



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Progettazione di un sistema ad ultrasuoni da utilizzare nella rilevazione di inquinamento marino da idrocarburi

Ph.D. Dissertation of:

Andrea Rocchi

Supervisor:

Prof. Gianni Barucca

Assistant Supervisor:

Prof. Paolo Mengucci

Ph.D. Course coordinator:

Prof. F. Mandorli

XVII° Ciclo – Nuova Serie

Università Politecnica delle Marche
Dipartimento di Scienza e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente e dell'Urbanistica
(SIMAU)
Via Brezze Bianche — 60131 - Ancona, Italy

Ringraziamenti

Voglio ringraziare tutto il personale del Dipartimento Simau dell'Università Politecnica delle Marche.

Un particolare ringraziamento desidero indirizzarlo al mio tutor, Prof. Gianni Barucca che, in questi anni, con grande pazienza e competenza mi ha stimolato e guidato nell'affrontare le difficoltà incontrate nel mio percorso di Dottorato.

Desidero inoltre ringraziare il Prof. Paolo Mengucci per la costante disponibilità nel consigliarmi le vie migliori da seguire nella mia ricerca, ed i tecnici di Laboratorio, Dott. Ing. Adriano di Cristoforo e Dott. Luigi Gobbi per il loro più che valido supporto quotidiano.

Alla Dott.ssa Eleonora Santecchia e al collega Ing. Fabrizio Ciciulla rivolgo un affettuoso ed immenso grazie, per il loro indispensabile aiuto tecnico e sostegno morale nel superare momenti e situazioni difficili.

Un caloroso saluto lo dedico al collega e amico Prof. Danilo Paci compagno di molte vicissitudini ed esperienze in questo percorso di ricerca.

Infine voglio esprimere sincera gratitudine verso tutti i Componenti dei Gruppi, in particolar modo a quelli del Dipartimento di Meccanica, che hanno contribuito nella realizzazione del mio lavoro di Dottorato.

Indice

Capitolo 1	Introduzione.....	1
Capitolo 2	Stato dell'arte.....	5
Capitolo 3	Fisica delle onde sonore	10
3.1	Teoria dell'elasticità	13
3.1.1	Campo delle deformazioni	14
3.1.2	Campo delle tensioni	20
3.1.3	Equazione della meccanica del continuo.....	22
3.1.4	Equazioni costitutive	23
3.2	Equazioni d'onda.....	26
3.2.1.	Onde elastiche piane.....	29
3.2.2.	Grandezze caratteristiche delle onde sonore	31
3.2.3	Propagazione onde	32
Capitolo 4	Applicazione degli ultrasuoni.....	45
4.1	Misuratori di distanza.....	47
4.2	Apparecchi medicali.....	49
4.3	Analisi dei materiali attraverso ultrasuoni.....	53
4.4	Saldatura	55
Capitolo 5	Materiali e Metodi	57
5.1	Sensore ad ultrasuoni.....	57
5.2	Set-up di misura.....	59
5.3	Altri sensori di misura utilizzati	62
5.4	Gestione ed analisi dei segnali	63
5.4.1	Oscilloscopio	63

5.4.2	VI in labview	64
5.4.3	Software Matlab e Originpro Lab	66
Capitolo 6	Risultati e discussioni	67
6.1	Sensore hy- srf05	67
6.2	Sensore srf05 devantech	75
6.3	Confronto tra tre sensori srf05	80
6.4	Verifica stabilita' con laser a triangolazione	85
6.5	Effetto della temperatura e dell' umidita'	88
6.6	Analisi dei segnali	93
6.6.1	Casi particolari studiati	100
6.7	Processamento del segnale	103
6.8	Confronto con target diversi	108
6.9	Confronto sensore ottico e srf05	110
Capitolo 7	Particolari riguardanti il dispositivo finale	117
7.1	Architettura boa	117
7.2	Materiale per elettrodi	120
7.3	Modulo di ricezione/trasmissione e localizzazione	122
Conclusioni	127
Bibliografia	129
Appendice	135

Abstract

Il problema dei disastri ambientali dovuti a sversamenti di idrocarburi in ambienti marini ha caratterizzato la storia recente fino dai primi anni del '900, e tutt'ora essi rappresentano un importante fattore di rischio per la protezione dell'ambiente.

Dallo studio dello stato dell'arte, si è costatato che le numerose tecniche e apparecchiature attualmente utilizzate per il monitoraggio dell'inquinamento delle acque marine, sono assai costose sia per la loro realizzazione che per la loro manutenzione.

Lo scopo di questo lavoro di Dottorato è la caratterizzazione e la progettazione di un sistema di sensori senza contatto in grado di fornire il livello dell'acqua in ambiente marino. Tale sistema fa parte di un dispositivo a bassissimo costo ideato e brevettato per rilevare l'inquinamento dell'acqua da liquidi non conduttivi, idrocarburi fluttuanti, sfruttando la diversa conducibilità elettrica dei fluidi coinvolti.

In particolare, il lavoro si concentra sulla realizzazione di un sistema sensoristico che permetta di determinare la posizione del pelo libero del liquido.

A tale scopo sono stati presi in considerazione alcuni tipi di sensori ultrasonici facilmente reperibili sul mercato, a basso costo, programmabili e gestibili tramite una scheda Arduino.

Una serie di prove sperimentali è stata condotta utilizzando slitte micrometriche lineari, laser a triangolazione, un oscilloscopio digitale e software per prove in laboratorio, di analisi dati e post-processing.

I cambiamenti delle condizioni climatiche, come la temperatura e l'umidità relativa che incidono sugli output degli strumenti utilizzati, sono stati monitorati per mezzo di una camera climatica al fine di stabilire il miglior range operativo in termini di sensibilità del sensore e una possibile architettura per un prototipo virtuale.

Il sensore ad ultrasuoni maggiormente analizzato nel presente lavoro è l'SRF05. Sebbene esso presenti caratteristiche che lo rendono adatto allo scopo, ha mostrato delle anomalie inaspettate. Infatti, ad intervalli di distanza regolari, i valori dei tempi di volo dell'onda ultrasonica risultano sensibilmente inferiori rispetto ad una distribuzione attesa degli stessi.

Tale fenomeno ha richiesto l'adozione di una combinazione di più sensori SRF05 al fine di ottimizzare il sistema di misura e così ottenere un sistema di rilevamento con una sensibilità dell'ordine del mm adatta agli scopi pratici previsti.

Abstract

The problem of environmental disasters due to oil spills has characterized recent history from the early '900, still being an important risk factor for environmental protection. Aim of this research is designing and implementation of a non-contact ultrasonic sensor system capable of providing the liquid level in the marine environment. This system is part of a very low-cost device developed to detect water pollution by non-conductive liquids (i.e. hydrocarbons floating in the sea), exploiting the different conductivity of fluids involved. Generally, equipment and techniques currently used for monitoring marine water pollution are very expensive. On the contrary, this work focuses on the characterization of a low-cost SRF05 ultrasonic sensor and on its implementation inside a floating organ as a result of data obtained from laboratory tests. A number of experimental tests were conducted using a micrometric linear stage, a triangulation laser, a digital oscilloscope and a post-processing software (MATLAB). Moreover, changes of climatic conditions, such as temperature and humidity, were monitored in a climatic chamber, aiming to establish the best operating range in terms of sensor resolution, and architecture of a buoy. The sensor used in this work showed signal anomalies at regular distance intervals due to anticipated flight times, which led to the adoption of a sensor system consisting in the combination of more SRF05 sensors to optimize the measurement system. In addition, it is presented an analytical method based on ultrasonic signal reconstruction, with the aim to improve the accuracy of the measurement method. The final device is managed by an Atmega328p low-power microcontroller (Arduino) through an algorithm, and can detect the level of liquid surface (sea water or contaminant) with a sensibility of about 1 mm.

Capitolo 1 Introduzione

Gli idrocarburi possono rappresentare un serio problema per l'ambiente e per la nostra salute poiché sono la causa diretta e indiretta dell'inquinamento del nostro pianeta. A tale riguardo, gli ecosistemi marini sono un bersaglio estremamente sensibile; si stima che mediamente finiscano, solamente nel Mediterraneo, circa seicentomila tonnellate di greggio ogni anno, determinando danni a tutti i livelli, della rete trofica marina[1-4].

Le statistiche relative alle fuoriuscite di petrolio, dai pozzi e dalle navi cisterna, per quasi cinquant'anni mostrano, comunque, una progressiva tendenza al ribasso. Il numero medio annuo di sversamenti, di dimensioni pari o superiori a 7 tonnellate, è costantemente diminuito e, dal 2010, si aggira intorno ai 6. Considerando invece, la media annua delle fuoriuscite di grandi dimensioni, quelle cioè superiori a 700 tonnellate si sono ridotte in maniera drastica, infatti, dagli anni settanta, tali eventi sono passati da 25 a 2[5].

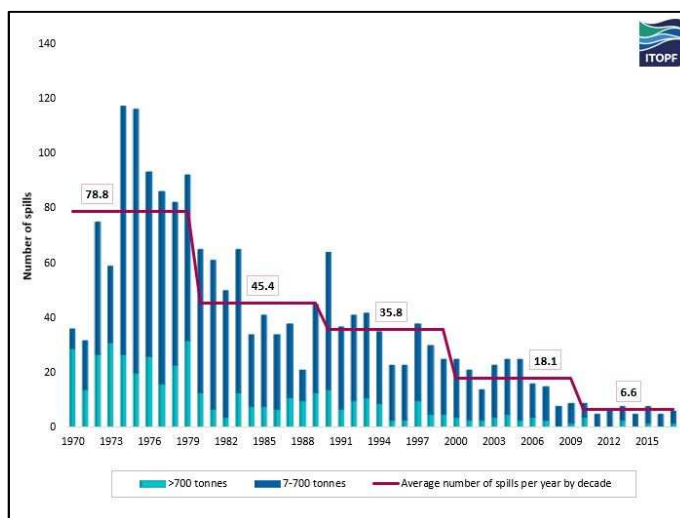


Figura 1a - Andamento annuale sversamenti idrocarburi (www.itopf.org).

I dati relativi al 2017 mostrano, dunque una diminuzione importante delle fuoriuscite di greggio. Il 99.99% del petrolio trasportato via mare arriva a destinazione in condizioni di sicurezza. Rimanendo ai dati relativi al 2017, la quantità di idrocarburi persi si aggira intorno alle 7000 tonnellate. La causa principale di tale numero è attribuito a due importanti catastrofi; il primo incidente accaduto il 28 gennaio nel golfo del Bengala, dove 40 tonnellate di fanghi di petrolio e 27 tonnellate di miscela di olio e acqua hanno inquinato 23 km di costa[6][7] ; il secondo, avvenuto il 10 settembre vicino l'isola di Salamina, ha riguardato la fuoriuscita di 2500 tonnellate di greggio[8].

Nonostante questo trend positivo dei disastri ambientali gli incidenti, a petroliere o quelli a piattaforme off-shore,

continuano a verificarsi, basti pensare alla petroliera iraniana Sanchi affondata al largo delle coste di Shanghai, il 16 gennaio 2018, dopo una settimana di incendi e di emissioni di fumo, la superficie di mare inquinata risultò essere di 130 chilometri quadrati[9].

Pertanto, questa progressiva diminuzione degli sversamenti di idrocarburi, dovuta certamente alle migliori tecniche adottate nell'estrazione, nel trasporto e nella lavorazione, non deve rallentare o sminuire, dato l'elevato costo della riparazione dei danni ambientali e sociali[10][11], la ricerca di nuovi strumenti e di più efficaci metodologie per prevenire o ridurre, ulteriormente, le conseguenze degli incidenti.

Conoscere, interpretare e valutare gli eventi, nell'immediatezza di uno sversamento di idrocarburi in mare, è difficile e richiede decisioni immediate che, spesso, hanno un margine ineludibile di indeterminatezza[12].

Inoltre, per prevedere il comportamento e la persistenza dell'idrocarburo in mare, è opportuno conoscere quali siano le caratteristiche chimico – fisico dei composti inquinanti, classificando questi in base alla densità relativa, alla tendenza all'evaporazione, alla viscosità e al pour point (punto di scorrimento). Tali proprietà dipendono dalla composizione chimica della miscela di idrocarburi e quindi dalla proporzione dei composti volatili o dal contenuto di alcune sostanze quali asfalteni, resine e cere.

La densità relativa determina la tendenza all'affondamento in mare degli idrocarburi. Maggiore è la densità, maggiore è la tendenza ad affondare.

In termini di gradi API ($^{\circ}$ API), (American Petroleum Institute) dove:

$$^{\circ}API = \left(\frac{141.5}{\text{densità relativa}} \right) - 131.15 \quad (1.1)$$

fino al valore $^{\circ}API=10$ gli idrocarburi possono affondare. La figura 1b, rappresenta graficamente la relazione tra la densità degli idrocarburi e la salinità dell'acqua di mare in relazione alla tendenza all'inabissamento[13].

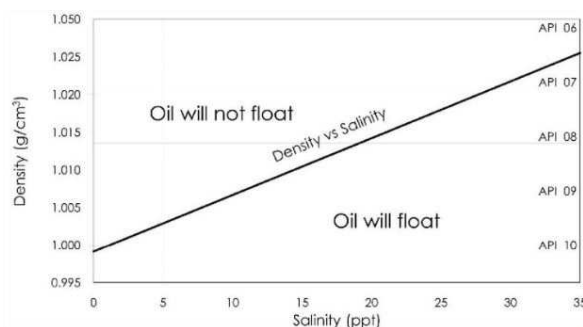


Figura 1b - Relazione tra densità idrocarburi e salinità acqua (www.marietta.edu).

La tendenza all'evaporazione, invece, viene espressa come la proporzione in volume che distilla in funzione della temperatura[14]. Gli idrocarburi contenenti elevate quantità di prodotti bituminosi, cere o residui asfaltenici mostrano una bassa capacità all'evaporazione, anche ad elevate temperature. Minore è l'evaporazione, maggiore è la capacità degli idrocarburi di permanere nell'ambiente marino.

Tale parametro risulta importante per l'efficacia del nostro dispositivo.

Dalla viscosità degli inquinanti dipende la loro attitudine a disperdersi nella colonna d'acqua e a formare emulsioni. Tanto più bassa è la viscosità, tanto maggiore è la tendenza ad espandersi e minore la capacità di creare emulsioni.

Il *pour point* è quell'indice di temperatura al di sotto della quale l'idrocarburo non presenta più la capacità di scorrimento e si presenta in uno stato semisolido. Il suo valore è dipendente dal contenuto relativo di cere e asfalteni. Il passaggio di un idrocarburo da uno stato liquido ad uno stato solido è caratterizzato dalla formazione di una struttura cristallina ad una determinata temperatura (*cloud point*). È nell'intervallo di temperatura tra il *cloud point* e il *pour point* che la miscela oleosa passa da uno stato completamente liquido ad uno solido. Se questo

intervallo è nel range della temperatura ambiente, è possibile avere un diverso stato fisico anche con minime variazioni di temperatura. È in questa situazione che l'inquinante, formando grumi, tende a precipitare.

Tali parametri, relativi alle caratteristiche degli idrocarburi[15][16], vanno dettagliatamente studiati ed investigati. Lo scopo è di riuscire a progettare e realizzare dispositivi e sistemi di controllo validi per la sorveglianza delle acque marine e permettere una metodologia d'intervento efficace ed immediata.

Grazie al progresso della ricerca scientifica e all'evoluzione tecnologica nel campo elettronico e sensoristico, sono stati sviluppati nuovi dispositivi e metodologie d'intervento, atti ad individuare in modo tempestivo e mirato, la localizzazione e l'entità di eventuali inquinamenti marini.

I principali aspetti da considerare, in fase di progettazione dei sistemi di rilevamento di inquinanti in mare sono: la posizione, la velocità di propagazione dello sversamento, l'ampiezza della area interessata e lo spessore; tali dati permettono di fare una stima, abbastanza appropriata, del volume dell'idrocarburo sversato ed una valutazione qualitativa dello stesso. Ciò permetterà di agevolare la programmazione degli interventi necessari per la bonifica[17].

Capitolo 2 Stato dell'arte

Varie sono le apparecchiature usate per monitorare e rilevare eventi accidentali che possono mettere a repentaglio l'ecosistema marino, tra queste troviamo:

1) VISIBLE SENSORS

Tra i primi strumenti adottati, come sensori per telerilevamento, vi sono i sistemi di scansione visibile e termica[18] che risultavano più performanti delle video camere; tutt'ora sono ancora ampiamente utilizzati nel rilevamento delle fuoriuscite di petrolio, nonostante presentino molti punti deboli, messi in evidenza anche dalle caratteristiche di riflettanza e assorbanza degli inquinanti. Questi ultimi, non sempre si riescono a distinguere in maniera efficace, a causa della presenza di alghe marine, di litorali scuri o di interferenze dovute all'azione della luce solare e del vento.

Gli scanner garantivano una sensibilità ed una selettività maggiore rispetto alle videocamere ed i segnali, inoltre, erano facilmente digitalizzabili e processati prima della visualizzazione.

L'avvento dei rilevatori CCD (Charge Coupled-Device), ha permesso di superare diversi tipi di aberrazione ed errori, risultando, quindi, anche di migliore affidabilità[19][20]. Altri metodi per distinguere oli inquinanti dall'acqua si basano su lenti polarizzate[21], e su videocamere che in virtù delle nuove tecniche di miglioramento della luce riescono ad operare in condizione notturne[20]. Grazie a tecnologie più innovative si è giunto allo sviluppo di dispositivi iperspettrali; (Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) e Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA). Questi tipi di sensori aviotrasportati consentono di raccogliere centinaia di immagini a diverse lunghezze d'onda per la stessa area spaziale[22][23].

2) INFRARED SENSORS

I sensori ad infrarosso, fanno parte degli strumenti passivi. Vengono utilizzati per catturare l'energia emessa in forma termica dall'olio, nella regione dell'infrarosso ($8 \mu\text{m} \div 14 \mu\text{m}$)[24].

La firma spettrale degli idrocarburi è diversa rispetto a quella dell'acqua nella regione dell'infrarosso termico (TIR)[25].

Più l'olio si presenta denso più assorbe quantità maggiori di radiazioni e appare caldo nella zona dell'infrarosso; lo spessore, però, dello strato minimo rilevabile è compreso tra i $20 \mu\text{m}$ e i $70 \mu\text{m}$ perché il passaggio da uno strato caldo ad uno strato freddo avviene tra 50 e $150 \mu\text{m}$ [26].

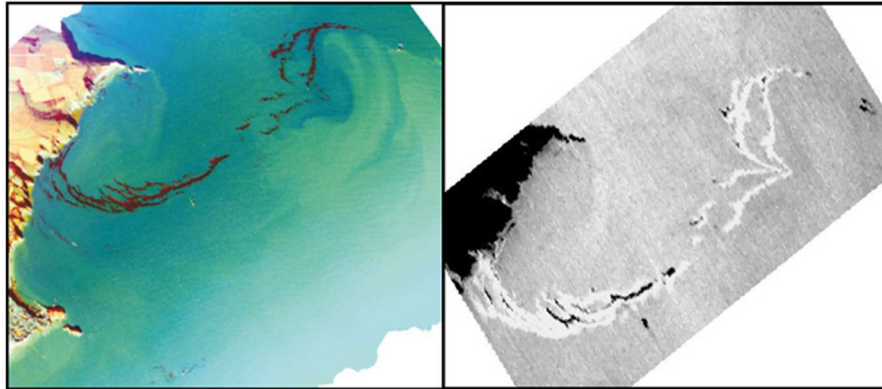


Figura 2a - Area di olio combustibile, nella località di Tenby, nel Regno Unito, catturata con sensore ottico (figura a sinistra) e con sensore termico ad infrarosso (figura a destra) (www.seos-project.eu).

3) ULTRAVIOLET SENSOR

Gli scanner ad ultravioletti sono sensori passivi e catturano la radiazione nella regione ultravioletta (0.32-0.38 μm) riflessa dalla superficie del mare. Vengono impiegati per la rilevazione di fuoriuscite di petrolio in quanto esso, rispetto all'acqua, presenta una maggiore riflettanza nella regione dell'ultravioletto.

Con questo tipo di sensori è possibile misurare, però, solo film di inquinante minore di 0.1 μm [27]. La combinazione tra sensori UV e IR (infrarosso) sono spesso utilizzate per avere una valutazione più dettagliata dello spessore dell'idrocarburo[28].

4) RADAR SYSTEMS

I sistemi radar che vengono utilizzati per il rilevamento di idrocarburi in mare, garantiscono un'ampia risoluzione spaziale e possono rilevare sversamenti di petrolio sia in condizioni notturne che in condizioni ambientali avverse, come in presenza di nebbia e nuvole. Il radar è un sensore attivo, invia onde radio che riflesse dalle onde capillari della superficie marina producono un'immagine chiara in assenza di anomalie. La presenza di eventuali inquinanti infatti riduce la riflettanza e crea un'immagine scura[29]. I due sistemi più utilizzati sono i sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar) e i sistemi SLAR (Side- Looking Airborne Radar)[24][30][31].

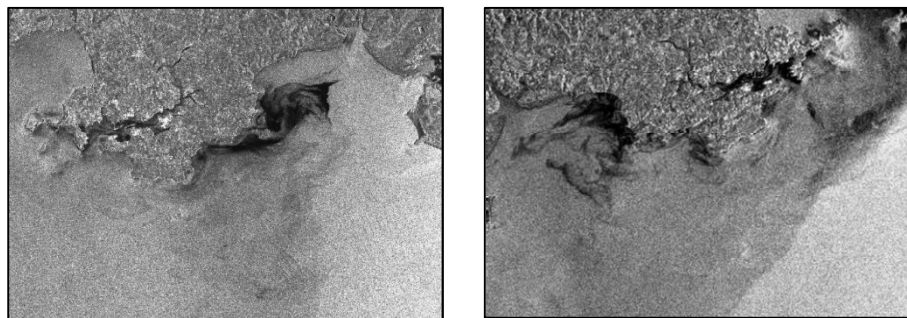


Figura 2b - A destra, immagine radar proveniente dal satellite ERS, dell'agenzia Spaziale Europea, a sinistra immagine radar fornita dalla stazione spaziale canadese RADARSAT. Le foto riguardano la regione di Milford Haven (Galles). La forma delle linee scure lontane dalla riva rende probabile la presenza di petrolio, ma le aree scure vicino la costa sono probabilmente dovute a condizioni di vento debole (www.seos-project.eu).

5) MICROWAVE SENSORS

I MWR (radiometri a microonde) sono sensori passivi sempre più utilizzati per il rilevamento di perdite di inquinante in mare. Riescono a intercettare la presenza del film di idrocarburo misurando la differenza di emissività della superficie eccitata dalla radiazione proveniente dallo spazio che, per il petrolio, è di un fattore pari a 0.8 mentre per l'acqua è di un fattore pari 0.4[32]. Sono in grado di stimare una variazione dello spessore di inquinante attraverso la variazione del segnale ricevuto, infatti si ha maggiore riflessione quando lo strato ha uno spessore pari ad un quarto della lunghezza d'onda del segnale.

I MWR sono sensori molto costosi, e necessitano di antenne sofisticate da installare su appositi aeromobili. Nonostante possano essere utilizzati sia durante il giorno che durante la notte, presentano una ridotta risoluzione spaziale.

