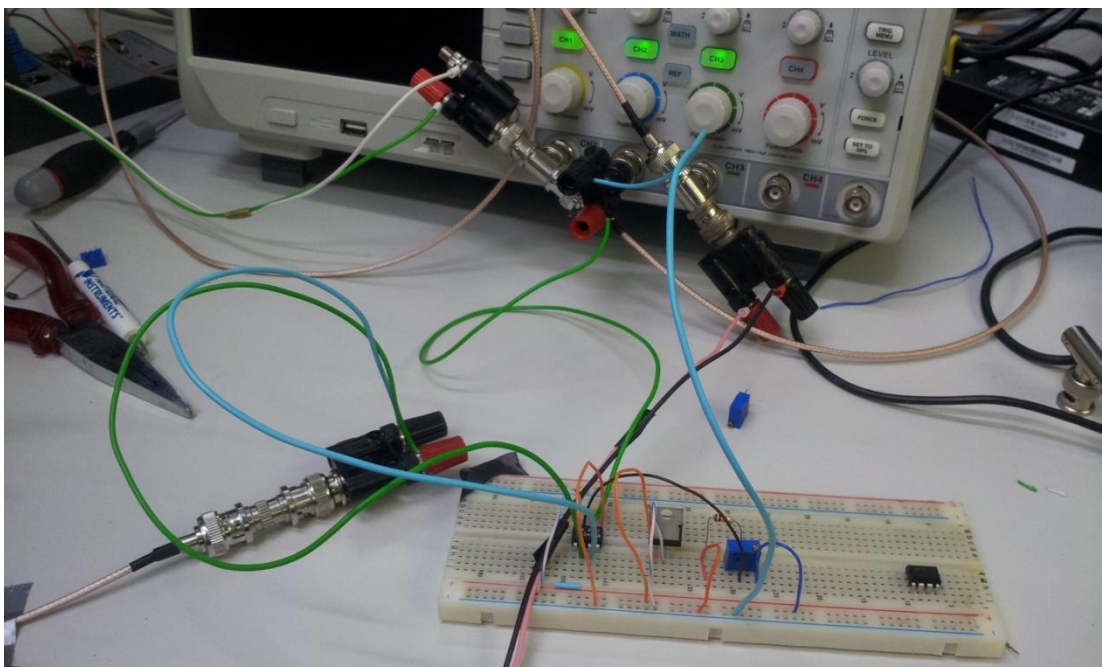


Figura 57: Montaggio dell'amplificatore composto nella scheda bianca.

10. CONCLUSIONI

La prima conclusione che propone riguarda la scheda di acquisizione ed elaborazione del segnale.

Sicuramente rappresenta il punto più delicato di questo genere di strumenti e lo si può notare dalla differenza di informazioni ricavate con acquisizioni sfruttando Maxim e invece usando un sistema provvisorio utile solo a condizioni di laboratorio. Battezzare l'onda "zero" è molto complicato, soprattutto lavorando con il segnale analogico; infatti il metodo a soglia utilizzato per ricavare un valore indicativo di TOF nelle prove con RapidPro non si è dimostrato affidabile, perché anche ammettendo che battezzi correttamente l'onda "zero", il conteggio delle onde successive risulta complicato se deve essere eseguito automaticamente da un hardware e sicuramente occorre uno studio ed un know how superiore.

Diverso sarebbe invece usare un segnale digitale: con un circuito squadratore si generano onde quadre corrispondenti a tutte le onde successive alla "zero" e per il conteggio del tempo si considerano i fronti di salita dell'onda quadra. Ma non è il caso di questa tesi. Tuttavia questo problema potrebbe essere superato in una prima fase utilizzando trasduttori a 125kHz che funzionino sia da emettitori sia da ricevitori, quelli tipicamente usati per sensori di prossimità come quelli montati per il sensore di retromarcia sui veicoli, ed utilizzare il modulo Maxim per raccogliere informazioni più precise o eventualmente commercializzarne una prima versione (dato che Maxim vende anche schede complete non riprogrammabili). La frequenza nominale di 125kHz è adatta per la misura in aria.