6) LASER FLUOROSENSORS

Questi sensori sfruttano l'emissione di fluorescenza dei composti aromatici dopo essere stati eccitati elettronicamente per l'assorbimento di raggi ultravioletti. Questa emissione avviene nella parte visibile dello spettro elettromagnetico e può rappresentare un'indicazione importante della presenza di inquinanti in mare.

Diversi oli combustibili hanno flussi emissivi di fluorescenza con lunghezza d'onda leggermente diversa da quelli provenienti da sostanze naturali come ad esempio la clorofilla. I più comuni laser utilizzati in questo settore sono l'XeCl laser (308 nm), il laser a Nitrogeno (337 nm), l'XeF laser (351 nm) e il frequency-tripled Nd: YAG laser (355 nm)[33]. La risposta di fluorescenza degli idrocarburi varia tra i 400 nm e i 650 nm, e molti fluorosensori riescono ad aumentare la sensibilità e migliorare la selettività grazie alla tecnologia gating[24] (il sensore si apre nell'istante preciso in cui il segnale è riflesso dalla superficie del bersaglio) che permette di rilevare strati di inquinanti al di sotto della superficie dell'acqua, fino ad una profondità di 2 metri.

Gli idrocarburi possono essere anche individuati e quantificati rispetto allo spessore sfruttando la dispersione Raman (variazione tra l'energia della luce incidente e quella emessa per effetto dell'energia rotazionale-vibrazionale delle molecole d'acqua) per cui la luce emessa dalle molecole d'acqua ha lunghezza d'onda di 344 nm quando la radiazione incidente è di 308 nm[34]. L'intensità del segnale

Raman raccolta in corrispondenza di una chiazza di petrolio è diversa rispetto a quella raccolta nell'acqua non inquinata.

I fluorosensori non riescono a misurare spessori superiori a 10-20 μm , ma sono i più affidabili nel rilevare la presenza di inquinanti su molti tipi di ambiente come acqua, suolo, tappeti di alghe, ghiaccio e neve, sia in operazioni diurne che notturne[35].

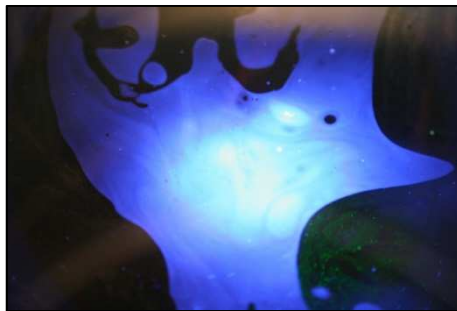


Figura 2c - Sottili strati di olio lubrificante su una superficie d'acqua vengono illuminati con la radiazione laser ed emettono una fluorescenza blu. L'acqua priva di olio non diventa fluorescente e rimane scura nell'immagine (www.seos-project.eu).

Va sottolineato che a parte i pregi ed i limiti dei sensori sopra descritti, i principi chimico-fisici che adottano li rendono particolarmente “gravosi” dal punto di vista economico.

Il lavoro di questa tesi riguarda lo sviluppo di un brevetto[36][37] che ha come obiettivo la realizzazione di un dispositivo, che per le sue caratteristiche, si presta ad essere un sensore di idrocarburi in mare a basso costo da produrre in grandi quantità e utilizzabile su vasta scala.

Il suo metodo di misura, infatti, è incentrato sulla condizione di diversa conducibilità elettrica che esiste tra l'acqua marina ed il fluido non conduttivo (idrocarburo), che galleggia sulla superficie del mare.

Il sensore non si propone di misurare il valore di resistività attraverso il fluido, ma solo di constatare il passaggio o meno di corrente elettrica. L'acqua infatti, in particolar modo quella salata, si comporta come buon conduttore per il passaggio

di corrente. Se si immergono due elettrodi collegati ad una pila in acqua salata, anche a basse tensioni, è possibile osservare un passaggio di corrente. Se gli stessi vengono immersi invece in un idrocarburo (petrolio, gasolio, olio, ecc.) si comportano come isolanti e non è riscontrabile alcun passaggio di corrente. In figura è rappresentato uno disegno schematicizzato del dispositivo.

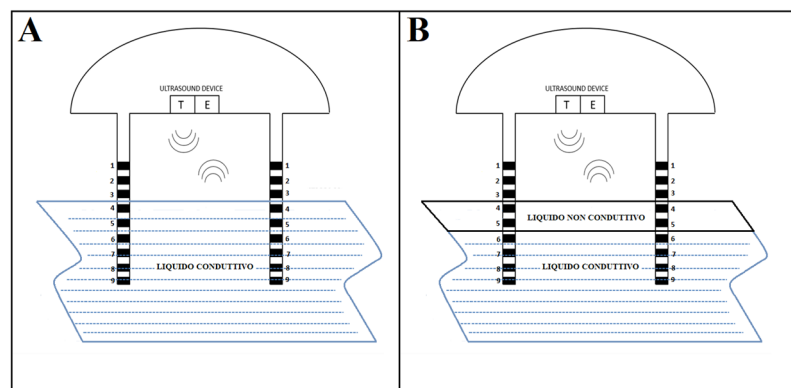


Figura 2d - Disegno stilizzato dispositivo rilevamento idrocarburi.

Il sensore, è semi-immerso in un fluido conduttivo, la semi-immersione è realizzata attraverso un sistema galleggiante tipo boa e rileva la presenza di eventuali fluidi non-conduttivi attraverso il rilevamento della conducibilità elettrica.

In ogni colonna gli elettrodi sono indipendenti e separati da un opportuno spazio. Gli elettrodi dovranno avere una distanza tra loro ed uno spessore dell'ordine del millimetro. Queste grandezze, che possono determinare difficoltà di tipo costruttivo, sono, tuttavia, indispensabili per conseguire la voluta accuratezza di misura dello strumento.

Il processo di misura si articola nel seguente modo:

1. Applicazione sistematica di una differenza di potenziale tra coppie di elettrodi poste su colonne differenti alla stessa altezza.
2. Determinazione delle coppie di elettrodi attraverso i quali si misura un passaggio di corrente.

3. Determinazione della posizione della superficie libera del liquido attraverso l'utilizzo di un sistema di sensori ad ultrasuoni.
4. Discriminazione dei fluidi presenti tra gli elettrodi attraverso il confronto tra la posizione della superficie libera del liquido e la posizione degli elettrodi tra i quali è avvenuto il passaggio di corrente (combinazione punti 2 e 3).

Nell'immagine "A" di Figura 2d, le prime tre coppie di elettrodi (1-1, 2-2, 3-3) non misureranno alcun passaggio di corrente perché l'aria si comporta da buon isolante, mentre le restanti (4-4, 5-5, 6-6, 7-7, 8-8, 9-9) misureranno un passaggio di corrente in quanto immerse in un liquido conduttivo. Attraverso un sistema di sensori ad ultrasuoni si misura la posizione di separazione aria-liquido. L'accuratezza di tale misura è alla base della sensibilità dell'intero apparato sensoristico.

Nel caso "A" di Figura 2d, la posizione della prima coppia di elettrodi che misura passaggio di corrente (coppia 4-4), coinciderà con la posizione della superficie di separazione aria-liquido.

Nell'immagine B, di Figura 2d, invece, le prime tre coppie (1-1, 2-2, 3-3) sono ancora in aria, mentre, delle rimanenti, due sono immerse in un liquido non conduttivo (4-4, 5-5) e le altre in un liquido conduttivo (6-6,7-7,8-8,9-9). Pertanto la posizione della prima coppia di elettrodi (6-6) che rileva il passaggio di corrente non coinciderà con la posizione della superficie di separazione aria-liquido, constatando in questo modo la presenza di un liquido non conduttivo galleggiante.

Lo spessore dello stesso potrà essere ricavato dalla differenza delle due posizioni. Questa misura, sarà tanto più precisa quanto più piccola sarà la distanza dagli elettrodi di una stessa colonna e la dimensione degli stessi.

L'intero dispositivo, dovrà essere alimentato da un sistema di pannelli fotovoltaici e supportato da un sistema di trasmissione radio, da un dispositivo GPS e da un microcontrollore per gestire le operazioni di misura tramite algoritmo.

Questo lavoro di tesi, in particolare, è incentrato sulla caratterizzazione, progettazione ed ottimizzazione di un sistema di sensori ultrasonici, non a contatto, capace di fornire il livello dell'acqua all'interno di una boa.

Il dispositivo di livello deve essere low-cost e garantire un livello di sensibilità di circa 1 mm.

Capitolo 3 Fisica delle onde sonore

In questo capitolo sono richiamati quei contenuti basilari, della teoria della propagazione delle onde meccaniche, necessari per delineare l'ambito scientifico nel quale si è svolto il presente lavoro.

Ciò può contribuire ad agevolare la lettura dell'elaborato ma, soprattutto, ha consentito di portare avanti la ricerca con la consapevolezza che le idee prospettate e i risultati via via acquisiti fossero sempre coerenti con le nozioni scientifiche e le equazioni fondamentali che costituiscono il quadro teorico della fisica delle onde sonore.

Inoltre nell'esposizione, in diversi paragrafi dell'elaborato, dei dati ottenuti e delle scelte operate nel lavoro sperimentale si farà riferimento, talora specifico, alle leggi e alle equazioni riportate in questo capitolo; a tal proposito si possono citare esempi come la legge di D'Alambert, l'analisi della velocità delle onde alle diverse temperature e l'interazione tra onde sonore e i diversi mezzi di propagazione.

Lo studio della propagazione delle onde meccaniche nei mezzi continui è stato un argomento centrale nella storia della scienza a partire dal VI sec. a.C. quando Pitagora analizzò l'origine del suono emesso da corde vibranti al variare della loro lunghezza e della tensione ad esse applicata. Solo nel 1747 D'Alembert formulò e risolse l'equazione del moto per una corda vibrante, equazione che porta il suo nome.

Nel 1887 Lord Rayleigh investigò le proprietà delle onde superficiali, importanti per applicazioni geologiche, definendo la frequenza delle onde in termini delle proprietà fisiche del mezzo materiale in cui esse si propagano. Attualmente le applicazioni di queste conoscenze sono molteplici, ad esempio, nel campo delle strutture ingegneristiche vi è grande interesse per la risposta dinamica (ondosa) a forti impatti o carichi impulsivi. La risposta a queste sollecitazioni esterne può, infatti, generare deformazioni permanenti o fratture nella struttura.

Il campo degli ultrasuoni rappresenta un esempio di applicazione delle onde elastiche. La generazione ed il controllo di ultrasuoni permettono di progettare sonde, tipicamente piezoelettriche, in grado di misurare le proprietà elastiche dei materiali o di identificare difetti quali fratture, dislocazioni o disomogeneità. Inoltre, queste tecniche sono ampiamente utilizzate in diversi settori industriali, sanitari, di ricerca geologica e ambientale.

3.1 Teoria dell'elasticità

Si consideri un mezzo elastico illimitato nella situazione di equilibrio. Il mezzo è visto come uno spazio pieno di materia nella quale si possono osservare fenomeni fisici di diverso tipo.

La disposizione della materia in un corpo è indicata dalla *densità*. Un mezzo è deformabile, quando è possibile separare due punti di esso mediante l'applicazione di appropriate *forze*; se il mezzo[38-50] ritorna alla condizione di partenza, una volta rimosse le forze di deformazione, esso è definito elastico.

Nella teoria dell'elasticità si considerano continui, i mezzi dove la densità $\rho(r)$, è una funzione continua della posizione. È possibile considerare il mezzo come costituito dalla somma di porzioni più piccole, in tal modo si possono studiare ed evidenziare i fenomeni elastici tramite le loro relazioni di dipendenza all'interno del mezzo stesso.

Su una piccola porzione di materiale agiscono forze *esterne*, come ad esempio la gravità ed *interne* dovute alle azioni reciproche di contatto tra particelle materiali appartenenti al mezzo. Viene definita *tensione* (interna) in un punto la risultante delle forze interne, agenti sulla particella puntiforme considerata.

Considerando una superficie infinitesima di separazione tra due porzioni del mezzo, contenente il punto A, diremo che ognuna di esse esercita sull'altra, per l'intera estensione della superficie, un'azione che è proporzionale all'area di contatto tra le due porzioni stesse (ipotesi di linearità tra causa ed effetto); il vettore *tensione* risultante applicato al punto A in genere non è perpendicolare alla superficie di separazione.

La teoria dell'elasticità considera, la deformazione di un corpo, come il risultato di due tipi differenti di azione: una che modifica il volume attraverso *tensioni normali* (o pressioni), l'altra, che determina la variazione di forma mediante *sforzi di taglio* ossia *forze tangenziali*. Le forze di qualunque orientamento, si possono scomporre in componenti normali e tangenziali.

La configurazione di equilibrio del mezzo, cioè la condizione assunta da esso in assenza di forze esterne, è assunta come configurazione di riferimento.

Un elemento di volume del mezzo è in *equilibrio statico* se la risultante delle tensioni nelle tre direzioni dello spazio è nulla, ossia se le forze agenti, su una faccia del volume considerato, sono uguali in modulo e di verso contrario a quelle

agenti sulla faccia opposta dell'elemento stesso. Inoltre, l'equilibrio è realizzato quando il momento totale delle forze rispetto ad un punto di riferimento è zero, e quindi il volume non subisce rotazioni.

3.1.1 Campo delle deformazioni

In una regione di un materiale in condizione non deformata (regione di riferimento), è possibile definire una deformazione mediante un'applicazione biunivoca tra i punti di tale regione e gli stessi punti della regione deformata. Indicando con x , i punti della configurazione di riferimento e con X quelli della regione deformata, lo studio delle deformazioni è basato sulla funzione:

$$X = f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x)) \quad (3.1)$$

Dove le tre componenti cartesiane vengono individuate dai pedici 1, 2, 3.

L'applicazione vettoriale tra la configurazione di riferimento e la configurazione deformata associa, dunque, un vettore X ad un assegnato vettore x .

Considerando impenetrabile la materia deve risultare che $f(x) \neq f(y)$ per ogni coppia di punti materiali $x \neq y$. Questa considerazione rende la funzione f , una funzione biunivoca, e quindi giustifica l'esistenza della sua funzione inversa f^{-1} , oltre ciò è possibile affermare che per ogni deformazione sufficientemente regolare in un mezzo continuo f sia anche differenziabile [31].

A queste condizioni, è possibile identificare una matrice jacobiana $\hat{F} = \{F_{ij}, i, j = 1, 2, 3\}$ della deformazione, definita da $F_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ che è invertibile e presenta un determinante strettamente positivo.

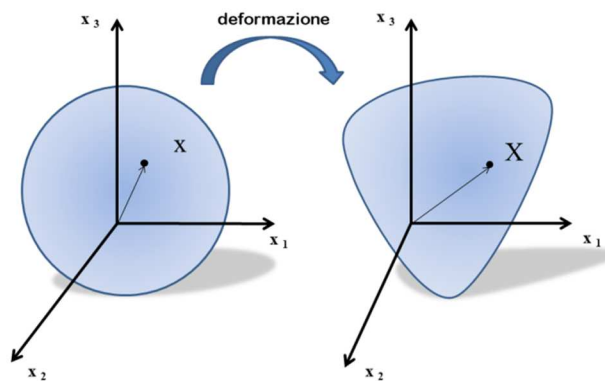


Figura 3.1.1a - Spostamento punto materiale in seguito a deformazione.

La configurazione finale di un piccolo volume, deformato intorno ad un punto arbitrario x_0 , è raggiunta attraverso due step elementari, con l'ordine di applicazione di tali step che hanno la loro importanza:

- 1) una rotazione pura locale \hat{R} (che lo ruota, ma non lo dilata o contrae in nessuna direzione spaziale);
- 2) una dilatazione (o contrazione): indicata con \hat{U} se precedente alla rotazione o con \hat{V} se seguente.

Il tensore di dilatazione (o contrazione), essendo simmetrico, ha tre direzioni principali e tre autovalori. Dunque, il volume elementare centrato su x_0 , in ciascuna delle tre direzioni, viene dilatato o contratto (come può succedere ad una sferetta che si trasforma in un ellissoide con tre differenti semiassi), a seconda che il corrispondente autovalore sia maggiore o minore di uno (tutti gli autovalori sono sempre strettamente positivi).

In termini analitici, tale situazione è rappresentata da equazioni del tipo (3.2) e definisce completamente il significato di deformazione e la sua interpretazione locale come rotazione accompagnata da dilatazione/ contrazione.

$$f(x) = f(x_0) + \hat{F}(x - x_0)$$

$$\begin{aligned}
&= f(x_0) + \hat{R}\hat{U}(x - x_0) \\
&= f(x_0) + \hat{V}\hat{R}(x - x_0)
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

In un mezzo continuo, la posizione dei punti materiali è riferita una terna cartesiana definita dai vettori posizione \mathbf{x} . Quando il mezzo è sottoposto ad una deformazione arbitraria, tutti i suoi punti materiali subiranno uno spostamento nello spazio e le loro posizioni deformate saranno indicate dai vettori \mathbf{X} (Figura 3.1.1a). La relazione che lega la configurazione di partenza con la configurazione deformata può essere espressa dall'Equazione 3.3.

$$\mathbf{X} = f(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}) \tag{3.3}$$

dove i vettori $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ rappresentano gli spostamenti che, risultano diversi per ciascun punto materiale, nel caso generale di un corpo, di forma arbitraria, sottoposto ad una generica deformazione, quindi:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \begin{cases} u_1(x_1, x_2, x_3) \\ u_2(x_1, x_2, x_3) \\ u_3(x_1, x_2, x_3) \end{cases} \tag{3.4}$$

Lo spostamento di un sistema di vettori da \mathbf{x} a \mathbf{X} può essere definito da una matrice jacobiana $\hat{f} = \{ \hat{f}_{ij}, i, j = 1, 2, 3 \}$:

$$\hat{f}_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{3.5}$$

che rappresenta la variazione di un generico spostamento lungo una certa direzione. Le dilatazioni/contrazioni descritte sono deformazioni meccaniche, legate alla trasmissione di sforzi all'interno del mezzo, mentre la rotazione locale non lo è. Dalla scomposizione della matrice Jacobiana \hat{f} possono essere estratti due tensori, uno simmetrico ed uno antisimmetrico:

$$\hat{f}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \epsilon_{ij} + \Omega_{ij} \tag{3.6}$$

dove:

$$\begin{cases} \epsilon_{ij} = \epsilon_{ji} & \text{parte simmetrica} \rightarrow \text{tensore delle piccole deformazioni} \\ \Omega_{ij} = -\Omega_{ji} & \text{parte antisimmetrica} \rightarrow \text{tensore delle rotazioni locali} \end{cases}$$

L'equazione di congruenza derivata dalla teoria elastica, mette in relazione lo spostamento con il campo di deformazioni:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

è basata sul tensore delle deformazioni infinitesime in forma simmetrizzata dato che, localmente, una rotazione non produce deformazioni dovute all'interazione di forze agenti nelle zone circostanti il punto considerato del materiale.

Tutte le informazioni riguardanti la trasformazione geometrica di un corpo sono contenute nel tensore delle deformazioni; la sua conoscenza consente di prevedere variazioni delle lunghezze e degli angoli che interessano ogni porzione del corpo.

Ad esempio in un corpo, nella configurazione indeformata, considerando due punti rappresentati dai vettori posizione \mathbf{A} e \mathbf{B} e, due punti della configurazione deformata individuati dai vettori posizione \mathbf{A}' e \mathbf{B}' come in Figura 3.1.1b,

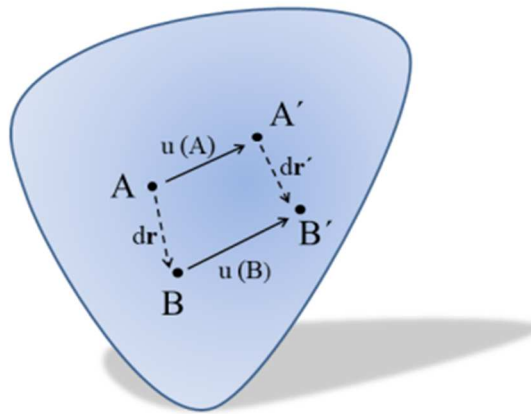


Figura 3.1.1b - Deformazioni lineari.

si ha che $\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \mathbf{u}(\mathbf{A})$ e $\mathbf{B}' = \mathbf{B} + \mathbf{u}(\mathbf{B}) = \mathbf{A} + d\mathbf{r} + \mathbf{u}(\mathbf{A} + d\mathbf{r}) = \mathbf{A} + d\mathbf{r} + \mathbf{u}(\mathbf{A}) + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A d\mathbf{r}$ e quindi $d\mathbf{r}' = \mathbf{B}' - \mathbf{A}' = d\mathbf{r} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A d\mathbf{r}$ allora è possibile scrivere, definendo $d\mathbf{r} = dr \mathbf{n}$, con \mathbf{n} versore della distanza $A - B$ ed esplicitando le componenti delle varie quantità:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{B}' - \mathbf{A}'\| &= \sqrt{\left(d\mathbf{r} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A d\mathbf{r}\right) \cdot \left(d\mathbf{r} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A d\mathbf{r}\right)} = \\ &dr \sqrt{1 + 2n \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A \cdot \mathbf{n}\right) + \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A \cdot \mathbf{n}\right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A \cdot \mathbf{n}\right)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Per piccole deformazioni si trascura il termine quadratico e se si considera $\sqrt{1+x} \sim 1 + \frac{x}{2}$ per piccoli x , si ha che:

$$\begin{aligned} d\mathbf{r}' = |\mathbf{B}' - \mathbf{A}'| &= dr \left(1 + \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A \cdot \mathbf{n}\right) \rightarrow \frac{dr' - dr}{dr} = \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}|_A \cdot \mathbf{n} = \\ &= \mathbf{n} \cdot (\hat{J}_A \cdot \mathbf{n}) \end{aligned}$$

dove:

$$\mathbf{n} \cdot \hat{J}_A \mathbf{n} = \mathbf{n} \cdot [(\hat{\epsilon} + \hat{\Omega})\mathbf{n}] = \mathbf{n} \cdot (\hat{\epsilon} \mathbf{n}) \rightarrow \hat{\epsilon}_n = \mathbf{n} \cdot (\hat{\epsilon} \mathbf{n}) \quad (3.9)$$

Le variazioni relative di lunghezza lungo le tre coordinate spaziali, se \mathbf{n} coincide con uno dei tre versori e_1, e_2, e_3 degli assi cartesiani, possono essere rappresentate dalle componenti $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}$ del tensore delle deformazioni $\hat{\epsilon}$.

Per le deformazioni degli angoli, invece, si prendono in considerazione i vettori posizione A, B e C di tre punti in un corpo in configurazione indeformata, come mostrato in figura 3.1.1c, tale che $\widehat{BAC} = \frac{\pi}{2}$.

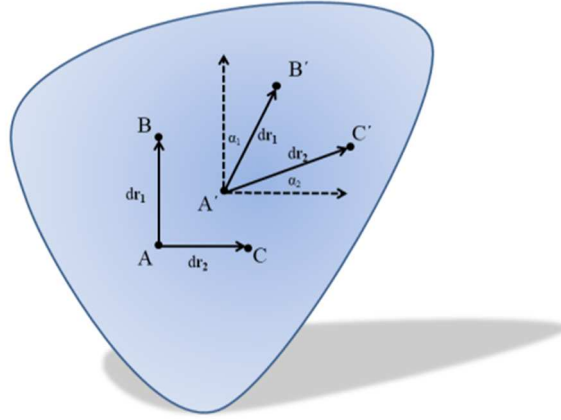


Figura 3.1.1c - Deformazioni angolari.

Dalle equazioni sopra riportate, è possibile scrivere:

$$\begin{cases} d\mathbf{r}'_1 = d\mathbf{r}_1 + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \Big|_A d\mathbf{r}_1 \\ d\mathbf{r}'_2 = d\mathbf{r}_2 + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \Big|_A d\mathbf{r}_2 \end{cases} \quad (3.10)$$

con $d\mathbf{r}_1 = dr_1 \mathbf{n}_1$ e $d\mathbf{r}_2 = dr_2 \mathbf{n}_2$ e $d\mathbf{r}_1 \cdot d\mathbf{r}_2 = 0$ (perché $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = 0$) i due angoli α_1 e α_2 calcolati come:

$$\alpha_1 \cong \widehat{\angle} \alpha_1 = \frac{d\mathbf{r}'_1 \cdot \mathbf{n}_2}{d\mathbf{r}'_2 \cdot \mathbf{n}_1} = \frac{(d\mathbf{r}_1 + \widehat{\mathbf{J}}_A d\mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{n}_2}{(d\mathbf{r}_2 + \widehat{\mathbf{J}}_A d\mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{n}_1} = \frac{(\widehat{\mathbf{J}}_A d\mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{n}_2}{d\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{n}_1} = n_2 (\widehat{\mathbf{J}}_A \mathbf{n}_1) \quad (3.11)$$

ed anche $\alpha_2 = n_1 (\widehat{\mathbf{J}}_A \mathbf{n}_2)$ e quindi la variazione che subisce un angolo retto fissato nelle direzioni \mathbf{n}_1 e \mathbf{n}_2 è data da:

$$\begin{aligned} \Delta \alpha_{n_1, n_2} &= \alpha_1 + \alpha_2 = n_2 (\widehat{\mathbf{J}}_A \mathbf{n}_1) + n_1 (\widehat{\mathbf{J}}_A \mathbf{n}_2) = \\ &= \mathbf{n}_1 \cdot [(\widehat{\mathbf{E}} + \widehat{\mathbf{\Omega}}) \mathbf{n}_2] + \mathbf{n}_2 \cdot [(\widehat{\mathbf{E}} + \widehat{\mathbf{\Omega}}) \mathbf{n}_1] \rightarrow \\ \Delta \alpha_{n_1, n_2} &= 2 \mathbf{n}_1 \cdot (\widehat{\mathbf{E}} \mathbf{n}_2) \end{aligned} \quad (3.12)$$

La (3.12) indica la variazione dell'angolo retto, con lati paralleli agli assi coordinati e giacente sul piano (x_1, x_2) . La metà della variazione dell'angolo retto formato dagli assi x_1, x_2 , è definita, esplicitando le componenti alle derivate parziali, dall'equazione: $\Delta\alpha_{n_1, n_2} = 2\epsilon_{12} = \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)$.

La stessa interpretazione è valida per le altre due componenti ϵ_{23} e ϵ_{13} .

3.1.2 Campo delle tensioni

In tutte le situazioni reali un corpo solido è soggetto a forze esterne.

La teoria in queste applicazioni è lo studio delle forze agenti che rappresentano due aspetti:

- 1) Forze di volume che dipendono esclusivamente dai campi esterni ed indicate in questa tesi con $\mathbf{b}(\mathbf{x})$ e che rappresenta la loro densità, assumendo che la forza totale $d\mathbf{F}_v$ applicata ad un volume infinitesimo dV centrato sul punto \mathbf{x} è $\mathbf{F}_v = \mathbf{b}(\mathbf{x})dV$.

Il vettore $\mathbf{b}(\mathbf{x})$ indica una forza per unità di volume, come può essere il caso delle forze gravitazionali che sono proporzionali alla massa della porzione di volume su cui agiscono. In tal caso è possibile scrivere che $d\mathbf{F}_v = \mathbf{g}dm$, con \mathbf{g} che è l'accelerazione gravitazionale e dm la massa locale. Quindi se $\rho = \frac{dm}{dV}$, si ha che $\mathbf{b}(\mathbf{x}) = \rho\mathbf{g}$.

- 2) Forze di superficie sono dovute alle azioni che ciascuna porzione di solido subisce dalla parte rimanente del mezzo continuo. In natura le azioni che due corpi scambiano tra loro possono essere descritte dall'azione tra due porzioni dello stesso corpo, o mezzo, ma separate da una superficie ideale.

Per convenzione una forza di superficie è negativa se orientata in verso opposto al vettore uscente \mathbf{n} dall'elemento di superficie dS (compressione), in caso contrario è considerata positiva (trazione).

Risulta utile introdurre la seguente notazione per la forza di superficie infinitesima dF_S agente sull'elemento dS .

$$d\mathbf{F}_S = \mathbf{f} dS \quad (3.13)$$

Con \mathbf{f} che definisce il significato fisico di una densità di forze, ottenuta grazie al teorema di Cauchy dall'equazione:

$$d\mathbf{F}_S = \hat{\mathbf{T}} \mathbf{n} dS \rightarrow dF_{S,i} = T_{ij} n_j dS \quad \rightarrow \quad \frac{dF_{S,i}}{dS} = T_{ij} n_j \quad (3.14)$$

Il tensore T_{ij} , denominato tensore degli sforzi, descrive lo stato delle pressioni vettoriali misurate in Pa (MPa o GPa) in un volumetto infinitesimo di materiale cubico. La figura 3.1.2a illustra il significato geometrico del tensore delle tensioni attraverso la rappresentazione delle sue componenti.

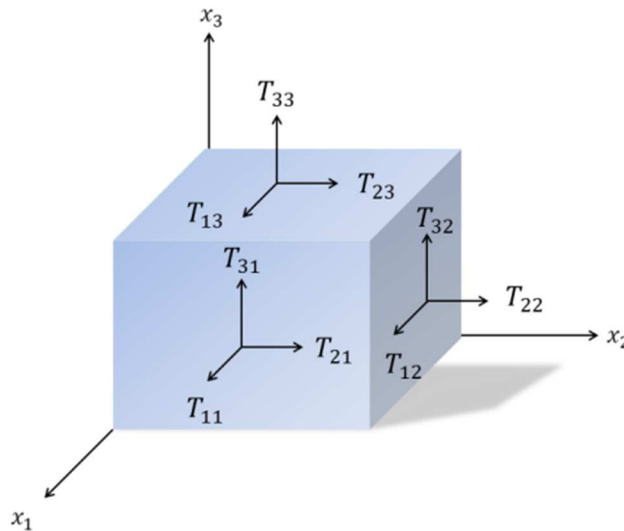


Figura 3.1.2a - Stato tensionale.

La componente T_{ij} identifica la pressione esistente sulla faccia di indice j ed agente lungo la direzione i .

Dato un piano di riferimento, le forze agenti sulla porzione presa in considerazione, possono essere forze assiali, se perpendicolari al piano o tangenziali se giacciono sullo stesso.

3.1.3 Equazione della meccanica del continuo

I fondamenti della meccanica razionale di un sistema di punti materiali, riferito ad una porzione di volume V , sono rappresentati dalle seguenti equazioni (prima e seconda equazione cardinale della meccanica):

$$\frac{dP}{dt} = F \quad \text{e} \quad \frac{dL}{dt} = M \quad (3.15)$$

Dove P è la quantità di moto totale, F la forza totale applicata, L il momento della quantità di moto ed M il momento totale delle forze applicate.

Applicando la prima equazione per un volume V di materia, delimitata dalla superficie S , si ottiene:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \frac{\partial u_j}{\partial t} dV = \int_S T_{ji} n_i dS + \int_V b_j dV \quad (3.16)$$

dove sono state scomposte le forze in contributi di superficie e di volume, e per u_j si intende la componente j -esima del vettore spostamento, funzione del punto materiale considerato.

Localmente la densità di massa vale ρ e per il teorema della divergenza e apportando ulteriori sviluppi si può scrivere la (16) nel seguente modo:

$$\int_V \left[\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} - \frac{\partial T_{ji}}{\partial x_i} - b_j \right] dV = 0 \quad \rightarrow \quad \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ji}}{\partial x_i} + b_j \quad (3.17)$$

che rappresenta la prima equazione cardinale.

Dal bilancio del momento della quantità di moto si può esplicitare la seconda equazione cardinale, nella regione V di interesse prendendo come polo, rispetto al quale si calcolano i momenti, l'origine cartesiana:

$$\frac{d}{dt} \int_V r \times \frac{\partial u}{\partial t} \rho dV = \int_S r \times (\hat{T}n) dS + \int_V r \times b dV \quad (3.18)$$

Dato che $(a \times b)_j = a_n b_m \eta_{nmj}$ con η_{nmj} simbolo di permutazione di Levi-Civita, si ha $(a \times b)_j = a_n b_m \eta_{nmj} e_j$ dove $\{e_1, e_2, e_3\}$ è la base ortonormale adottata nel sistema di riferimento cartesiano in uso ed utilizzando ancora il teorema della divergenza si ottiene:

$$\begin{aligned} \int_V [r_h \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \rho - T_{kh} - r_h \frac{\partial T_{kp}}{\partial x_p} - r_h b_k] \eta_{hkj} e_j dV &= 0 \quad \rightarrow \\ \rightarrow \int_V \{r_h [\frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \rho - \frac{\partial T_{kp}}{\partial x_p} - b_k] - T_{kh}\} \eta_{hkj} e_j dV &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Il termine tra parentesi è nullo in virtù della prima equazione cardinale e si ottiene che:

$$\begin{aligned} \int_V T_{kh} \eta_{hkj} e_j dV = 0 \quad \rightarrow \int_V T_{kh} \eta_{hkj} = 0 \quad \rightarrow \\ T_{12} = T_{21}; T_{13} = T_{31}; T_{23} = T_{32} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Che rappresenta la seconda equazione cardinale della meccanica del continuo.

3.1.4 Equazioni costitutive

La trattazione, in questa parte, si concentra sulla costruzione delle equazioni costitutive.

Esse rappresentano il legame tra il tensore delle deformazioni e il tensore delle tensioni, si ricavano tramite una legge che definisce il comportamento fisico del corpo solido quando, però, sia valida l'ipotesi che la risposta del mezzo sia elastica lineare:

$$T_{ij} = C_{ijkh}\epsilon_{kh} \quad (3.21)$$

con C_{ijkh} costanti relative al mezzo o al corpo.

La (3.21) è la legge di Hooke generalizzata, comprende ogni possibile caso di simmetria cristallina e di anisotropia.

Il tensore \hat{C} , detto tensore elastico, presenta 81 componenti ma, il numero effettivo di quelle indipendenti si può ridurre tenendo in considerazione vincoli matematici universalmente validi per precise caratteristiche del materiale (mezzo) in questione:

1) Materiali conservativi, o iperelastici (o di Green)

Se esiste una funzione $T_{ij} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{kh}}$, il materiale è conservativo ed in componenti può essere espressa da:

$$T_{11} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{11}}, T_{22} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{22}}, T_{33} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{33}}, T_{12} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{12}}, T_{13} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{13}}, T_{23} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{23}} \quad (3.22)$$

nella quale risulta verificata la condizione:

$$C_{1122} = \frac{\partial T_{11}}{\partial \epsilon_{22}} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \epsilon_{22} \partial \epsilon_{11}} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \epsilon_{11} \partial \epsilon_{22}} = \frac{\partial T_{22}}{\partial \epsilon_{11}} = C_{2211} \quad (3.23)$$

In materiali conservativi il tensore di elasticità presenta solo 21 moduli indipendenti poiché $C_{ijkh} = C_{khij}$.

2) Materiali ortotropi

Un materiale ortotropo ha assi di simmetria chiamati *assi di simmetria materiale* che definiscono tre direzioni privilegiate (fibre del legno, fibre dei compositi, ...). Le deformazioni lineari derivano dalle tensioni normali, mentre gli scorrimenti angolari sono associati alle tensioni tangenziali.

Quindi per uno stato triassiale sommando tutti i contributi si ha:

$$\epsilon_{11} = \frac{T_{11}}{E_1} - \nu_{12} \frac{T_{22}}{E_2} - \nu_{13} \frac{T_{33}}{E_3}; \quad \epsilon_{12} = \frac{T_{12}}{2\mu};$$

$$\begin{aligned}
\epsilon_{22} &= -\nu_{21} \frac{T_{11}}{E_1} + \frac{T_{22}}{E_2} - \nu_{23} \frac{T_{33}}{E_3}; & \epsilon_{13} &= \frac{T_{13}}{2\mu}; \\
\epsilon_{33} &= -\nu_{31} \frac{T_{11}}{E_1} - \nu_{32} \frac{T_{22}}{E_2} + \frac{T_{33}}{E_3}; & \epsilon_{23} &= \frac{T_{23}}{2\mu};
\end{aligned} \tag{3.24}$$

dove E_i è il modulo di elasticità lungo la direzione i , ν_{ij} sono i coefficienti di Poisson, che misurano la parte di deformazione trasversali in rapporto alla deformazione longitudinale, sono negativi, perché ad allungamenti longitudinali corrispondono accorciamenti trasversali e μ è il modulo di elasticità tangenziale. Un materiale ortotropo può essere caratterizzato dolo da 12 costanti, se il materiale è anche conservativo ne bastano 9.

3) Materiali isotropi ed omogenei

I materiali isotropi presentano proprietà meccaniche che non dipendono dalla direzione considerata e quindi risultano invarianti per rotazioni. La legge costitutiva che li governa ammette un solo modulo di Young (E), un solo coefficiente di Poisson (ν) e un solo modulo di elasticità tangenziale (μ). Le equazioni seguenti descrivono le loro caratteristiche:

$$\begin{aligned}
T_{11} &= (2\mu + \lambda)\epsilon_{11} + \lambda(\epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \rightarrow T_{11} = 2\mu\epsilon_{11} + \lambda(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \\
T_{22} &= (2\mu + \lambda)\epsilon_{22} + \lambda(\epsilon_{11} + \epsilon_{33}) \rightarrow T_{22} = 2\mu\epsilon_{22} + \lambda(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \\
T_{33} &= (2\mu + \lambda)\epsilon_{33} + \lambda(\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) \rightarrow T_{33} = 2\mu\epsilon_{33} + \lambda(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \\
T_{12} &= \mu\epsilon_{12} \\
T_{13} &= \mu\epsilon_{13} \\
T_{23} &= \mu\epsilon_{23}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Le costanti μ e λ sono i *coefficienti di Lamé* e valgono:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} ; \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{3.26}$$

Dalle (3.26), l'equazione costitutiva, in regime lineare elastico per un mezzo omogeneo e isotropo può essere scritta nella forma tensoriale come:

$$\hat{T} = 2\mu \hat{E} + \lambda \hat{I} Tr(\hat{E}) \quad (3.27)$$

Con \hat{I} tensore di identità (o di Kronecker), $Tr(\hat{E})$ traccia del tensore \hat{E} ($Tr(\hat{E}) = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$) che rappresenta un'invariante, non dipende dal sistema di riferimento per cui, il valore della deformazione, è identico per tutti gli osservatori. Esplicitando le componenti della (3.27) si ottiene:

$$T_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} \quad (3.28)$$

3.2 Equazioni d'onda

È possibile definire un'onda come uno stato fisico di non equilibrio, caratterizzato da una grandezza fisica, che si propaga e che trasferisce energia da un punto all'altro di un mezzo (mezzo elastico o vuoto).

Un'onda acustica è una propagazione, attraverso un mezzo, di una variazione di pressione, un'onda elettromagnetica è uno stato di non equilibrio di un'intensità del campo elettromagnetico che si propaga anche nel vuoto, un'onda sismica è una propagazione di una deformazione in mezzi solidi ecc.

Un'onda è rappresentata quindi dalla propagazione di una grandezza fisica, f , dipendente dal tempo e dallo spazio.

La grandezza $f(x, y, z, t)$ per essere considerata un'onda, deve essere soluzione di un'equazione, nota come *equazione delle onde*.

L'equazione delle onde è descritta dalla (3.29):

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 f \quad (3.29)$$

tale equazione rappresenta una perturbazione, di una data grandezza fisica, che si propaga nello spazio e nel tempo. Nel caso monodimensionale, l'equazione (3.29) si trasforma in:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (3.30)$$

poiché il Laplaciano coincide con la derivata seconda rispetto all'unica variabile x (direzione di propagazione).

L'equazione delle onde assume il nome di equazione di d'Alembert.

Dalla (3.30) si ricava, la forma delle soluzioni di tale equazione attraverso un cambiamento di variabili da x e t a ξ e η .

$$\xi = x - ct \quad (3.31)$$

$$\eta = x + ct \quad (3.32)$$

dove c è una costante indipendente dalle variabili x e t ed in modo che la funzione incognita $f(x, t)$ diventi:

$$f(\xi, \eta) = f[\xi(x, t), \eta(x, t)] \quad (3.33)$$

Calcolando le derivate prime e seconde rispetto a x e a t , da sostituire nell'equazione (3.31), e usando le regole di derivazione di funzioni composte si arriva alla formula:

$$\frac{\partial^2 f(\xi, \eta)}{\partial \xi \partial \eta} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\partial f(\xi, \eta)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (3.34)$$

la quantità $\frac{\partial f(\xi, \eta)}{\partial \eta}$ è costante rispetto a ξ e, quindi, può dipendere solo da η , allora si ha:

$$\left[\frac{\partial f(\xi, \eta)}{\partial \eta} \right] = G(\eta) \quad (3.35)$$

con $G(\eta)$, funzione arbitraria che integrata fornisce l'equazione:

$$f(\xi, \eta) = \int G(\eta) d\eta + A(\xi) \quad (3.36)$$

chiamando la primitiva di $G(\eta)$ come $B(\eta)$ si ha la soluzione di D'Alambert

$$f(\xi, \eta) = A(\xi) + B(\eta) \rightarrow$$

$$f(x, t) = A(x - vt) + B(x + vt) \quad (3.37)$$

in cui le funzioni arbitrarie A e B vengono determinate normalmente considerando le condizioni iniziali.

Supponendo una soluzione in cui si prenda solo la soluzione A , ad un certo istante t_0 la funzione assume il valore $f(x, t_0) = A(x - vt_0)$, mentre dopo un intervallo di tempo Δt la funzione $f(x, t_0 + \Delta t)$ diventa:

$$f(x, t_0 + \Delta t) = A[x - v(t_0 + \Delta t)] = A[x - vt_0 - v\Delta t] = A[(x - v\Delta t) - vt_0]$$

e cioè:

$$f(x, t_0 + \Delta t) = f(x - v\Delta t, t_0) \quad (3.38)$$

Quest'ultima relazione indica che le funzioni $f(x, t_0)$ e $f(x, t_0 + \Delta t)$, in un piano f, x sono identiche, a meno di una traslazione nel verso positivo dell'asse delle x corrispondente ad una lunghezza $\Delta l = v\Delta t$. Quindi la funzione $A(x - vt)$ chiamata *onda progressiva* definisce un'onda che si propaga nel verso positivo dell'asse x mentre il coefficiente v è la velocità di propagazione dell'onda. Dall'altra parte il termine $B(x + vt)$ è detto *onda regressiva* e rappresenta un'onda che viaggia nel verso negativo delle x . La raffigurazione nel tempo e nello spazio di tale carattere dell'onda è riportata in Figura 3.2a.

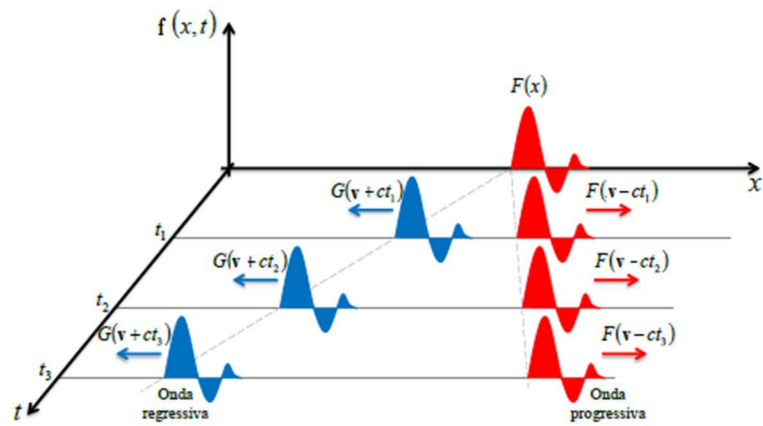


Figura 3.2a - Onda regressiva ed onda progressiva.

3.2.1 Onde elastiche piane

Come descritto nel paragrafo precedente le tre equazioni che descrivono la teoria elastica in un mezzo lineare, omogeneo ed isotropo sono:

- 1) $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$
- 2) $\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ji}}{\partial x_i} + b_j ;$
- 3) $T_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} ;$

Tramite la sostituzione e la combinazione di queste tre equazioni, si ricava l'equazione di Lamé, che ha come incognita il vettore spostamento.

$$(\mu + \lambda) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + b_i \quad (3.39)$$

La (3.39) è un'equazione differenziale lineare alle derivate parziali del secondo ordine e rappresenta l'equazione del moto in un mezzo elastico normale.

Le soluzioni particolari di tale equazione permettono di caratterizzare le onde elastiche piane.

Si considera, in questa trattazione, la direzione di propagazione dell'onda, la coordinata di riferimento x_3 .

Nelle onde piane dunque il campo vettoriale \mathbf{u} dipenderà soltanto da x_3 e da t . Le componenti dello spostamento sono funzioni del tipo: $u_1 = u_1(x_3, t)$, $u_2 = u_2(x_3, t)$, $u_3 = u_3(x_3, t)$ che comportano nel campo delle deformazioni l'annullamento di 6 suoi componenti.

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} = 0 ; \quad \frac{\partial u_2}{\partial x_1} = 0 ; \quad \frac{\partial u_3}{\partial x_1} = 0$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_2} = 0 ; \quad \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0 ; \quad \frac{\partial u_3}{\partial x_2} = 0 \quad (3.40)$$

Dall'equazione del moto (3.39), esplicitando tutte le componenti senza considerare forza di volume (azioni che generano la propagazione poste a distanza infinita dalla regione di osservazione) si ottiene un sistema di tre equazioni molto semplificato:

$$\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_3^2} = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}$$

$$\mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_3^2} = \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_3^2} = \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (3.41)$$

Le equazioni sopra rappresentate, si rifanno a quelle di D'Alambert; nello specifico è facile notare che l'equazione nella direzione di propagazione dell'onda presenta coefficienti diversi rispetto alle altre due, che invece descrivono spostamenti ortogonali rispetto alla direzione longitudinale.

3.2.2 Grandezze caratteristiche delle onde sonore

Velocità di propagazione

La velocità di propagazione (m/s) indica lo spazio percorso dal fronte d'onda nell'unità di tempo. Dipende soprattutto dalle caratteristiche del mezzo, solido o fluido, in cui l'onda si propaga (modulo di elasticità E, densità ρ e coefficiente di Poisson ν).

Periodo

Il periodo T (s) di un'onda sinusoidale è il tempo che intercorre tra il passaggio di un massimo di pressione al successivo.

Frequenza

La frequenza f , (Hz), è il numero di cicli dell'onda al secondo ed è l'inverso del periodo:

$$f = \frac{1}{T} \quad [Hz] \quad (3.42)$$

Lunghezza d'onda

La lunghezza d'onda λ , (m), rappresenta la distanza percorsa dell'onda sonora in un periodo T e alla velocità v. Ovvero il rapporto tra la velocità e la frequenza.