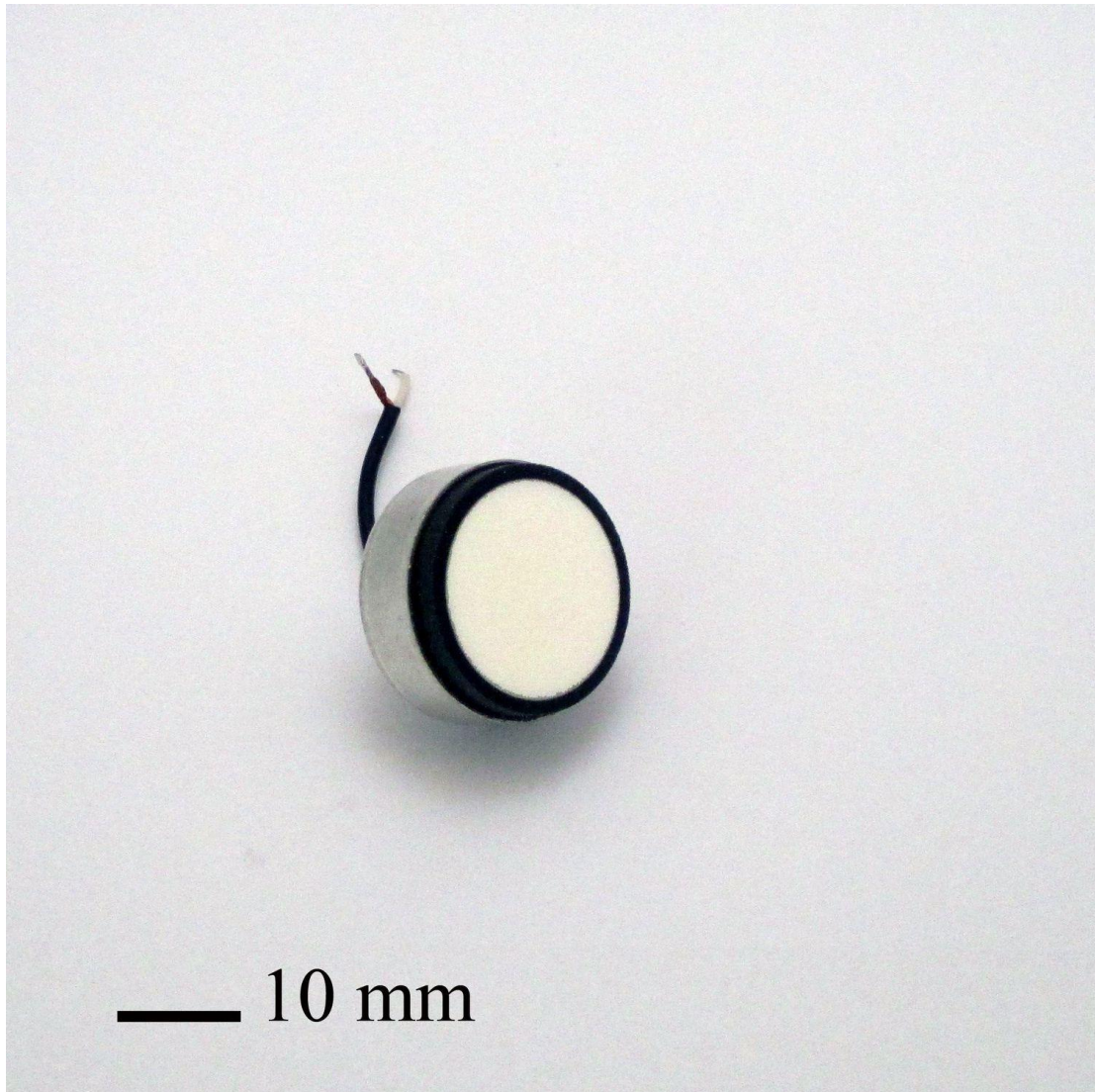


Figura 58: fotografia di un tipico trasduttore (emettitore-ricevitore) da 125kHz

Una seconda analisi che si propone riguarda la geometria.