Pulsazione

La pulsazione ω , si esprime in radianti al secondo ed è definita dall'equazione:

$$\omega = 2\pi f \quad \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.43)$$

Impedenza acustica

L'impedenza acustica indica la maggiore o minore trasparenza del mezzo al passaggio dell'onda acustica ed è espresso dalla formula:

$$Z = \rho V \left[\frac{Ns}{m^2} \right] \quad (3.44)$$

in cui ρ rappresenta la densità del mezzo $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ e V la velocità di propagazione. L'impedenza dipende dal tipo di materiale attraversato e dalle modalità di propagazione delle onde (longitudinali, trasversali o superficiali).

Intensità acustica

L'intensità è la quantità di energia che attraversa l'unità di superficie nell'unità di tempo ed è data analiticamente dalla relazione:

$$I = \frac{p^2}{2Z} \left[\frac{\frac{J}{s}}{m^2} \right] \quad (3.45)$$

con p che definisce la pressione acustica espressa in $\left[\frac{N}{m^2} \right]$.

3.2.3 Propagazione onde

La propagazione delle onde acustiche dipende dalle caratteristiche del mezzo attraversato e dal modo di emissione dell'onda. Nei solidi cristallini, la propagazione della perturbazione può avvenire sotto forma di onde longitudinali, trasversali, superficiali o onde di Lamb.

Nei fluidi, si possono trasmettere solo onde longitudinali.

La caratterizzazione delle onde dipende dalla direzione dello spostamento delle particelle del mezzo e dalla direzione di propagazione dei fronti d'onda.

Come detto sopra, i parametri fisici che descrivono lo stato elastico del materiale e che influiscono sulla velocità di trasmissione delle onde sonore sono:

- E modulo di Young (o modulo di elasticità) $\left[\frac{N}{m^2} \right]$;
- ν coefficiente di Poisson (adimensionale);
- ρ densità del mezzo $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$;
- β modulo di compressibilità $\left[\frac{N}{m^2} \right]$;

Per materiali omogenei ed isotropi il modulo di Young ed il coefficiente di Poisson hanno valore identico per ogni direzione, per i materiali ortotropi ogni direzione presenta valori diversi nei differenti tratti; spesso si utilizza nei calcoli il loro valore medio.

Nei liquidi e nei gas ideali, essendo assenti gli sforzi di taglio, entra in gioco il modulo di compressibilità che mette in relazione una variazione di pressione e una diminuzione percentuale della densità del fluido.

Onde longitudinali

Le onde longitudinali, chiamate anche onde di compressione o onde di dilatazione o onde P (primarie), sono rappresentate da fasi alterne di compressione e rarefazione delle particelle nel mezzo, come indicato nella figura sottostante Figura (3.2.3a):

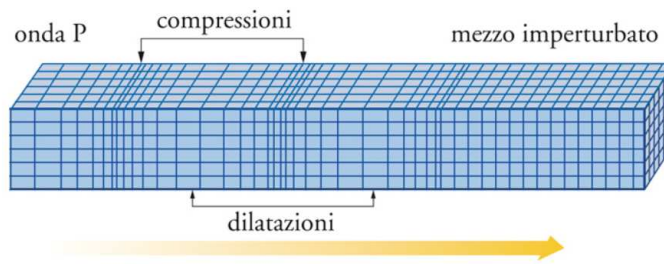


Figura 3.2.3a - Compressione ed espansione.

Le particelle del mezzo attraversate si muovono cioè con spostamenti che avvengono nella stessa direzione di propagazione dell'onda sonora.

La distanza tra due massimi di compressione consecutivi rappresenta la lunghezza d'onda λ , la direzione di vibrazione è perpendicolare al piano di emissione della sonda generatrice.

La velocità di propagazione delle onde P risulta essere:

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + \mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.46)$$

Onde trasversali

Le onde trasversali o anche onde di taglio o onde S (secondarie) definiscono la fluttuazione delle particelle o degli atomi del mezzo di trasmissione nella direzione ortogonale al senso di propagazione dell'onda, come identificabile nella Figura 3.2.3b.

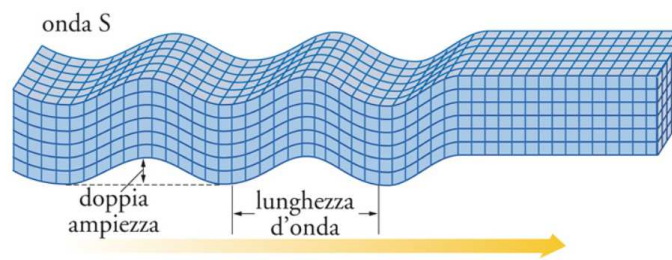


Figura 3.2.3b - Onde di taglio.

La distanza tra due massimi di spostamento consecutivi rappresenta la lunghezza d'onda λ dell'onda acustica. La direzione dell'oscillazione delle particelle, sottoposte a sforzi di taglio, è perpendicolare alla direzione di propagazione.

Le onde trasversali si propagano solo nei corpi solidi, in quanto nei liquidi e nei gas, risultano notevolmente attenuate poiché l'unica causa della formazione di sollecitazioni di taglio è dovuta alla viscosità del fluido.

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.47)$$

Onde superficiali

Le onde superficiali o terziarie sono perturbazioni dello spazio nel tempo, si propagano lungo la superficie del mezzo e si suddividono in:

- 1) Onde di Love (L): sono onde superficiali con moto perpendicolare alla direzione di propagazione ma polarizzate sul piano orizzontale. Esse si propagano solo in presenza di uno strato superficiale a bassa velocità e non si propagano nei fluidi.

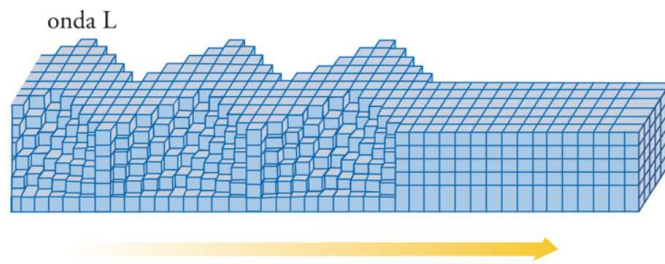


Figura 3.2.3c - Onde di Love.

- 2) Onde di Rayleigh (R): questo tipo di onde causano un movimento ellittico retrogrado delle particelle con un asse dell'ellisse parallelo alla direzione dell'onda e l'altro ortogonale alla superficie libera.

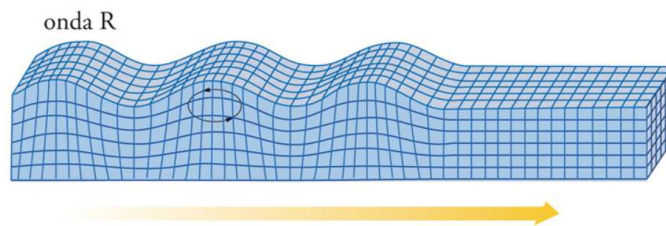


Figura 3.2.3d - Onde di Rayleigh.

Le onde superficiali sono più lente delle onde secondarie, e per la loro minore attenuazione con la distanza, sono responsabili dei danni causati dai terremoti. Se nel caso di un terremoto il movimento è sussultorio, prevale la componente di Rayleigh, mentre se il movimento è ondulatorio, prevale la componente delle onde di Love. L'ampiezza di tali onde si smorza esponenzialmente con la profondità in funzione della frequenza.

La velocità delle onde superficiali è:

$$V_S = \left(\frac{0.87 + 1.12 \nu}{1 - \nu} \right) \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.48)$$

Poiché λ e μ sono parametri fisici e quindi i loro valori numerici sono sempre > 0 , risulta sempre che la velocità delle onde longitudinali è maggiore di quella delle onde trasversali.

La densità come si nota a denominatore è un fattore contrastante, quindi corpi più densi con le stesse caratteristiche elastiche, ovvero con lo stesso richiamo elastico, produrranno accelerazioni minori e una conseguente minore efficacia nella trasmissione del moto.

Quindi la velocità delle onde, a parità di caratteristiche elastiche del mezzo, è inversamente proporzionale alla densità.

I fluidi non oppongono alcuna resistenza agli sforzi di taglio, ossia una minima sollecitazione produce sempre una deformazione. Per questo motivo le onde trasversali non si propagano nei fluidi. Il suono infatti, si propaga in acqua o in aria solo grazie alle onde longitudinali.

Suono come onda longitudinale

Il suono è la propagazione di un'onda di compressione e di dilatazione delle particelle costituenti l'aria.

La velocità del suono in aria può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.49)$$

Con β , modulo di compressibilità e ρ densità dell'aria o del gas in questione;

β , per l'aria vale all'incirca 0.142 MPa mentre per l'acqua, circa 2.2 GPa .

Quando l'onda si propaga, si manifestano variazioni locali di pressione dP , che corrispondono a variazioni locali di densità.

Dalla termodinamica sappiamo che la relazione per i gas è:

$$PV^\gamma = \text{costante} \quad (3.50)$$

γ è la costante dei gas che per un gas monoatomico risulta essere di $\frac{5}{3}$ mentre per un gas biatomico è di $\frac{7}{5}$.

Attraverso opportuni passaggi di derivazione si ottengono le seguenti equazioni:

$$P\gamma V^{\gamma-1}dV + VdP = 0$$

$$P\gamma dV + VdP = 0$$

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{\gamma P}dP \quad (3.51)$$

Il coefficiente di compressibilità volumica diventa $\beta = P\gamma$, e la velocità di propagazione di un'onda elastica nei gas vale:

$$v = \sqrt{\gamma \left(\frac{P}{\rho}\right)} \quad (3.52)$$

Per cui, attraverso l'equazione dei gas perfetti, esplicitando temperatura e peso molecolare del gas presente, diventa:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (3.53)$$

con R che è la costante universale dei gas. Non considerando variazioni di pressione atmosferica e variazioni di densità, la velocità del suono in aria può essere scritta dalla formula

$$v = \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \approx 331.4 + 0.6 t \quad (3.54)$$

Con t corrispondente alla temperatura in gradi Celsius.

Coefficiente di riflessione e trasmissione

La superficie di separazione tra due mezzi ad impedenza diversa, se attraversata da un fascio ultrasonoro, determina fenomeni di riflessione e di rifrazione.

Nella prima, una parte dell'onda torna indietro (echo), nella seconda avanza nel secondo mezzo ma viene deviata di un certo angolo.

La quantità di energia riflessa dell'onda incidente che ha energia (I) risulta uguale al prodotto ($r * I$), dove r indica il coefficiente di riflessione:

$$r = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (3.55)$$

nel quale Z_1 e Z_2 sono le impedenze acustiche dei due mezzi.

La parte restante dell'energia ($t * I$) viene trasmessa nel secondo mezzo e l'indice di trasmissione viene calcolato tramite l'equazione:

$$t = \left(\frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right) \quad (3.56)$$

Quando il rapporto $\left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)$ tende ad 1, il coefficiente di riflessione tende a 0, mentre r tende ad 1 se il rapporto $\frac{Z_1}{Z_2}$ tende ad infinito. Dal bilancio energetico si ricava che:

$$r + t = 1 \quad (3.57)$$

Riflessione della discontinuità aria-acqua.

Assumendo la propagazione di un'onda sonora in aria, a 24°C , di $v_1 = 343 \frac{m}{s}$ e nell'acqua di $v_2 = 1450 \frac{m}{s}$, con rispettive densità di $\rho_1 = 1.2 \frac{Kg}{m^3}$ e $\rho_2 = 10^3 \frac{Kg}{m^3}$, si trova che $Z_1 = 412 \text{ Rayl}$ e $Z_2 = 1450 \cdot 10^3 \text{ Rayl}$, si ottiene che l'indice di riflessione è di $r = 0.9994$, da questo risultato si può intuire che l'acqua è un riflettore perfetto, sia che l'onda venga generata in acqua sia che venga generata in aria.

La discontinuità acqua-acciaio, invece, presenta un indice di riflessione pari a 0,46; in questo caso è più favorevole la trasmissione.

Incidenza ortogonale e obliqua

La legge di Snell implica che l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione e stabilisce la relazione:

$$\frac{\sin \theta^1}{\sin \theta^2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.58)$$

dove V_1 e V_2 sono le velocità di propagazione nei due mezzi.

Quando tale situazione riguarda le onde elastiche, la loro interazione con il mezzo dipende dalle caratteristiche del solido o del fluido attraversato e dalla tipologia dell'onda incidente.

Nell'interfaccia liquido – solido ad esempio, come mostrato in Figura (3.2.3e), considerando un fluido ideale, se l'onda incidente è longitudinale, essa rimane longitudinale anche quando riflessa e si ha che $\theta_1 = \theta'_1$; nella parte solida invece il moto sarà più complesso e si svilupperà insieme all'onda longitudinale, un'onda di tipo trasversale.

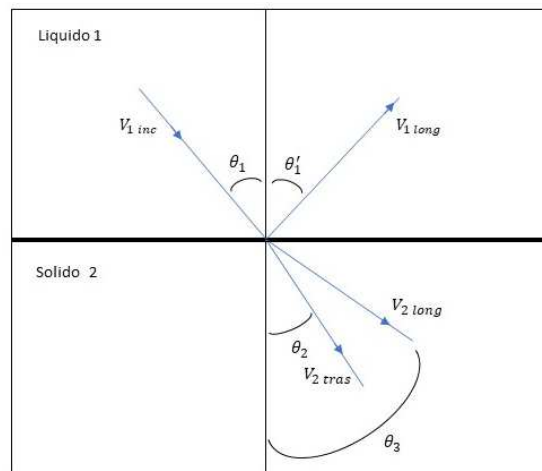


Figura 3.2.3e - Incidenza obliqua liquido -solido.

Dalla legge di Snell, che continua a valere anche in questa situazione, valgono le seguenti equazioni:

$$V_{1\text{ inc.}}^{\text{fluido}} \theta_2^{\text{solido}} = V_{2\text{ tras.}}^{\text{solido}} \theta_1^{\text{liquido}} ;$$

$$V_{1\text{ inc.}}^{\text{fluido}} \theta_3^{\text{solido}} = V_{2\text{ long.}}^{\text{solido}} \theta_1^{\text{liquido}} ;$$

Poiché, $V_{2\text{ long.}}^{\text{solido}} > V_{2\text{ tras.}}^{\text{solido}}$, è sempre valida la relazione $\theta_3^{\text{solido}} > \theta_2^{\text{solido}}$. Il fenomeno per cui da un'onda di tipo longitudinale può nascere un'onda di tipo trasversale si chiama *conversione modale*.

Quando entrambi i mezzi sono entrambi solidi, ma con caratteristiche diverse; se un'onda longitudinale è incidente in modo obliquo si generano due onde riflesse, una longitudinale ed una trasversale, e due onde trasmesse, una longitudinale ed una trasversale. La situazione è analoga nel caso in cui l'onda incidente sia trasversale.

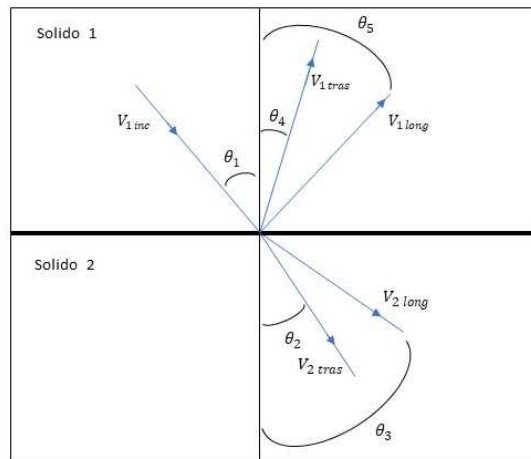


Figura 3.2.3f - Incidenza obliqua solido-solido

Dalla Figura 3.2.3f, definiti gli angoli $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ e le velocità $V_{1\text{ inc}}, V_{1\text{ long}}, V_{1\text{ tras}}, V_{2\text{ long}}, V_{2\text{ tras}}$ agenti in tale configurazione, è possibile scrivere la relazione:

$$\frac{\sin \theta_2}{V_{2\text{ long}}} = \frac{\sin \theta_3}{V_{2\text{ long}}} = \frac{\sin \theta_4}{V_{1\text{ tras}}} = \frac{\sin \theta_5}{V_{1\text{ long}}} \quad (3.59)$$

Al variare dell'angolo di incidenza, θ_1 , si può avere onde longitudinali o trasversali nel mezzo 2. Inoltre vengono definiti i due angoli:

- 1) 1° angolo critico → valore dell'angolo d'incidenza in corrispondenza del quale l'angolo di rifrazione delle onde longitudinale θ_3 è di 90° .
- 2) 2° angolo critico → valore dell'angolo d'incidenza in corrispondenza del quale l'angolo di rifrazione delle onde trasversali θ_2 vale 90° .

Usualmente l'angolo d'incidenza tra il 1° angolo critico e il 2° angolo critico viene utilizzato per sonde angolate, nell'ispezione interna di materiali.

In questa condizione infatti la trasmissione nel secondo mezzo è caratterizzata solo dalla presenza delle onde trasversali. Quando, invece, l'angolo d'incidenza è uguale al 2° angolo critico, si ha la propagazione nel secondo mezzo delle sole onde superficiali mentre per angoli d'incidenza maggiore si ha una riflessione totale del fascio sonoro.

Attenuazione delle onde

Quando il suono attraversa un mezzo, la sua intensità diminuisce con la distanza. La pressione sonora viene ridotta dalla diffusione dell'onda. I materiali naturali producono tutti un effetto che indebolisce ulteriormente il suono. Tale indebolimento è dovuto alla dispersione e all'assorbimento. Il primo è la riflessione del suono in direzioni diverse da quella originale di propagazione. L'assorbimento, invece, è la conversione dell'energia sonora in altre forme di energia (calore). L'effetto combinato di dispersione e assorbimento è chiamato attenuazione. L'attenuazione dell'onda sonora è il tasso di decadimento dell'onda mentre si propaga attraverso il mezzo.

Il decadimento dell'ampiezza di un'onda piana può essere espresso da:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (3.60)$$

dove, A_0 è l'ampiezza iniziale non attenuata dell'onda che si propaga in qualche direzione. L'ampiezza A è l'ampiezza ridotta dopo che l'onda ha percorso una

distanza x dalla posizione iniziale. Il valore α è il coefficiente di attenuazione dell'onda che viaggia in direzione x .

Essendo l'aria un mezzo non perfettamente elastico, è possibile riscontrare una debole dissipazione di energia acustica in calore. Tale fenomeno cresce con il quadrato della frequenza, e dipende dai parametri fisici di temperatura ed umidità.

L'assorbimento molecolare dell'aria è causato da due processi:

- 1) Dissipazione dell'energia dell'onda sonora per effetto della trasmissione di calore e per la viscosità dell'aria ed assume importanza per temperature e frequenze elevate.
- 2) Dissipazione per effetto dei movimenti rotazionali e vibrazionali che assumono le molecole d'ossigeno e azoto nell'aria sotto le azioni di compressione e rarefazione. Tale effetto, diventa rilevante solo quando si considera la propagazione a distanze pari a diverse lunghezze d'onda.

L'attenuazione aumenta con la temperatura: infatti per un'atmosfera con una data umidità specifica ed una temperatura compresa tra i 15 e 30 °C, l'attenuazione aumenta di circa l'8% per ogni 10 °C di aumento di temperatura. L'assorbimento cresce all'aumentare della frequenza secondo un andamento che risente della presenza di umidità.

Come riscontrabile dalla Figura 3.2.3g, a basse frequenze, tanto maggiore è l'umidità tanto minore è l'assorbimento. A frequenze più alte per ($f > 10$ kHz) l'andamento è opposto. Infatti, sotto i 100 Hz l'assorbimento è molto basso, nell'ordine di 1 dB/km mentre oltre i 12-13 KHz è riscontrabile una forte attenuazione. Gli ultrasuoni infatti dopo pochi metri vengono attenuati completamente. Oltre a ciò, se la temperatura è elevata, l'umidità favorisce la propagazione, e, se la temperatura è bassa l'umidità favorisce l'attenuazione del suono.

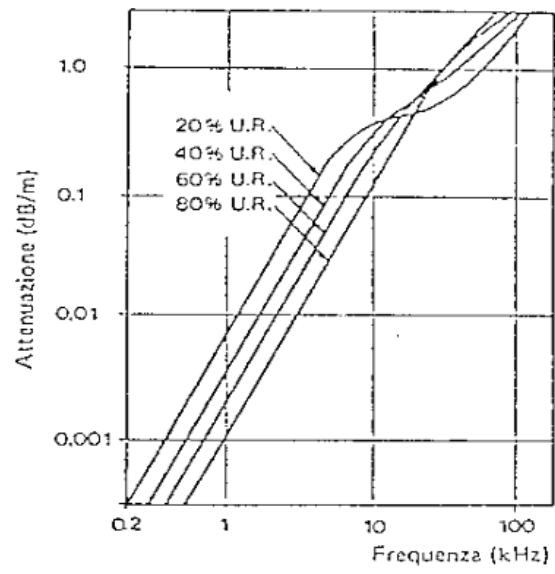


Figura 3.2.3g - Attenuazione delle onde sonore in aria.

Capitolo 4 Applicazione degli ultrasuoni

Per generare le onde ultrasoniche si ricorre, tipicamente, a dispositivi capaci di trasformare l'elettricità in vibrazioni meccaniche dell'aria o di altri fluidi. Tali apparecchiature sono chiamate trasduttori, quelli più comunemente usati nella produzione di ultrasuoni sono simili ad altoparlanti dimensionati e caratterizzati in modo da generare alte frequenze ($f > 20\text{KHz}$); queste si possono raggiungere grazie al movimento di corpi, di massa molto ridotta e di appropriati sostegni elastici capaci di vibrare a frequenze alte.

I trasduttori ideali, per le frequenze oltre l'udibile, sfruttano prevalentemente due fenomeni fisici: la magnetostrizione e la piezoelettricità.

Nei primi l'ultrasuono viene prodotto dalle variazioni di volume di un corpo metallico sottoposto a un campo magnetico, le vibrazioni indotte vengono trasmesse all'aria o altro fluido, con una frequenza che è la stessa della corrente variabile che alimenta il magnete. Questo tipo di trasduttori presentano il vantaggio di poter resistere ad elevate potenze ma, se usati per generare ultrasuoni ad alte frequenze, danno luogo a surriscaldamento e ad un fastidioso rumore di esercizio.

Nei secondi le onde ultrasoniche hanno origine dalle vibrazioni indotte, nei materiali piezoelettrici come il quarzo o composti ceramici, dalla differenza di potenziale elettrico applicata su due facce opposte del cristallo (fenomeno piezoelettrico inverso). Il rendimento migliore, si ha quando il materiale ha il minor valore dell'impedenza per cui, le oscillazioni, raggiungono il massimo dell'ampiezza; ciò si verifica quando la frequenza d'uso corrisponde alla frequenza di risonanza meccanica del materiale usato.

I principali pregi di questi trasduttori sono: la possibilità di operare anche a frequenze molto elevate senza produrre né rumore né calore; la capacità di resistere a temperature alte; la versatilità dovuta alla grande varietà di forme e dimensione che possono assumere[51].

I trasduttori sono, dunque, dispositivi che emettono onde ultrasoniche di frequenza unica o di frequenze armoniche, per lo più usati in condizione di risonanza, possono essere però implementati da meccanismi diversi di regolazione dell'irradiazione; infatti il getto può essere fluido, a sirena, a fischio ecc.

Se le frequenze richieste devono essere di poco superiore a 20 kHz si usano strumenti chiamati ionofoni che non sono periodici[52].

Gli ultrasuoni si possono produrre quindi con tecniche diverse ma la scelta del tipo di trasduttore dipende, naturalmente, dall'uso che se ne vuol fare. Ad esempio, nei sistemi radar si impiegano capsule emittenti che sono piccoli altoparlanti piezoelettrici, invece per apparati medicali o sistemi di analisi di materiali, essendo le frequenze e le potenze in gioco assai maggiori, si opta per strutture diverse come membrane piatte e rigide.

La ricezione dei segnali ultrasonici è effettuata, di solito, per mezzo di speciali radiometri sensibili alla pressione di radiazione ma può avvenire anche mediante altri sistemi come ad esempio dispositivi a termocoppia.

Gli ambiti nei quali gli ultrasuoni trovano largo impiego sono:

- sistemi per il rilevamento di oggetti fermi o in movimento (radar) e per misurazione di distanze o di livello (metri a ultrasuoni)[53-63];
- diagnostica clinica (ecodoppler ed ecografia)[64][65];
- interventi clinici (disgregazione dei calcoli renali...)[66][67];
- attività di ricerca oceanografica (scandaglio e sonar);
- industria meccanica (saldatura, ricerca e rilevazione dei difetti nei materiali...);
- pulizia (lavatrici industriale...);
- ambiente (scaccia insetti e scacciacani...);

In sostanza, le applicazioni degli ultrasuoni possono essere classificate in due categorie: quelle in cui si sfruttano gli effetti delle onde sonore e quelle nelle quali si analizzano le onde riflesse dai materiali irradiati per ricavarne informazioni sulla distanza o sulla consistenza.

4.1 Misuratori di distanza

L'impiego degli ultrasuoni nel determinare la distanza di oggetti fermi o in movimento presenta due aspetti favorevoli non trascurabili: a) scarsa incidenza nell'inquinamento acustico, data la non udibilità da parte della specie umana; b) possibilità di imprimere una direzionalità alle vibrazioni, capacità tanto maggiore quanto è più alta la frequenza. Ultrasuoni a 40 kHz- 200kHz possono essere facilmente diretti verso il bersaglio prescelto.

La distanza, che un segnale ad ultrasuoni, può raggiungere dipende dalla potenza del trasmettitore, dalla sensibilità del dispositivo ricevente, dalle condizioni ambientali dell'aria o del fluido attraversato dalle onde, dalle caratteristiche del target (coefficiente di riflessione, forma).

La precisione della misura è correlata al grado di direzionalità del trasduttore che, a sua volta, è funzione crescente della frequenza.

Di solito, l'ampiezza angolare del fascio delle onde irradiate non è superiore ai 30° gradi.

Con frequenze per cui le onde si propagano lateralmente, gli echi rilevati proverrebbero non solo dal target scelto ma anche da oggetti situati di lato ai trasduttori, per cui la precisione della misura scenderebbe di valore.

Conoscendo l'istante esatto di rilascio dell'onda sonora, il tempo impiegato nel percorso di andata e ritorno, i parametri ambientali e le modalità di adeguamento dei dati, si determina lo spazio percorso dall'onda come:

$$s = \frac{v*t}{2} \quad (4.1)$$

che rappresenta la distanza ricercata; dove v è la velocità di propagazione e t il tempo che intercorre tra la partenza del segnale e il suo arrivo al dispositivo di ricezione.

I metri ultrasonici sono strumenti di piccole dimensioni solitamente palmari e vengono usati generalmente all'interno di edifici, sono alimentati da batterie ed hanno una potenza limitata (0.05 Watt/cm²).

Quanto detto è il principio generale su cui si basano apparecchiature come il radar e il sonar. Essi captano l'echo prodotto dalle onde ultrasoniche quando queste colpiscono oggetti capaci di rifletterle, senza cioè assorbirle.

L'effetto Doppler è alla base del funzionamento di gran parte dei radar ad ultrasuoni; quando un corpo in movimento emette onde sonore queste vengono riflesse con frequenze maggiori o minori a seconda se diminuisce o aumenta la distanza; analogamente, se la sorgente è su una postazione fissa, si può rilevare la presenza di persone o oggetti in movimento dalla variazione della frequenza delle onde di ritorno. Questo permette, ad esempio, di individuare, tra l'altro, eventuali ostacoli nella circolazione automobilistica o di rilevare la presenza di persone o di oggetti da parte dei sistemi di allarme.

In acqua le onde ultrasoniche si propagano più facilmente che in aria, ciò spiega il loro largo impiego nel rilevamento degli oggetti sommersi.

Anche i sistemi di scandaglio dei fondali marini come i sonar usano questa tecnica. Essi lavorano a basse frequenze (max. 200 kHz) per la rilevazione ad ampio raggio, in tal caso la propagazione delle onde trasmesse e riflesse è omnidirezionale. Nei sistemi di eco-scandaglio ideati per scoprire il profilo batimetrico dei fondali o per rilevare la posizione di animali marini, invece, si usano onde a frequenze più elevate in quanto risultano più direzionali.

I sonar (Sound Navigation and Ranging) possono essere di tipo passivo[68-70] e attivo[71][72], il primo consente di ascoltare, tramite microfoni ad alta sensibilità, i rumori generati da altri corpi immersi o natanti. Il secondo tipo utilizza un generatore di onde ultrasoniche che irradia l'acqua e un rilevatore che riceve le onde riflesse dagli oggetti in immersione o dai fondali. Misurando il tempo di percorrenza dell'onda si determina la distanza ed anche la velocità con cui si avvicina o si allontana l'oggetto.

I sonar attivi possono avere diverse modalità di funzionamento: monostatico, quando l'unità trasmittente e quella ricevente sono adiacenti; bistatico[73][74] se le due sonde sono separate; quando vengono utilizzati più trasmettitori e ricevitori sparsi, si parla di funzionamento multistatico[75][76].

L'impulso del sonar attivo è creato da un circuito oscillatore che gestisce un amplificatore di potenza alla cui uscita si trova una matrice di trasduttori opportunamente disposti e provvisti di un sistema, che elaborando il segnale è in grado di migliorare la sensibilità direzionale (beamformer).

È da segnalare il fatto che la velocità degli ultrasuoni in acqua è influenzata dalla densità che a sua volta dipende dalla temperatura, dalla salinità e dalla profondità; la formula empirica sotto indicata, permette di calcolarne il valore in m/s, con una buona precisione.

$$V = 1,338 + (11,25 * t) + (0,0596 * m) + s \quad (4.2)$$

con t temperatura in gradi Fahrenheit, m profondità in metri, s salinità in parti per mille di sali disciolti.

E' anche da evidenziare che i dati forniti dal sonar potrebbero essere falsati dalla curvatura o dalla riflessione del fascio ultrasonico nell'attraversamento del termoclino[77], strato presente nei mari e negli oceani caldi o temperati, tra i 30 metri e i 100 metri di profondità, in cui si riscontra una brusca diminuzione della temperatura.

Anche per la legge di Snell, i dati rilevati dal sonar potrebbero essere non del tutto veritieri. Infatti, l'aumento della velocità del suono dovuto alla maggiore pressione in profondità, dà luogo alla rifrazione delle onde acustiche lontano dalla zona a maggior velocità con conseguente parziale dispersione.

4.2 Apparecchi medicali

Un altro settore dove gli ultrasuoni vengono largamente impiegati è il settore medico; questa tecnica può sostituire efficacemente altre metodiche più impegnative come la radiografia, la risonanza magnetica, la TAC, senza presentare sostanzialmente controindicazioni.

Molti macchinari sia ad uso diagnostico (ecografia) sia ad uso terapeutico (frantumazione dei calcoli) utilizzano questa tecnica.

Le onde ultrasoniche interagiscono con la materia vivente determinando diversi effetti, in primo luogo c'è l'azione meccanica, responsabile del movimento delle particelle dei tessuti attraversati, lo spostamento impresso in realtà è molto piccolo, tuttavia le variazioni di pressioni che le onde producono al loro passaggio possono essere di notevole entità, tali da creare nei tessuti effetti meccanici equivalenti ad un energico massaggio manuale.

In pratica, le variazioni pressorie generate da uno strumento ad ultrasuoni con una potenza specifica di appena 2 Watt/cm² che opera alla frequenza di 800 kHz sono uguali a +/- 2.6 atmosfere.

L'azione meccanica degli ultrasuoni si esplica essenzialmente attraverso i seguenti fenomeni:

- accelerazione dei processi di diffusione delle varie sostanze attraverso le membrane cellulari;
- scissione di molecole complesse come proteine, polisaccaridi ecc;
- micromassaggio tissutale.

Inoltre, la viscosità dei tessuti molli favorisce l'assorbimento delle onde ultrasoniche determinando, grazie anche alla conduttività termica, un innalzamento della temperatura.

Sono in uso anche apparecchiature che per ridurre l'effetto termico indesiderato in certe pratiche diagnostiche, mettono in atto una emissione pulsante delle onde ultrasoniche.

Gli effetti chimici, invece, caratterizzano una modificazione locale del PH e della permeabilità delle membrane cellulari con variazioni nelle strutture molecolari.

Un effetto non desiderato è la cavitazione, cioè la formazione in un fluido di bollicine di gas che possono esplodere e danneggiare le cellule.

La diagnosi e i trattamenti a ultrasuoni non sono praticabili in quei organi che contengono gas, come i polmoni e l'intestino, in quanto quest'ultimi danno luogo ad interferenze che ne compromettono l'efficacia.

È doveroso richiamare il fatto che se da un lato gli ultrasuoni possono coadiuvare la terapia di diverse patologie, dall'altro lato presentano effetti talora molto dannosi sia a livello molecolare (variazione della struttura proteica e genomica), sia a livello citologico (danneggiamento delle membrane cellulari) che a livello tissutale (interferenza con la funzione del miocardio).

Le diagnosi e le terapie mediante gli ultrasuoni possono essere attuate tramite contatto diretto o indiretto, con apparecchi dotati di testina mobile o fissa.

Gli strumenti dell'ultrasuonoterapia sono costituiti da un generatore di corrente a frequenza ultrasonica, un cavo schermato e una testina emittente contenente il trasduttore che può essere anche ad immersione.

Come già accennato, il trattamento con ultrasuoni può avvenire anche per immersione, in questo caso l'apposita testina viene collocata a pochi centimetri di distanza della superficie della parte del corpo da trattare, già immersa in acqua.

Gli ultrasuoni vengono largamente usati in molti settori della medicina, sia in campo diagnostico che terapeutico; ampia applicazione trovano anche in cure estetiche e in pratiche delle medicine alternative.

L'ultrasuonoterapia si rivela utile contro le infiammazioni dei tessuti molli, nel trattamento delle contratture muscolari, nel facilitare i processi riparativi dei tessuti; inoltre può avere azione analgesica, antiflogistica, decontratturante. In questo ambito si usano frequenze tra gli 0.7 MHz e i 3 MHz.

In fisiatria gli ultrasuoni vengono usati come antidolorifico per trattare numerose patologie come la periartrite scapolo-omerale, le sciatalgie, ecc.

La profondità che l'onda ultrasonica può raggiungere, nei tessuti, varia in funzione inversa della frequenza: a 1MHz può penetrare fino a 4÷5 cm, a 3MHz non va oltre la distanza di 1.5 cm. L'intensità generalmente adottata per il trattamento delle strutture superficiali è, mediamente, di 1.5 W/cm², mentre per gli organi profondi è di 3÷5 W/cm². I trattamenti vengono attuati in un arco di tempo compreso tra i 5 e i 15 minuti.

Nelle cure estetiche gli ultrasuoni vengono impiegati nel combattere la cellulite (grazie alle loro proprietà vasodilatatorie favoriscono il ricambio intercellulare); per facilitare l'assorbimento da parte della pelle dei cosmetici; per spianare le rughe; inoltre sono anche usati nel trattamento dell'acne e dei foruncoli.

Nella cura delle fasi iniziali dei tumori, già dalla fine degli anni novanta, è impiegata una tecnologia denominata HIFU (High Intensity Focused Ultrasound)[78], attraverso la quale si genera un flusso di ultrasuoni focalizzati per colpire un preciso bersaglio senza danneggiare i tessuti sani attraversati. L'azione citocida è dovuta all'effetto termico che comporta, dove si concentrano le radiazioni, un innalzamento della temperatura fino a 56°C; la potenza può variare da 1000 a 10000W/cm² mentre le frequenze utilizzate variano da 2 a 20 MHz in base al tipo di intervento da compiere e alla sensibilità dei tessuti da trattare. La focalizzazione, resa possibile dalla particolare forma incurvata del trasduttore, può interessare un'area dalle dimensioni inferiori al centimetro quadrato.

Gli ultrasuoni hanno assunto una notevole importanza nella cura della calcolosi renale ed epatica; infatti, molti pazienti, possono evitare l'intervento chirurgico grazie alle proprietà delle onde ultrasonore, ad elevata potenza, di creare un'onda d'urto capace di frantumare i calcoli. Le pressioni e depressioni che vengono esercitate possono raggiungere anche valori di parecchi kg/m²; queste sollecitazioni, che non hanno effetti significativi sui tessuti molli, riescono il più delle volte a sgretolare i calcoli che sono corpi rigidi e fragili. In tal modo i

frammenti possono venir eliminati attraverso le vie urinarie. Naturalmente, la potenza erogata può essere calibrata per conseguire il risultato voluto, tuttavia non può superare un certo limite per non incorrere nel rischio di danneggiare i tessuti. La frequenza, invece, deve essere mantenuta relativamente bassa, fino ad un centinaio di kHz, per evitare un eccessivo assorbimento.

L'ecografia, per la sua versatilità d'uso e per la capacità di non costringere i pazienti ad affrontare fastidiose fasi di preparazione, è la tecnica diagnostica più diffusa tra quelle che usano gli ultrasuoni.

Essa si basa sull'irradiazione di un fascio di onde da parte di un trasduttore (sonda) che si espande nella parte del corpo interessata e viene riflesso quando incontra un ostacolo. Le onde riflesse vengono percepite dalla stessa sonda, in tal modo l'operatore (che deve essere sempre un medico per valutare correttamente le immagini) riesce, facendola scorrere sul corpo del paziente, a proiettare su uno schermo gli organi interni; le immagini vengono costruite da un computer che trasforma gli echi in segnali luminosi più o meno scuri in base all'intensità che a sua volta, dipende dalla consistenza dell'organo o della struttura.

L'operatore può variare il cono di apertura degli ultrasuoni e, quindi analizzare la profondità voluta.

Nell'ecografia gli ultrasuoni utilizzati hanno frequenze comprese tra 2 e 20MHz, frequenze inferiori a 2MHz hanno una maggiore penetrazione ma possono dare effetti collaterali, mentre se sono superiori ai 20MHz hanno maggiore potere risolutivo ma minore capacità di penetrazione.

La presenza di aria tra la sonda e la cute è un ostacolo alla efficace propagazione delle onde ultrasoniche sia incidenti che riflesse. E' necessario quindi, per ottenere immagini non alterate, interporre, tra sonda e pelle, un apposito mezzo trasparente e a bassa densità.

Attualmente, gli ecografi utilizzano una tecnica che permette di ottenere immagini in tempo reale degli organi e dei loro movimenti, per cui si può verificare non solo l'anatomia ma anche la funzionalità degli stessi. Inoltre, in base al tipo di immagine che si vuol ottenere, si può operare con sonde a diverso tipo di scansione: lineare, settoriale, convex; quest'ultima è quella che fornisce la classica immagine a tronco di cono.

Nel corso degli anni, grazie anche all'applicazione di tecniche digitali, sono stati sviluppati e perfezionati strumenti ecografici che hanno ampliato notevolmente la gamma delle analisi possibili.

Oggi si riescono ad esaminare anche le parti interne degli organi cavi (ecografia endoscopica) grazie alla possibilità di avere immagini in tempo reale. Sono state ottimizzate metodiche che consentono di controllare e guidare gli operatori sanitari nell'esecuzione degli interventi (biopsie, interventi su feti, collocazione di protesi ecc.). Sfruttando l'effetto Doppler si riescono a controllare le situazioni dinamiche difficilmente raggiungibili in altro modo (circolazione cardiaca).

4.3 Analisi dei materiali attraverso ultrasuoni

Gli ultrasuoni, grazie alla loro proprietà di penetrare la materia, hanno costituito nel corso degli anni un formidabile mezzo di analisi della struttura dei materiali rigidi e delle saldature[79].

Infatti, le tecniche ultrasoniche permettono di rilevare i difetti in pezzi prodotti evitando sollecitazioni meccaniche e di indagare la microstruttura interna alla ricerca di bolle, crepe o altro genere di imperfezioni senza la necessità di sezionare i particolari.

La tecnica di analisi ultrasonica si è inserita sostanzialmente in tutti i principali settori della produzione industriale, come ad esempio: i prodotti laminati, le apparecchiature di potenza, i diversi componenti di velivoli e di automobili e i materiali per macchine in generale; in ambito ferroviario vengono impiegati, oltre che sulla componentistica del materiale viaggiante, anche nelle analisi qualitative di costruzione o saldatura delle rotaie.

Affinché l'applicazione di ultrasuoni per l'analisi dei materiali sia affidabile, si deve eliminare la presenza di aria tra la sonda e la superficie del materiale, a tale scopo si interpone un mezzo con buona trasparenza agli ultrasuoni come gel, acqua, glicerina, olio SAE 30. In questo modo si favorisce la propagazione evitando una eccessiva differenza di impedenza. Naturalmente lo stesso mezzo di accoppiamento dovrà essere usato per la taratura dello strumento.

Il segnale ultrasonico in ricezione è caratterizzato da due parametri fondamentali:

- L'ampiezza che è il picco dell'impulso mostrato sullo schermo dello strumento in rappresentazione A-scan.
- Il tempo di volo, indicato dalla distanza tra due impulsi. Il tempo è proporzionale alla velocità che gli ultrasuoni impiegano a percorrere il

viaggio di andata e ritorno dalla sonda alla superficie riflettente presente all'interno del materiale.

La presenza di un difetto o di una discontinuità nella struttura è indicata da una vibrazione che causa l'emissione di onde elastiche di frequenza tipica della sua risonanza e variamente sfasate.

Il segnale di ritorno contiene tutte le informazioni sulle dimensioni, geometria e natura dell'ostacolo incontrato dal fascio d'ultrasuoni incidente.

I risultati di un'ispezione vengono mostrati in forma di restituzione grafica C-scan (rappresentazione in pianta) e in forma B-scan (rappresentazione in profondità).

La posizione del difetto in un materiale omogeneo, dove la velocità di propagazione delle onde è costante, si determina dal rapporto tra i tempi di ritorno dell'echo, che ha origine dall'anomalia e dall'echo dovuto alla parete di fondo, sulla quale il fascio incidente comunque si riflette.

L'anomalia, in alcuni casi, può essere identificata anche dall'assorbimento del fascio in ingresso.

La dimensione della discontinuità si può valutare, talora, tramite il confronto tra l'intensità dell'echo ricevuto e quella di difetti standard o con grafici appositamente costruiti (scale AVG) eseguendo la taratura dello strumento con adatti campioni di riferimento.

La generazione e la rilevazione delle onde ultrasoniche vengono molto spesso affidate a sonde al quarzo, al solfato di litio, ai materiali ceramici polarizzati come il bario titanato, il piombo zirconato titanato (PZT), il meta-niobato di piombo ecc.

Vi è una vasta gamma di sonde, diverse per dimensioni e forma, ma sostanzialmente tutte possono rientrare in una delle seguenti 4 categorie:

- Sonda piana
- Sonda angolata
- Sonda doppia
- Sonda ad immersione

Tanto più è simmetrico il pezzo in esame, caratterizzato cioè dalla presenza di superfici piane o cilindriche, di piani paralleli o comunque in grado di riflettere in maniera opportuna l'onda di fondo, tanto migliore ed efficace risulterà il controllo ultrasonico. Quando invece il pezzo presenta scanalature, fori, filettature, forme

geometriche complesse, l'analisi può risultare più complicata a causa della deviazione delle onde dovuta alla diversa densità.

Per aumentare la velocità del controllo e migliorare la sensibilità del sistema si devono aggiungere 6 dB all'amplificazione corretta per il tipo di verifica. Una volta rilevata un'irregolarità, si va a ottimizzare accuratamente la ricerca riducendo l'amplificazione introdotta fino ad annullarla.

Le maggiori difficoltà nel rilevamento dei difetti con l'analisi ad ultrasuoni, deriva dalle particolari forme geometriche che può presentare il pezzo da studiare e da un'eccessiva rugosità delle superfici di scansione, questo comporta anche una scelta opportuna dei mezzi d'accoppiamento.

4.4 Saldatura

La saldatura ad ultrasuoni è molto applicata nella fabbricazione delle materie plastiche, mentre nella metallurgia si usa solo per piccole saldature su metalli dolci e malleabili, come alluminio, rame e nichel[80]. Questa tecnica offre numerosi vantaggi tra cui: la rapidità, l'economicità, l'assenza di materiali aggiuntivi.

La tecnica si basa sull'effetto termico dovuto alle onde che attraversano il materiale; in sostanza gli ultrasuoni scaricano parte della loro energia al pezzo da saldare sotto forma di calore. Le parti che devono essere saldate, premute l'una contro l'altra e investite dalla radiazione, entrano in vibrazione creando attrito, quindi innalzamento della temperatura e fusione del materiale. La saldatura avviene in tempi brevissimi anche pochi decimi di secondo.

Le saldatrici ad ultrasuoni, molto diverse per tipo e per la destinazione della funzione, hanno in genere frequenze standardizzate di 20, 30 e 40 kHz e potenze in uscita non superiori a i 4kW.

L'utensile che converte l'energia elettrica, a frequenza ultrasonica, in vibrazioni meccaniche viene chiamato sonotrodo.

La tecnica per la saldatura ad ultrasuoni può essere diretta, quando il trasduttore viene appoggiato sul pezzo, a distanza, quando il trasduttore di elevata potenza irradia le parti da saldare senza venirne a contatto.

L'elenco dei materiali plastici che possono essere saldati dagli ultrasuoni è molto lungo, alcuni richiedono la tecnica diretta, altri quella a distanza

Tra i materiali saldabili con ultrasuoni troviamo quelli di uso molto comune come ad esempio polistirolo, plexiglass, polipropilene, polietilene e PVC.

Capitolo 5 Materiali e Metodi

La maggior parte dei sensori in commercio in grado di misurare il livello di un liquido in maniera accurata e con una sensibilità nell'intorno del millimetro, risultano avere un costo superiore alle prerogative decise per la realizzazione del dispositivo previsto in questo progetto. Numerosi sono i sensori sviluppati per valutare il pelo libero dell'acqua in serbatoi, tubazioni, letti di fiumi e mari, tra questi si possono trovare sistemi meccanici, capacitativi, induttivi, acustici ed ottici. Tra questi, quelli ad ultrasuoni possono rappresentare una soluzione adatta in quanto non invasivi ed economici, per questo sono utilizzati spesso in applicazioni industriali e automazione.

Lo studio di una corretta configurazione interna della boa, un'analisi approfondita del segnale ultrasonoro ed uno sviluppo di un algoritmo di misura specifico potrebbero permettere di superare quei difetti intrinseci nella circuiteria del sensore e garantire valori di misura adeguati allo scopo senza influire negativamente sul costo.