Questa influenza notevolmente il rumore sulla misura, in particolare nel caso dei liquidi dove il design scelto penalizza il flusso. Uno studio più accurato è necessario al fine di arrivare ad un prodotto commercialmente competitivo, in particolar modo per lo strumento per liquidi, anche se obiettivamente è già migliore del misuratore SONIC.

Si ritiene un successo il solo fatto di essere riusciti ad acquisire segnali nel caso di RapidPro, perché già dall'inizio le misure con aria si presentavano come le più complesse. Naturalmente una miglior

costruzione del tubo, miglioramento delle rugosità, un miglioramento della posizione dei trasduttori, l'utilizzo di una scheda di acquisizione dedicata e trasduttori in grado di ricevere e emettere in modo da calcolare il TOF_diff come per i liquidi possono ottimizzare le prestazioni di questo strumento.

Grosse differenze fra configurazione in linea e a V in termini di risoluzione non ne sono risultate, come si nota dai grafici di confronto. Di base il misuratore a V si è dimostrato più accurato rispetto a quello in linea, ma questo è logico in quanto l'onda è per più tempo influenzata dalla velocità del flusso. È possibile che queste configurazioni facciano differenza sulla ripetibilità di misura.

Per rispondere alla domanda posta a inizio trattazione si ritiene, sulla base delle nozioni ottenute da queste prove, che effettivamente è possibile ottenere uno strumento per la misura di portata con principio di misura ultrasonico che non abbia costi proibitivi; la scheda Maxim viene venduta singola ad un prezzo di 135€, i trasduttori da 40kHz e da 1MHz hanno un prezzo medio di circa 5€ mentre quelli da 125kHz vengono venduti in piccoli lotti ad un prezzo di circa 20\$ al pezzo. Il tubo di per sé ha un costo molto basso se viene costruito di materiale plastico ed il costo di sviluppo che manca da qui ad un ipotetico ingresso nel mercato non giustifica prezzi di diverse decine di migliaia di euro. Quel che è vero è che questi sono solamente primi dati incoraggianti che suggerirebbero di proseguire lo studio, dato anche l'interesse del mercato e la crescita in particolare della tecnologia ultrasonica, ma la strada da percorrere per raggiungere un prodotto completo ed affidabile è lunga.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Strumenti e metodi di misura” Ernest O. Doebelin ed. Mc Graw Hill;
- [2] “Elementi di acustica e illuminotecnica” Paola Ricciardi d Mc Graw Hill;
- [3] “Flow Measurement Engineering Handbook” di Miller;
- [4] “Ultrasonic Flowmeters” L.C. Lynnworth;

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio in primis il Professor Enrico Corti, il quale mi ha proposto un titolo interessante e mi ha dato modo di affrontare un buon progetto di tesi, e l'Ingegnere Roberto Bertacin, il quale ha rappresentato una figura fondamentale per la crescita delle mie conoscenze in questi argomenti nonché colonna portante delle prove effettuate.

Un doveroso ringraziamento alla famiglia che mi ha dato l'opportunità di completare gli studi e che non ha smesso di supportarmi in questo percorso.

Un grande ringraziamento a tutti gli amici e le amiche che sono stati al mio fianco negli ultimi anni e che in qualche modo, chi più chi meno, hanno sofferto con me gli alti e bassi.

Un caloroso grazie agli ingegneri Filippo Maria Casadio e Mattia Lami, grandi amici e compagni di corso, per il supporto morale e accademico nei tre anni di studio.

Ultimo ma non meno importante Grazie all'amico Massimo Molinari, per non aver mai smesso di credere in me e per la capacità che ha di motivarmi.