5.1 Sensore ad ultrasuoni

Il sensore ad ultrasuoni usato nella maggior parte delle applicazioni di questa ricerca è l'SRF05[81] (della Devantech). Il sensore fornisce un valore, in microsecondi, del tempo di volo di un'onda ultrasonora che compie un viaggio di andata e ritorno dopo essere stata riflessa da un target.



Figura 5.1a - SRF05

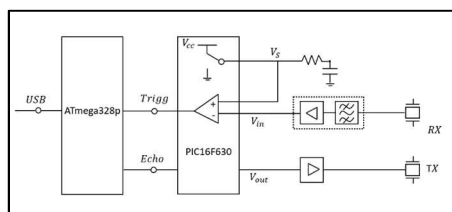


Figura 5.1b - Schema circuitale SRF05

Questo modulo viene spesso usato per impieghi industriali e per applicazioni di domotica, sfrutta gli ultrasuoni per calcolare la distanza da un oggetto o da una superficie posta frontalmente.

L'SRF05 è provvisto di due trasduttori: una capsula trasmittente ed una capsula ricevente che hanno il compito di inviare e di catturare l'onda ultrasonora.

Le caratteristiche strutturali e dimensionali dei trasduttori sono mostrate in Figura 5.1c e in Figura 5.1d[82].

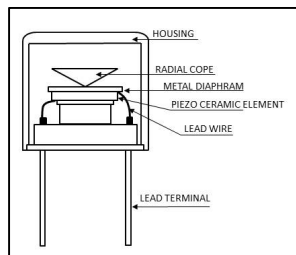


Figura 5.1c - Capsula trasmittente.

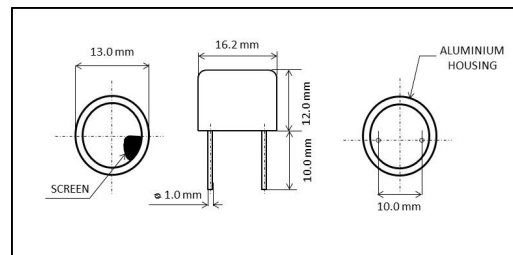


Figura 5.1d - Dimensioni capsula trasmittente.

L'andamento del livello di pressione sonora (SPL), misurato in dB, ed il livello di sensibilità, in funzione della frequenza, è mostrato nel grafico di Figura 5.1e [82].

La Figura 5.1f invece mostra il Beam Angle, caratterizzato da un cono di circa 55° [81].

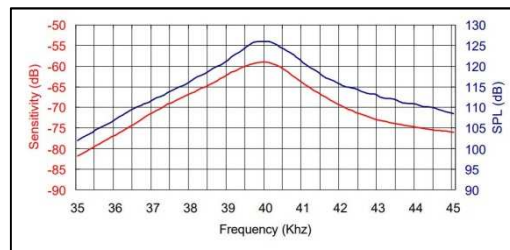


Figura 5.1e - Sensibilità e Pressione Acustica.

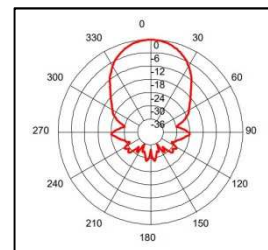


Figura 5.1f - Beam angle.

La distanza è fornita dal prodotto tramite la misura dell'intervallo di tempo impiegato nel percorso di andata e ritorno e la velocità. Il sensore è collegato alla scheda ArduinoUno tramite 4 pin, 2 di alimentazione e 2 di Trigger ed Echo. L'algoritmo di misura [Appendice], scritto tramite l'IDE di gestione del

microprocessore, attiva, il sensore ad ultrasuoni e per mezzo di opportune operazioni rileva i valori del tempo di volo dell'onda acustica uscita dall'SRF05.

In particolare, il microprocessore di gestione esterno (Arduino), produce un impulso elettrico di durata 10 μ s, che viene convertito, successivamente, in un treno di impulsi elettrici a 40 kHz. La capsula trasmittente, per effetto piezoelettrico, trasmuta il treno di impulsi in un burst di onde ultrasonore alla stessa frequenza.

Il microprocessore del SRF05, all'uscita del burst, mette in HIGH un segnale che viene letto dal microcontrollore fino a quando il trasduttore di ricezione rileva l'echo in entrata. Infatti, appena l'onda ritorna alla capsula ricevente, il segnale in uscita dal microprocessore del sensore ritorna in LOW.

Il tempo che intercorre tra i fronti di salita (HIGH) e di discesa (LOW) sarà il tempo di volo (TOF Time of Flight) dell'onda nel suo percorso trasmittente, target, ricevente.

Tramite la velocità del suono in aria, dipendente dalle condizioni climatiche, è possibile ricavare la distanza utilizzando la formula (4.1):

$$S = \frac{(v \cdot \Delta t)}{2} \quad [mm]$$

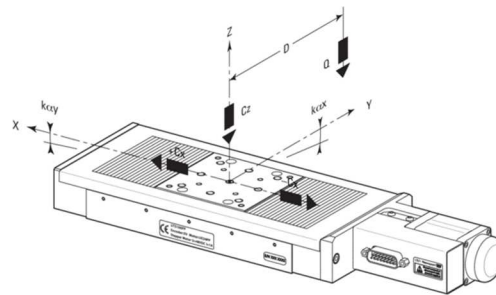
Con v velocità del suono in aria e Δt periodo di tempo tra trasmissione e ricezione.

La precisione della misura spesso può essere condizionata da più onde riflesse entranti in ricezione. Il valore in output dal SRF05, preso in considerazione dalle nostre prove in laboratorio, è il TOF espresso in microsecondi.

5.2 Set-up di misura

Il set -up di misura è stato installato sopra un tavolo ottico, la maggior parte delle misure sono state effettuate fissando il sensore ad ultrasuoni tramite un'asta cilindrica in acciaio di lunghezza 30 cm e opportuni supporti solidali ad una slitta micrometrica (UTS 150CC della NEWPORT), compatibile con un controllore esterno (ESP301 della NEWPORT).

La slitta di precisione è movimentata per mezzo di una vite in acciaio temprato, rettificata con punta diamantata, da un dado lappato che consente di avere un'elevata capacità di carico verticale e garantire un'affidabile stabilità di posizionamento. L'accuratezza fornita dal datasheet risulta essere $\pm 1.5 \mu\text{m}$ [83].



		UTS-PP & UTS-CC	UTS-PPV6
C_z ,	Normal centered load capacity	200 N	100 N
$+C_x$,	Direct axial load capacity		50 N
$-C_x$,	Inverse axial load capacity		10 N
$K_{\alpha x}$,	Compliance in roll		10 $\mu\text{rad}/\text{Nm}$
$K_{\alpha y}$,	Compliance in pitch		15 $\mu\text{rad}/\text{Nm}$
$K_{\alpha z}$,	Compliance in yaw		15 $\mu\text{rad}/\text{Nm}$
Q ,	Off-center load (N)		$Q \leq C_z \div (1 + D/50)$
	Where D = Cantilever distance (mm)		

Figura 5.2a - Caratteristiche dimensionali slitta micrometrica[83].

Un controllore esterno ESP Axis Motion Controller gestisce il motore passo-passo a corrente continua che aziona la vite. L'ESP utilizza un processore DSP a 64 bit in virgola mobile per garantire un controllo sincronizzato ad alta precisione.

L'utilizzo di diversi target, per il fascio ultrasonoro in uscita dal sensore, ha comportato la modifica del set-up di misura. Sono state usate principalmente due configurazioni: una in grado di permettere la misurazione con target solidi, Figura 5.2b, e l'altra capace di rilevare il livello di un fluido (acqua o olio) contenuti in un recipiente in PVC, Figura 4.2c.

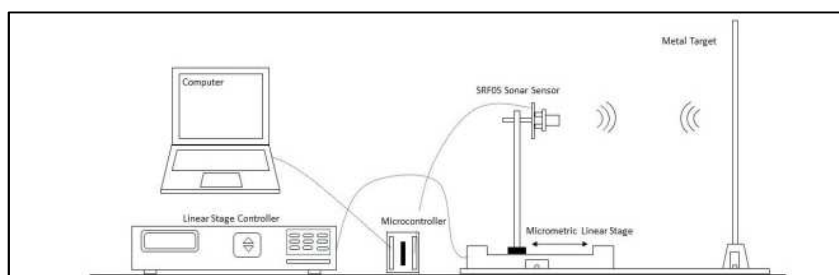


Figura 5.2b - Configurazione per target solidi.

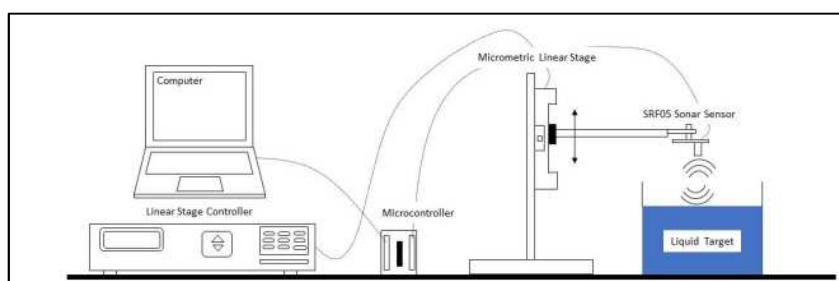


Figura 5.2c - Configurazione per target liquidi.

Le variazioni delle condizioni climatiche, come temperature ed umidità, all'interno del laboratorio di misura, sono state monitorate grazie ad un termo-igrometro portatile (HD 2101.1 della Delta Ohm) [84].

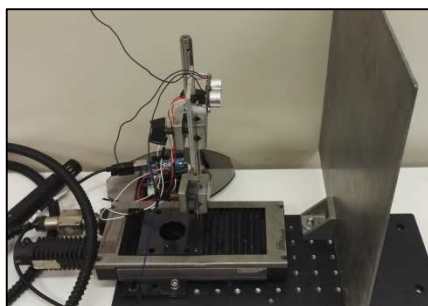


Figura 5.2e - Set-up in laboratorio.

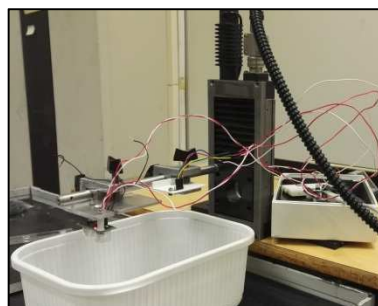


Figura 5.2f - Set-up per misura livello.

5.3 Altri sensori di misura utilizzati

Altri tipi di sensori sono stati investigati in questo lavoro per misure di confronto con l'SRF05. In particolare, il dispositivo HY-SRF05 (della Ndt-Electronics), sensore economico PING ad ultrasuoni, ed un sensore ottico a laser infrarosso molto utilizzato in robotica, il VL53L0X (della ST Microelectronics). Esso rappresenta uno dei migliori dispositivi disponibili sul mercato per quanto riguarda il rapporto qualità/prezzo. Nel Capitolo successivo saranno riportati i risultati delle prove eseguite con questi moduli. Nelle tabelle qui sotto invece, vengono mostrate le caratteristiche principali fornite dai loro costruttori [85][86].



SONAR PING SENSOR HY – SRF05		LASER RANGING SENSOR VL53L0X	
• Voltage	5V DC	• Driver	VCSEL
• Current	2mA	• Current	4mA
• Sound Frequency	40 kHz	• Frequency	VCSEL 940 nm
• Max. Range	450 cm	• Max. Range	200 cm
• Min. Range	2 cm		
• Input trigger	10 μ S Min. TTL		
• Echo Pulse level	Positive TTL		

Figura 5.3a - Sensore HY-SRF05.

Figura 5.3b - Sensore ottico VL530X.

5.4 Gestione ed analisi dei segnali

5.4.1 Oscilloscopio

Per l'analisi e lo studio dei segnali ultrasonori, forniti dal sensore SRF05, è stato utilizzato un oscilloscopio della Tektronix. Tale strumento ha permesso di memorizzare tutti i dati analogici in modo da poterli processare ed analizzare tramite specifici Software quali OriginPro Lab e Matlab.

Il TBS2074 di Tektronix è un oscilloscopio ad archiviazione digitale della serie TBS2000 con larghezza di banda di 70 MHz e 4 canali analogici. Permette di catturare e visualizzare più segnali alla volta. Adotta un display WVGA da 9 pollici, una lunghezza di registrazione di 20 milioni di punti ed una frequenza di campionamento di 1GS/s.

L'interfaccia della sonda TekVPI funziona con le tradizionali connessioni BNC, ma consente anche un'ampia copertura applicativa con più recenti sonde di tensione attiva e sonde di corrente.

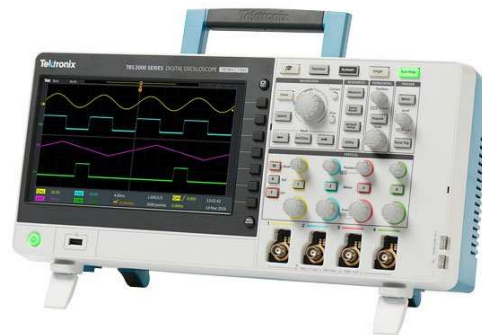


Figura 5.4.1a - Oscilloscopio Tektronic.

5.4.2 VI in LabVIEW

Le analisi preliminari del segnale ultrasonoro, che hanno caratterizzato un primo approccio al lavoro, sono state effettuate per mezzo del dispositivo di acquisizione dati myDAQ e il software LabVIEW.

La scheda myDAQ fornisce, per mezzo di un dispositivo USB, sia ingressi ed uscite analogiche (AI e AO), che ingressi ed uscite digitali (DIO), ingressi ed uscite audio, alimentatori ed un multimetro digitale (DMM).



Figura 5.4.2a - Scheda MyDAQ.

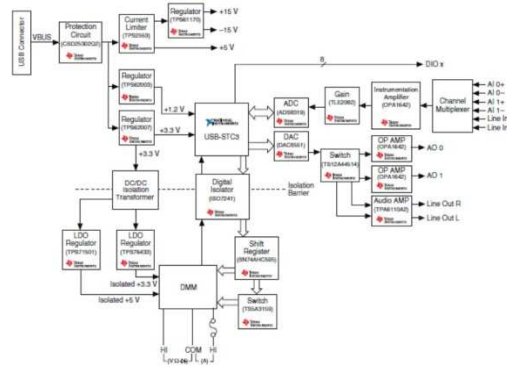


Figura 5.4.2b - Mappa circuitale scheda MyDAQ.

La scheda myDAQ, ha la possibilità di catturare due differenti canali. Essi possono essere configurati come general-purpose (uso generico) ad alta impedenza differenziale d'ingresso di tensione o audio. Un solo ADC, con una risoluzione di 16 bit, viene utilizzato per campionare entrambi i canali.

Con la modalità general-purpose è possibile misurare fino a $\pm 10 V$.

Gli ingressi analogici hanno la possibilità di essere campionati ad una frequenza di 200kS/s per canale, in modo da poterli utilizzare per l'acquisizione di forme d'onda.

Tramite il DAQ Assistant è stato realizzato un VI (Virtual Instrument) in LabVIEW in grado di visualizzare il segnale in entrata dal canale Analogico, dopo aver fissato un certo valore di soglia come trigger.

5.4.3 Software Matlab e OriginPro Lab

Il processamento del segnale in entrata e l'analisi di esso è stato effettuato grazie al software Matlab, ambiente virtuale per il calcolo numerico e analisi statistica in linguaggio C. Esso ha consentito di visualizzare funzioni e di manipolare dati tramite appositi algoritmi sviluppati in modo da avere una misura più accurata dei tempi di volo.

Il software OriginPro® Lab ha permesso l'analisi e la creazione di grafici, indispensabili per visualizzare e studiare le risposte dei sensori utilizzati per questo lavoro di tesi. Origin® infatti è uno dei miglior software di analisi tecnica di dati e grafica scientifica esistente sul mercato.

Capitolo 6 Risultati e discussioni

6.1 Sensore HY- SRF05

Dopo una ricerca di mercato volta ad individuare un sensore in grado di rispondere alle richieste del progetto (basso costo, affidabilità e sensibilità: brevetto[36][37]), si è scelto di testare inizialmente il sensore ping HY- SRF05. Esso ha un range operativo che va dai 2 cm ai 5 metri, la sua frequenza di lavoro è di 40 kHz e le sue dimensioni sono comparabili a quelle del sopracitato SRF05.

In vista delle possibili applicazioni, le distanze prese in considerazione, per valutare i tempi di volo e quindi la risposta del sensore a variazioni di distanza, sono quelle prossime al limite inferiore di funzionamento riportate nel datasheet del sensore ad ultrasuoni.

Il target usato in questo ciclo di misurazioni è in acciaio.

Sotto sono riportati i grafici distanza - tempo per intervalli di misura sensore-target compresi tra: 20 mm e 124 mm; 124 mm e 228 mm; 600 mm e 704 mm; 704 mm e 808 mm. Sfruttando, in tal modo, tutta la corsa della slitta micrometrica utilizzata.

Ad ogni millimetro di distanza corrisponde un tempo di volo dell'onda ultrasonica, dato dalla media dei valori (circa 200) ottenuti nell'arco di acquisizione di 30 secondi.

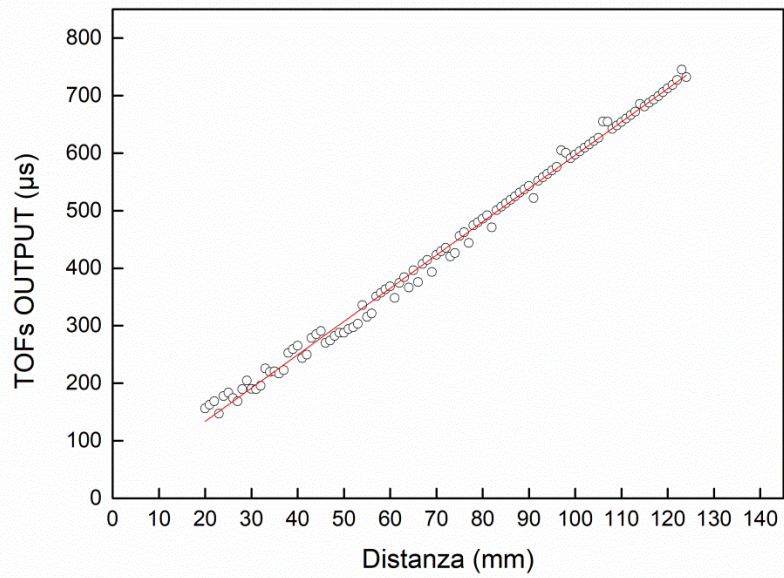


Figura 6.1a - Valori in uscita dal sensore per range di distanza da 20 mm a 124 mm.

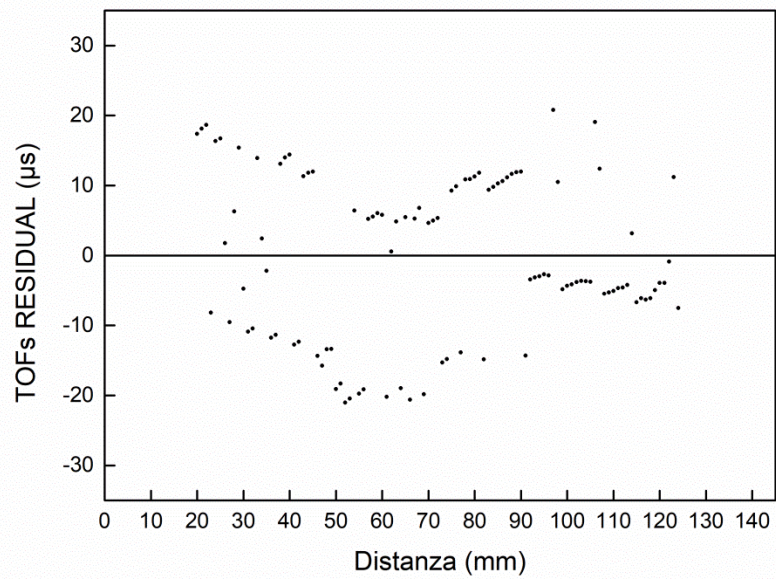


Figura 6.1b - Valori in uscita ai residui del sensore per range di distanza da 20 mm a 124 mm.

In questo intervallo di distanza sensore-target la deviazione standard dei residui è pari a $11.49 \mu s$, corrispondente ad un errore nella misura di distanza di $\pm 2 \text{ mm}$. I residui sono stati calcolati considerando la distanza dei valori sperimentali dalla retta di interpolazione mostrata in Figura 6.1c. La pendenza della retta, o meglio il suo reciproco, è la velocità del suono con la quale si è ottenuto l'errore sulla misura della distanza.

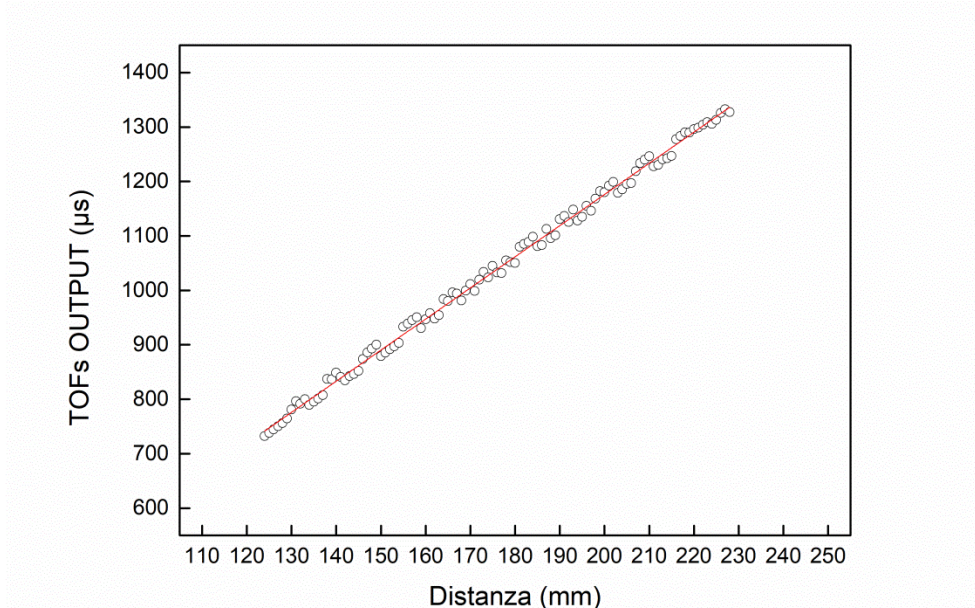


Figura 6.1c - Valori in uscita dal sensore per range di distanza da 124 mm a 228 mm.

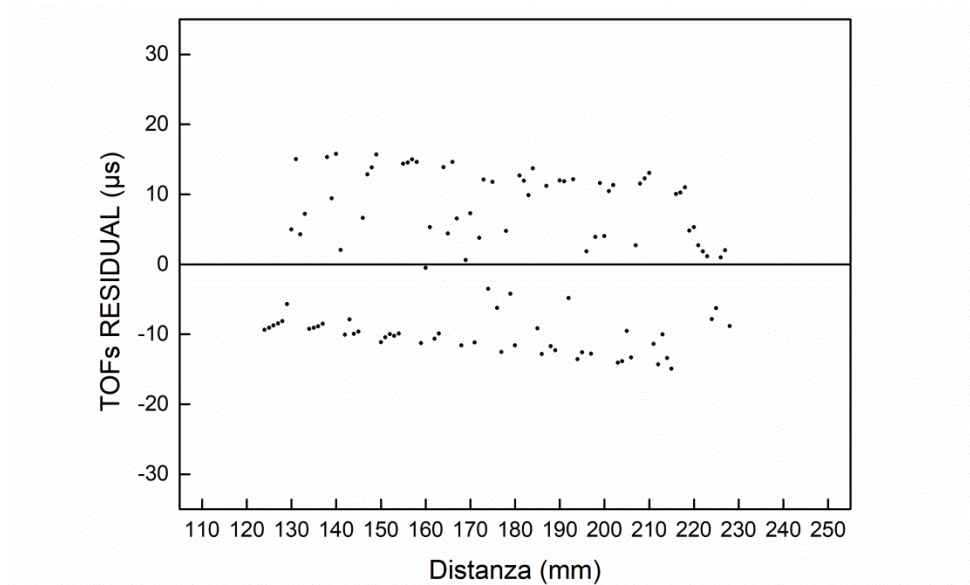


Figura 6.1d - Valori residui in uscita dal sensore per range di distanza da 124 mm a 228 mm.

Nell' intervallo di distanze sensore - target da 120 mm a 228 mm, la deviazione standard dei residui risulta essere di $10.29 \mu\text{s}$, corrispondente ad un errore nella misura in termini di distanza di $\pm 2 \text{ mm}$.

Ulteriori prove, sono state effettuate andando a verificare la ripetibilità dei valori ricavati dall' HY-SRF05.

Accertata la costanza della temperatura e dell'umidità all'interno del laboratorio, si sono svolti test di misura per distanze sensore-target da 600 mm a 704 mm e da 704 mm a 808 mm, che, ovviamente, ha comportando un arretramento del target sul tavolo ottico a causa della limitata corsa che la slitta può eseguire.

La tabella 6.1a sotto riportata mostra i tempi di volo dell'onda del fascio ultrasonoro per due prove effettuate senza avere variazioni delle condizioni climatiche.

DISTANZA SENSORE TARGET 600mm -704 mm			
PROVA 1		PROVA 2	
DISTANZA [mm]	TOF [μs]	DISTANZA [mm]	TOF [μs]
600	2750.259	600	2749.261
601	2752.146	601	2751.795
602	2755,083	602	2755.216
603	2762.475	603	2760.884
604	2766.173	604	2766.074
605	2765.465	605	2765.192
606	2767.791	606	2770.042
607	2780.802	607	2782.839
608	2794.734	608	2792.879
609	2796.429	609	2797.258
610	2804.741	610	2803.937
....
691	3258.226	691	3258.363
692	3263.997	692	3265.211
693	3264.615	693	3263.003
694	3264.322	694	3266.958
695	3275.429	695	3275.629
696	3278.262	696	3277.921
697	3298.324	697	3298.808
698	3304.173	698	3305.008
699	3309.359	699	3310.271
700	3316.770	700	3317.716
701	3314.196	701	3314.703
702	3327.532	702	3327.445
703	3331.857	703	3331.597
704	3331.728	704	3331.416

Tabella 6.1a - Media dei valori dei TOF ad ogni distanza sensore- target da 600 mm a 704 mm ricavate durante prova 1) e prova 2).

Nella tabella 6.1a vengono riportati i valori dei tempi di volo per distanze del sensore dal target in acciaio per intervalli da 600 mm a 704 mm. In tale situazione è appurata la ripetibilità del sensore, infatti non si riscontra una differenza significativa nei tempi in uscita del sensore ad ultrasuoni all'interno degli errori sperimentali.

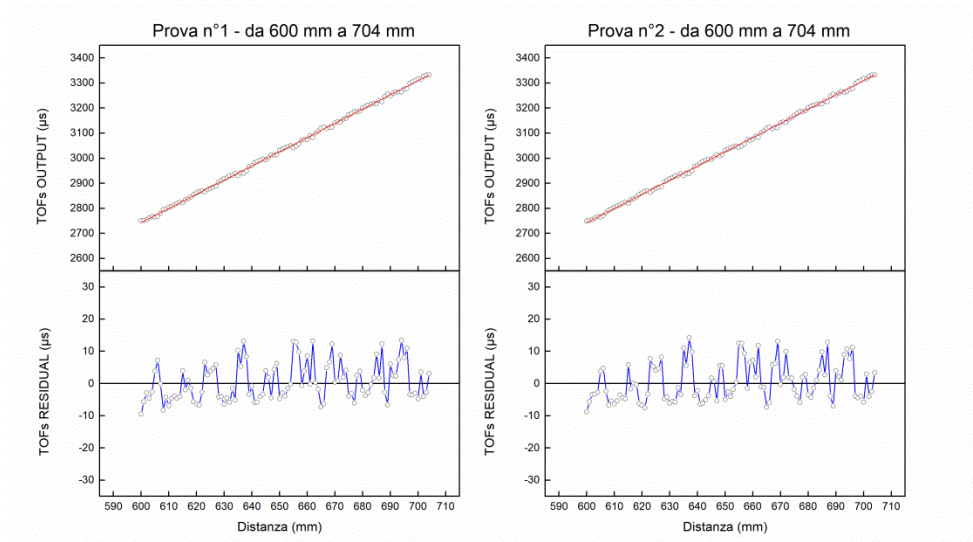


Figura 6.1e - Analisi tempi di volo per due prove differenti realizzate per range di distanza 600 mm – 704 mm.

La ripetibilità delle misure è verificata inoltre dall'analisi delle curve distanza – TOF OUTPUT e dai relativi valori dei residui ottenuti dalla prima e dalla seconda prova, Figura 6.1e. La variazione percentuale dei coefficienti angolari delle rette di fitting risulta solo dello 0.09%.

Ulteriori due prove, prova 3 e prova 4, sono state realizzate prendendo in considerazione percorsi più lunghi del fascio ultrasonico. In questo caso, le distanze prese in esame variano da 704 mm a 808 mm.

La successiva tabella mostra i valori mediati dei tempi di volo forniti dal sensore per questo determinato intervallo di misura.

Distanza sensore target 704 mm - 808 mm			
Prova 3		Prova 4	
Distanza [mm]	TOF [μ s]	Distanza [mm]	TOF [μ s]
704	3331.728	704	3331.416
705	3331.917	705	3332.211
706	3331.914	706	3335.126
707	3342.686	707	3341.450
708	3348.601	708	3347.179
709	3357.601	709	3355.632
710	3357.977	710	3357.545
711	3371.023	711	3372.903
712	3386.369	712	3384.561
713	3378.551	713	3379.079
714	3393.252	714	3392.266
....
795	3861.97	795	3862.418
796	3867.631	796	3866.476
797	3857.744	797	3859.213
798	3864.831	798	3863.197
799	3885.635	799	3885.803
800	3891.807	800	3892.011
801	3889.691	801	3888.411
802	3885.518	802	3885.950
803	3890.691	803	3891.776
804	3900.186	804	3903.487
805	3900.279	805	3899.847
806	3912.635	806	3910.711
807	3910.676	807	3916.400
808	3934.066	808	3934.832

Tabella 6.1b - Media dei valori dei TOF ad ogni distanza sensore- target da 704 mm a 808 mm ricavate durante prova 3) e prova 4).

Anche in questo caso i valori dei TOF si mantengono costanti, in assenza di una variazione della temperatura all'interno del laboratorio.

I relativi grafici mostrati in Figura 6.1f, evidenziano tale situazione.

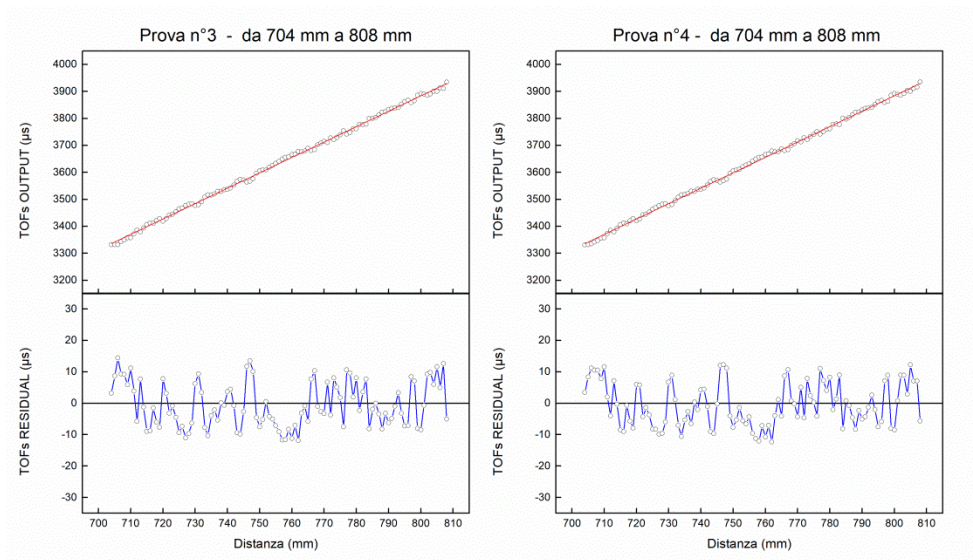


Figura 6.1f - Analisi tempi di volo per due prove differenti realizzate per range di distanza 704 mm – 808 mm.

La variazione della pendenza della retta di fitting tra la prova n° 3 e la prova n° 4 risulta dello 0.07 %.

Non è riscontrabile quindi una notevole variazione della velocità del suono in aria, per condizioni climatiche stabili dell'ambiente di misura.

Anche in queste misure a distanze maggiori del target, però, lo scarto quadratico medio (Sq_i) dei valori residui risulta troppo elevato, per le specifiche del progetto (Tabella 6.1c).

Sqo [μ s]			
Distanza sensore target 600 mm – 704mm		Distanza sensore target 704 mm – 808 mm	
Prova n°1	Prova n°2	Prova n°3	Prova n°4
5.83	5.96	6.98	7.17

Tabella 6.1c - Scarto quadratico medio per intervalli di distanza 600- 704 mm e 704-808 mm.

Dai test effettuati in queste serie di esperimenti si è osservato che il sensore è affidabile, ma si è evidenziata un'incertezza di misura associata al sensore HY-SRF05 di circa 2 mm, superiore quindi alle richieste del progetto in quanto non sono apprezzabili spostamenti di 1 mm del sensore da un target fisso in acciaio.

Tale risultato ci ha spinto a scartare tale modello e a caratterizzare un'altra sonda ad ultrasuoni. Si è scelto un modello della stessa tipologia, ping, a due capsule separate (trasmettenti e riceventi), ma di una diversa casa produttrice e reperibile sul mercato ad un costo maggiore del precedente, ma ancora contenuto.

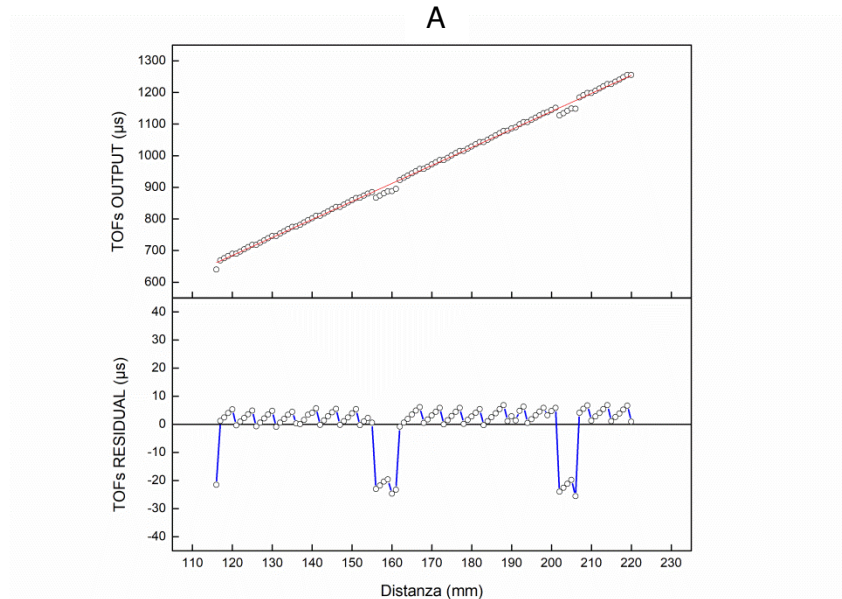
6.2 Sensore SRF05 Devantech

Il sensore sonar SRF05, grazie al suo ampio intervallo operativo di distanza riportato nel suo datasheet, da 2 cm fino a 4 metri, possiede una vasta gamma di utilizzazioni in campo industriale e nel settore della domotica; in particolare, viene spesso installato su robot o su sistemi di allarme.

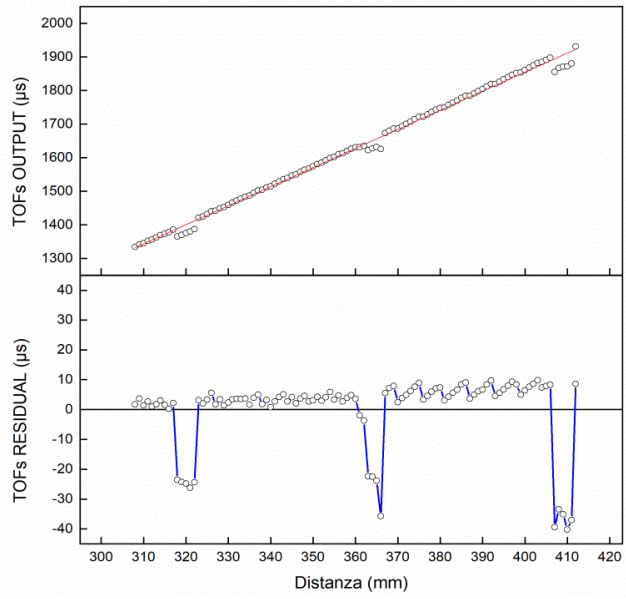
Per questo sensore, come per il precedente, è stata necessaria un'accurata caratterizzazione, vista la non esaustiva informativa presente nella sua scheda tecnica e considerato l'uso che ne vogliamo fare.

In una prima fase l'SRF05 è stato analizzato nel suo range operativo inferiore, usando come target fisso la piastra in acciaio e lo stesso set-up adottati per le prove di laboratorio effettuate per l'HY-SRF05.

I primi test, sono stati eseguiti per intervalli di distanza sensore-target da 116 mm a 220 mm, da 308 mm a 412 mm e da 608 mm a 712 mm ed i risultati ottenuti sono stati rappresentati nei grafici sottostanti in Figura 6.2a.



B



C

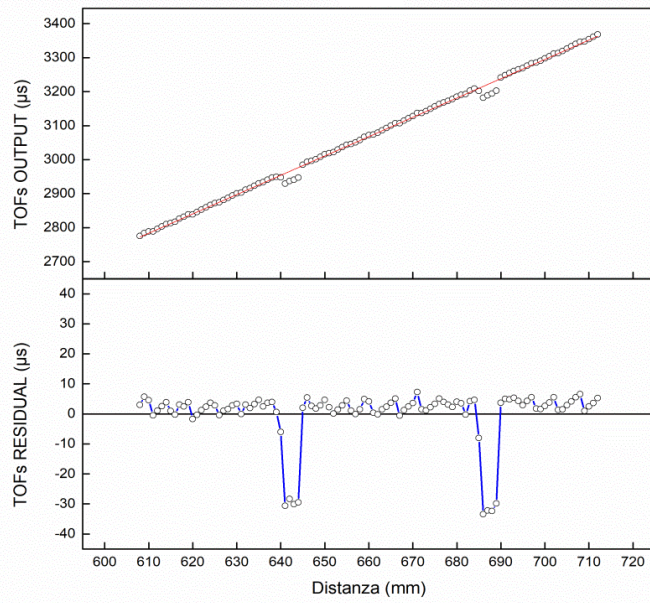


Figura 6.2a - Grafici distanza-TOFs forniti dal sensore SRF05; A) da 116mm a 220 mm, B) da 308 mm a 608 mm, C) da 608 mm a 712 mm.

Essi riportano i tempi di volo dell'onda ultrasonica (TOF – Time of Flight in μs) ottenuti a differenti distanze (mm) dal bersaglio in acciaio. Al fine di evitare fenomeni di interferenza costruttiva e distruttiva tra il fascio di onde emesse e il fascio di onde riflesse, il microprocessore è stato programmato in modo da mandare otto impulsi ultrasonori ogni 100 ms.

Osservando i dati è evidente un comportamento imprevisto in tutte e tre le situazioni rappresentate: oltre ad una struttura a dente di sega individuabile ma compatibile con il funzionamento del dispositivo, si nota un forte scostamento dei valori misurati rispetto alla retta di fitting per distanze sensore-target ben precise. Tali scostamenti sono maggiormente evidenti nei grafici dei valori residui mostrati in seconda riga. Un salto notevole dei tempi (jitter time) che suggerisce un rilevante anticipo nei tempi di volo dell'onda ultrasonora riflessa dal target (in altre parole, l'onda sonora impiega meno tempo a fare il percorso rispetto a quello che ci si aspetterebbe dalla retta di fitting). Tale fenomeno accade per alcune distanze specifiche prese in considerazione durante la traslazione del sensore lungo il suo tragitto orizzontale.

Come evidente il jitter time causa un'interruzione della normale distribuzione dei tempi di volo, si ripete ogni 40 mm e perdura per 5/6 mm.

In particolare, per le distanze più vicine al target, range da 116 mm a 220 mm, (grafico A di Figura 6.2.a), le anomalie deviano dalla normale distribuzione dei tempi rappresentata dalla retta di fitting, di quantità vicine ai 25 μs . Per distanze più grandi, intervalli da 308 mm a 412 mm e da 608 mm a 712 mm (grafici B e C di Figura 6.2a), gli scostamenti dei punti del jitter time rispetto alla retta di fitting risultano essere approssimativamente di 33 μs .

Tale fenomeno risulta evidente in tutti i test effettuati. L'anomalia quindi si riscontra in maniera sistematica, causando una marcata interruzione della regolare distribuzione dei tempi di volo.

Questo particolare comportamento del sensore SRF05 provoca una diminuzione dell'accuratezza di misura della distanza per certi valori specifici di quest'ultima e vista l'applicazione che se ne prevede tale fenomeno non può essere trascurato (tabella 6.2a, seconda colonna).

Prendendo in considerazione la parte regolare della distribuzione dei tempi di volo, ovvero i valori dei TOFs non soggetti al jitter time, lo scarto quadratico medio (Sqo) dei residui risulta alquanto più piccolo, assumendo un valore di 2 μs . Tale situazione è evidenziata in Figura 6.2b.

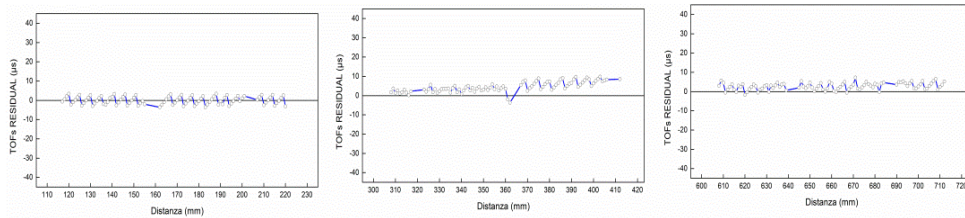


Figura 6.2b - Grafici distanza -TOFs in assenza di jitter time.

Lo Sqo dei valori calcolati escludendo i valori del jitter time corrisponde ad un errore sulla misura della distanza inferiore al mm.

In tabella 6.2a vengono riportati i valori degli Sqo per i residui degli intervalli di tempo ed i corrispondenti errori associati alle misure di distanza (Sqi) per gli intervalli di misura considerati

Range misure [mm]	di	Errore con jitter time [mm]	Sqo senza jitter time [μ s]	Sqi senza jitter time [mm]	Temperatura [$^{\circ}$ C]
116 - 220	9		2.02	± 0.4	24.1
308 - 412	12		1.83	± 0.3	21.6
608 - 712	12		1.74	± 0.3	23.2

Tabella 6.2a - Scarto quadratico medio per intervalli di distanza di 116 – 220 mm, 600- 704 mm e 704-808 mm.

Considerando che l'accuratezza di misura richiesta per l'intero sistema di valutazione del livello del fluido in mare, deve essere dell'ordine del millimetro, l'errore che si riscontra considerato il jitter time risulta essere notevolmente superiore e tale da compromettere l'affidabilità di tutto il dispositivo. D'altra parte, escludendo quelle distanze in cui si manifesta il jitter time, l'accuratezza del sistema di misura rientrerebbe nei parametri richiesti dal progetto.

6.3 Confronto tra tre sensori SRF05

Con lo scopo di verificare la ripetibilità delle osservazioni condotte sul sensore a nostra disposizione, sono stati testati altri due sensori SRF05 della stessa casa produttrice, con identici componenti integrati, stesse capsule di trasmissione e stesso prezzo. Tali sensori sono stati comprati attraverso un sito internet di prodotti elettronici, e quindi sono facilmente reperibili da qualsiasi utente.

Per meglio differenziare i risultati ricavati in questa parte di lavoro, le tre sonde ad ultrasuoni utilizzate saranno denominate in questo paragrafo 6.3:

- SRF05 E - sensore già usato per le prove fino a qui effettuate
- SRF05 A - primo sensore comprato per confronto
- SRF05 B - secondo sensore comprato per confronto

In questo specifico lavoro sono state analizzate le tre sonde ad ultrasuoni, utilizzando lo stesso set-up allestito per le prove precedenti.

Sono state effettuate corse del sensore, rispetto ad un bersaglio fisso, comprendenti distanze sensore-target che vanno dai 154 mm ai 258 mm.

Per ogni sonda sono state eseguite corse di andata e ritorno. Di seguito, vengono riportate solo quelle di andata, in quanto entrambi i percorsi evidenziano gli stessi risultati.

Lo scopo del test è stato quello di appurare se la presenza del jitter time fosse un'anomalia soltanto del nostro sensore (Sensore E), quindi causato da un difetto di fabbrica, oppure se fosse una caratteristica intrinseca di tutta la gamma SRF05.

Anche in questo caso, come in quelli precedentemente riportati nei paragrafi 6.1 e 6.2, ad ogni distanza sensore-target (variata ad intervalli di un millimetro) corrisponde un tempo ottenuto dalla media dei TOFs puri forniti dalla sonda ultrasonora in 30 secondi di acquisizione.

I seguenti test hanno sono stati condotti in laboratorio e quindi a temperatura e umidità ambiente.

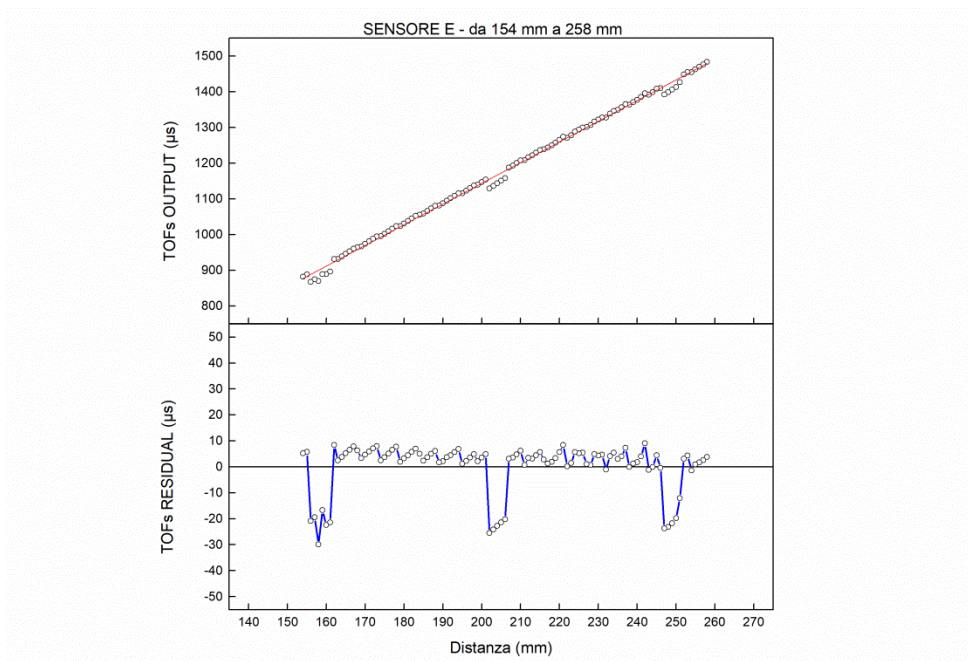


Figura 6.3a - Andamento dei TOFs fornito dal sensore E e grafico dei residui per una corsa del sensore di 104 mm, da 154 mm a 258 mm dal target.

Per corse del sensore E, da 154 mm a 258 mm, è evidente ancora la presenza di questi salti di tempo che abbassano l'accuratezza di misura. Il jitter time si manifesta anche in questo con le stesse modalità e caratteristiche manifestate nelle prove di misura descritte nel paragrafo 6.1: compaiono per tre volte lungo la corsa effettuata.

Tali salti, distanti dalla retta di fitting dei valori regolari di TOFs si discostano di un valore vicino a 25 μs , comportando un errore nella misura della distanza di oltre 10 mm anche in questa situazione.

Lo Scarto quadratico medio dei tempi di volo calcolato invece elidendo tali punti di jitter time si riduce drasticamente a 2.1 μs . Considerando la retta di fitting in assenza di jitter time, l'inverso del suo coefficiente angolare, ovvero la velocità del suono in aria, risulta essere di 347.14 m/s, valore compatibile con quelli teorici.

Il successivo test, eseguito il giorno seguente, riguarda invece l'analisi fatta su uno dei nuovi sensori: l'SRF05 A.

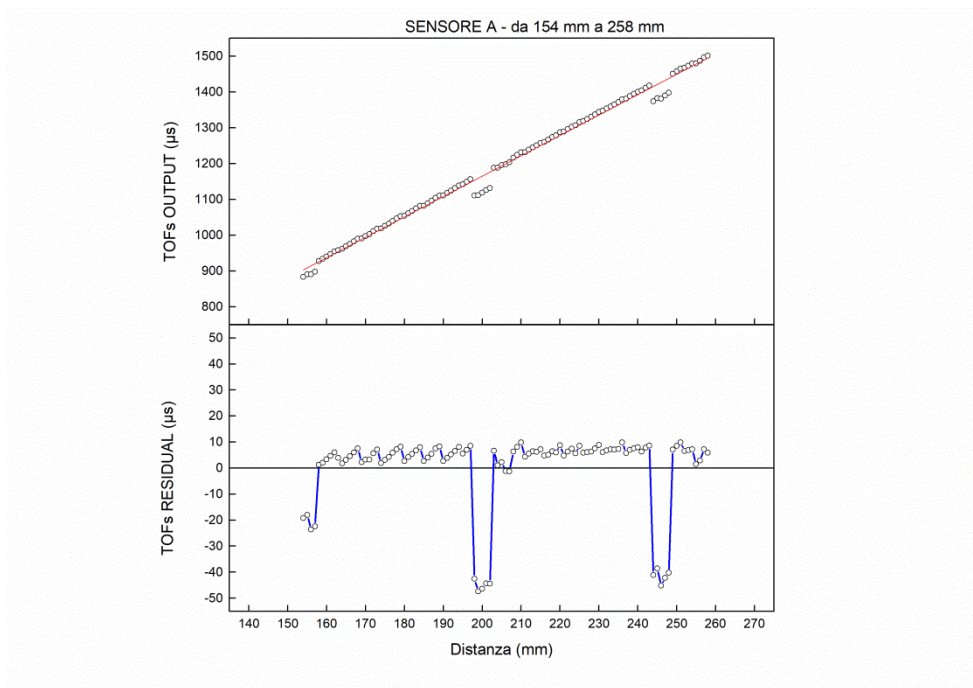


Figura 6.3b - Andamento dei TOFs fornito dal sensore A e grafico dei residui per una corsa del sensore di 104 mm, da 154 mm a 258 mm dal target.

Come si può osservare, nel grafico relativo a questo sensore, la caduta dei tempi di volo è simile a quella riscontrata nelle prove precedenti; infatti, anche in questo caso, i risultati ottenuti mostrano distacchi significativi dalla normale distribuzione dei tempi di volo a determinate distanze-sensore target.

Il salto dei tempi di volo si manifesta tre volte lungo tale corsa e, rispetto alle misurazioni precedenti, la differenza in microsecondi tra la distribuzione normale e la media dei TOFs relativi al jitter time risulta più marcata alle distanze sensore-target nell'intorno di 200 mm e in quelle nell'intorno dei 245 mm.

Non considerando come per il sensore E, le anomalie che causano un calo dell'accuratezza della misura, lo scarto quadratico medio degli output (TOFs) è di 2.1 μ s. La velocità del suono, data dalla pendenza della retta di fitting è di 349.45 m/s, anche in questo caso compatibile con i valori teorici.

Come verifica ulteriore riguardo al comportamento delle sonde, il terzo giorno di prova è stato dedicato al sensore B.

I risultati di tali test sono riportati nella Figura 6.3c.

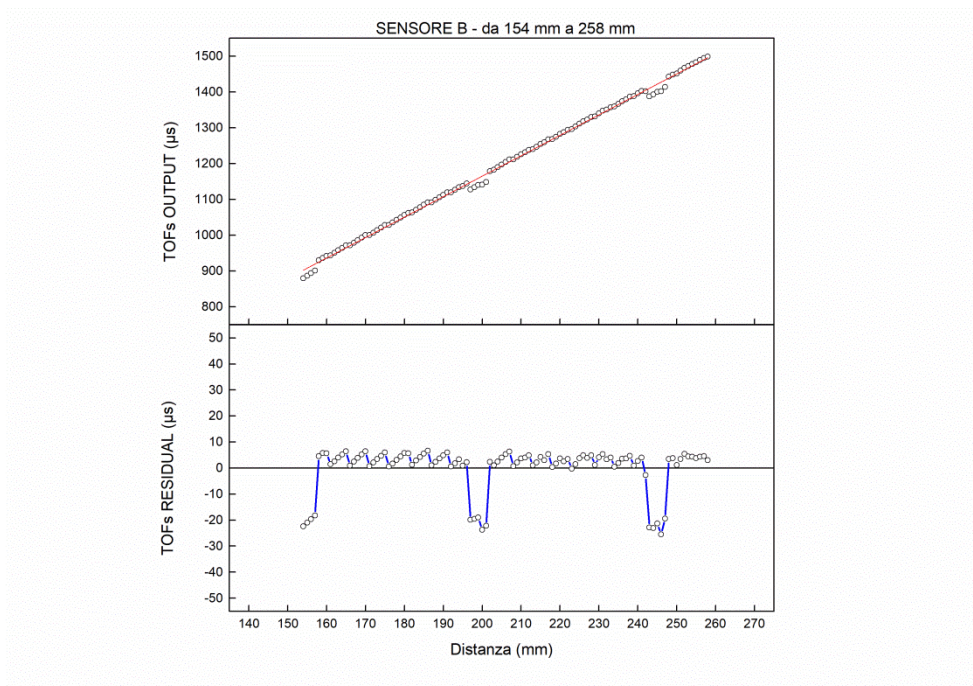


Figura 6.3c - Andamento dei TOFs fornito dal sensore B e grafico dei residui per una corsa del sensore di 104 mm, da 154 mm a 258 mm dal target.

Come nei test precedenti, il jitter time si verifica in tre punti del grafico. Tale situazione si avvicina di molto alle misure effettuate con il sensore E, infatti la distanza tra i punti distaccati e quelli regolari si aggira intorno ai 25 μs in tutte e tre i tratti caratteristici. La velocità del suono durante questo test, risulta essere di 350.72 m/s. La deviazione standard dei residui, quindi lo scarto quadratico medio dei TOFs, è di 1.81 μs .

Nella sottostante Figura 6.3d è riportato il grafico complessivo dei test effettuati per meglio confrontare e studiare l'andamento dei tempi di volo dell'onda ultrasonica riflessa nei tre sensori dal bersaglio in acciaio.

Per avere una visualizzazione più chiara ed una lettura più facile dei risultati, sono state apportate delle modifiche grafiche alla curva in rosso, relativa al sensore A e alla curva in blu relativa al sensore B.

La prima è stata alzata di una quantità +100 μs rispetto ai suoi reali valori, la seconda abbassata di 100 μs . Questo per meglio cogliere dal punto di vista grafico le differenze e le corrispondenze fra i tre andamenti.

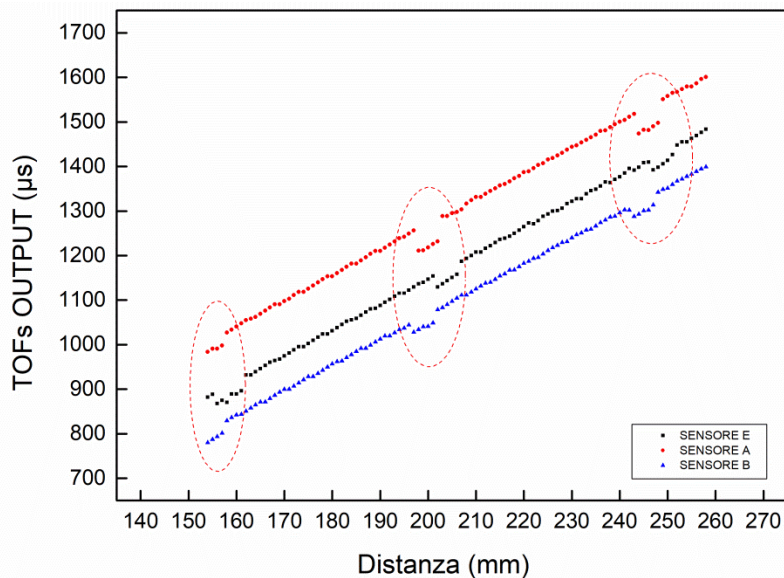


Figura 6.3d - Andamento TOFs per il sensore E (curva nera), per il sensore A (curva rossa), e per il sensore B (curva blu). Il lievissimo scorrimento, delle curve rosse e blu verso sinistra, corrispondente ad un piccolo anticipo del jitter time di 2 mm durante la corsa del sensore, rispetto alla curva nera, è da attribuire ad un errore casuale dovuto ad una non perfetto allineamento della slitta micrometrica, il risultato comunque è ininfluenza ai fini del nostro scopo.

Dal grafico si nota che il fenomeno del jitter time (cerchiato in rosso) è presente in tutte le rilevazioni eseguite con tre sensori distinti, ma identici per caratteristiche circuitali e protocollo di funzionamento.

Da tutto ciò è possibile concludere che l'anomalia del jitter time avviene, in tutti i casi, ogni 40 mm, e perdura per intervalli di distanza pressoché identici corrispondenti a 5/6 mm di lunghezza.

Il jitter time determina un sensibile decadimento della sensibilità del dispositivo. Sarà necessario dunque ottimizzare l'algoritmo di misura e implementare l'intero sistema di rilevamento del livello del liquido, attraverso idonei accorgimenti, in modo tale da bypassare i tratti del jitter time e raggiungere un'accuratezza, nella misura della distanza sensore-fluido, dell'ordine del millimetro così come specificato nel progetto.

6.4 Verifica stabilità con laser a triangolazione

Al fine di verificare l'origine di questi arrivi anticipati dell'onda sonora alla capsula ricevente dell'SRF05, si è andati a verificare la stabilità della slitta micrometrica usata a far muovere di millimetro in millimetro il sensore SRF05. L'obiettivo è stato quello di verificare la presenza o meno di irregolarità nella vite di scorrimento o la presenza di attriti tali da inficiare la corretta traslazione orizzontale della piastra mobile dell'apparato.

A tale scopo nel set-up di misura è stato integrato un laser a triangolazione a controllo esterno.

Il laser Keyence LC-2100 è un sistema avanzato di misurazione a triangolazione preciso e versatile progettato per la ricerca e lo sviluppo, per l'ispezione e per misure lungo le linee di produzione di altezze, larghezze, spessori, lunghezze, posizioni e oscillazioni.

Utilizza un laser con lunghezza d'onda di 670 nm. Lo spot è chiaramente visibile, e consente dunque di impostare facilmente la posizione di misura anche per oggetti molto piccoli.

Questo strumento presenta una combinazione di tecnologia ottica e analogico/digitale che permette di avere un campo di misura di ± 8 mm, fornire una risoluzione di $0.5 \mu\text{m}$ di misura e presenta una linearità dello ± 0.1 % del fondo scala. Il dispositivo ottico è integrato alla slitta e solidale ad essa.

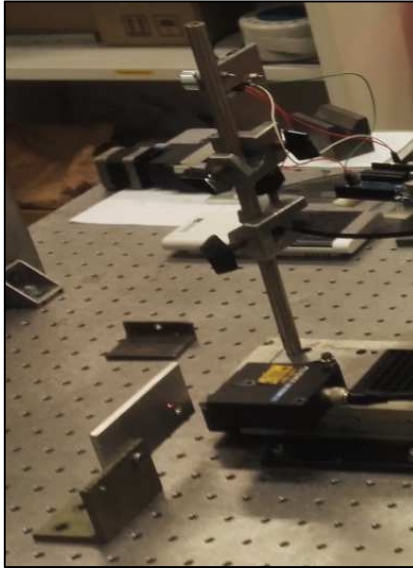


Figura 6.4a - Set-up con laser a triangolazione.

Il test è stato effettuato in corrispondenza della distanza sensore-target di inizio misura di 308 mm, come riportato in Tabella 6.4a, valore fornito dal controllore della slitta micrometrica, corrispondente ad un TOF di 1333.98 μ s. A questa distanza il laser fornisce un valore di output di -5 mm rispetto ad un altro target fisso di riferimento opportunamente aggiunto al set-up di misura.

Per ogni step lungo il piano orizzontale della slitta di 1 mm, il laser misura un passo di traslazione medio di 0.9 mm (da un valore massimo di 0.92 ad un valore minimo di 0.86 mm) rispetto al suo target fisso.

Inoltre, controllando tutti gli step di traslazione da 308 mm a 323 mm (terza colonna da sinistra della Tabella 6.4a) ed i relativi TOF riportati nell'ultima colonna della tabella, è possibile evidenziare la presenza del jitter time tra i 318 mm e i 322 mm.

Laser a triangolazione		Sistema ultrasonoro	
Valore in uscita laser [mm]	Step di traslazione (Δx) [mm]	Valore in output della slitta micrometrica [mm]	TOF [μs]
-5.00		308	1333.98
-4.09	0.91	309	1341.66
-3.19	0.90	310	1345.03
-2.28	0.91	311	1352.05
-1.36	0.92	312	1356.00
-0.47	0.89	313	1362.40
0.39	0.86	314	1369.41
1.28	0.89	315	1373.62
2.18	0.90	316	1377.93
3.09	0.91	317	1385.58
3.98	0.89	318	1365.50
4.87	0.89	319	1370.43
5.75	0.88	320	1375.58
6.64	0.89	321	1379.91
7.51	0.87	322	1387.40
8.38	0.87	323	1420.64

Tabella 6.4a - Correlazione tra laser a triangolazione e slitta micrometrica. Nella parte con sfondo scuro sono indicati il tratto interessato dal jitter time.

Mentre esiste una forte diminuzione dei valori dei tempi di volo, gli step di avanzamento Δx forniti dal laser non mostrano deviazioni significative dal valor medio.

Questi risultati hanno permesso di accertare, utilizzando uno strumento a risoluzione notevolmente più alta, che la presenza del jitter time non è dovuta ad alcun problema meccanico della slitta micrometrica.

6.5 Effetto della temperatura e dell'umidità

Al fine di studiare le performance dell'SRF05 sotto le diverse condizioni ambientali, il set-up di misura in questo ciclo di test, è stato posto dentro una camera climatica (ACS – Climatic Chamber Challenge 250).



Figura 6.5a - Camera climatica.



Figura 6.5b - Camera climatica con controller.

Si è perseguito l'obiettivo di verificare come variazioni di temperatura e umidità relativa influenzino l'andamento dei tempi di volo del fascio ultrasonoro in uscita dal sensore, e quale sia la risposta di quest'ultimo in termini di output.

I test possono essere divisi in due fasi:

- 1) Umidità relativa fissata al 30% e scala di temperatura da 5°C a 40°C, con incrementi di 5°C.
- 2) Temperatura di lavoro fissata a 25°C e scala di umidità relativa dal 30% al 60% con incrementi di 10 punti percentuali. (La scelta della scala di umidità relativa risulta abbastanza limitata per non andare a sollecitare troppo la macchina).

VARIAZIONI DI TEMPERATURA

Le condizioni operative sono state opportunamente scelte in modo tale da non provocare deformazioni a livello localizzato (dilatazioni o contrazioni degli organi meccanici appartenenti al set-up di misura).

A causa del limitato spazio all'interno della camera climatica sono state eseguite corse del sensore da 116 mm a 170 mm.

Il grafico di Figura 6.5c mostra i valori dei tempi di volo forniti dal sensore SRF05 al variare della distanza.

I differenti colori corrispondono alle differenti temperature.

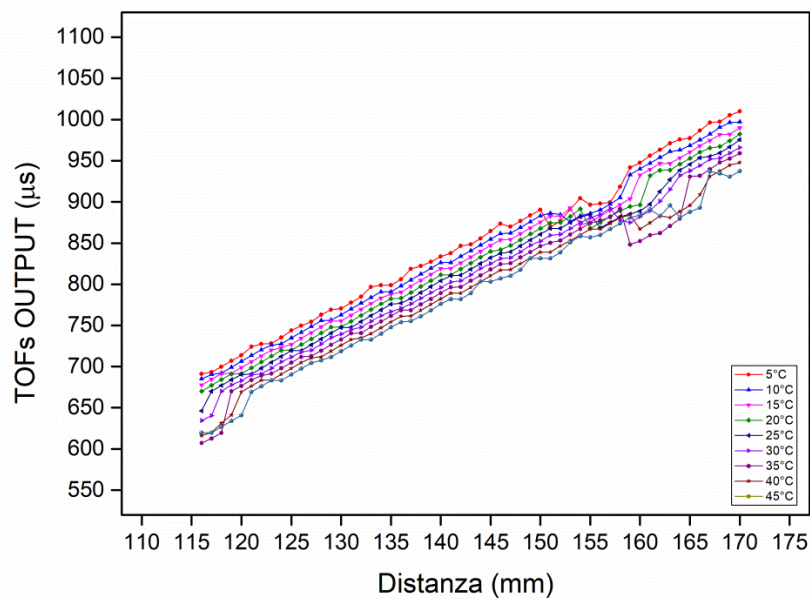


Figura 6.5c - Dipendenza della temperatura dei TOFs per un intervallo di distanze da 116 mm a 170 mm per variazioni di temperatura da 5°C a 45°C.

Le curve seguono un andamento lineare da 122 mm a 150 mm, al di fuori di questo tratto sono riscontrabili le irregolarità dovute al jitter time.

Per di più, si riesce ad identificare un offset verso la parte destra del grafico all'aumentare della temperatura. Questa situazione è identificabile soprattutto per le prime distanze prese in considerazione, infatti, ad esempio nelle curve relative a 30°C si nota un ritardo nella comparsa del jitter time rispetto alla curva a 25°C.

Questo shift delle irregolarità gioca un ruolo negativo nella taratura del sensore in quanto riduce la zona lineare caratterizzata da un andamento regolare e stabile dei tempi di volo per temperature che variano dai 5 °C ai 45°.

In riferimento al grafico, e prendendo in considerazione solo la parte lineare di ogni temperatura, quindi gli intervalli di distanza che vanno da 122 mm a 150 mm, lo scarto quadratico medio calcolato tra i dati sperimentali e la curva di fitting risultano essere compresi tra 1.62 µs e 2.26 µs. Tali valori rivelano una limitata dispersione dei dati sperimentali e quindi un alto grado di affidabilità del sistema di misura adottato.

Al fine di caratterizzare completamente la sonda ad ultrasuoni, è importante verificare la costanza della velocità del suono ad ogni temperatura settata nella macchina.

Sono state confrontate le velocità del suono a 25°C, 30°C, 35°C e 40°C con il modello matematico riportato in vari articoli in letteratura. Il modello teorico si basa sulle equazioni (3.53) e (3.54) riportate nel Capitolo 3.

I grafici sottostanti di Figura 6.5d mostrano il risultato di tale comparazione:

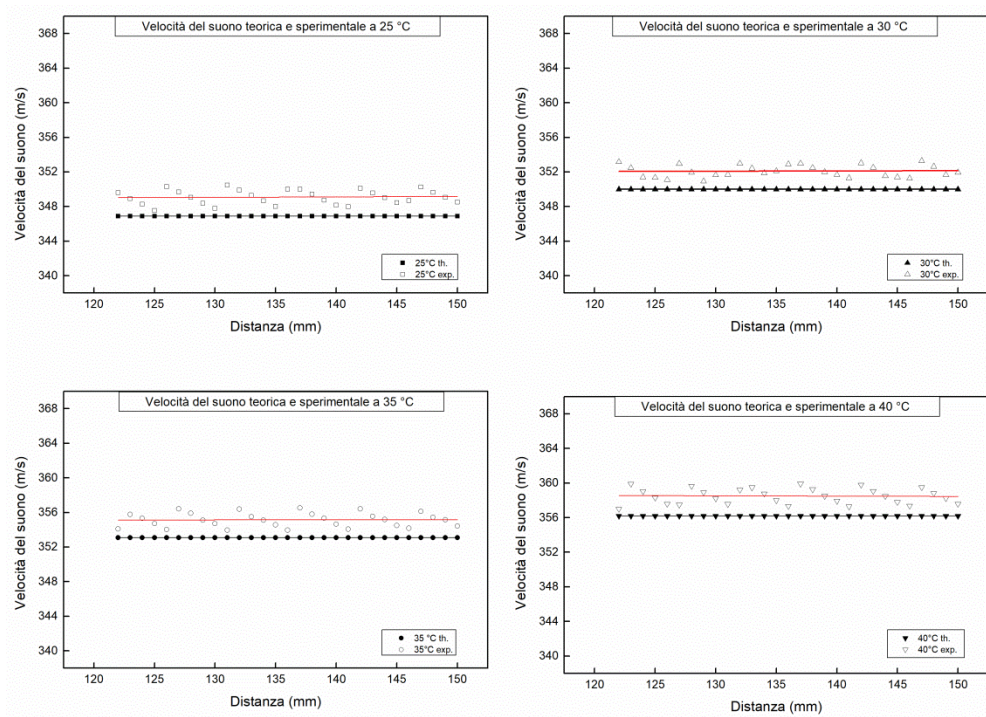


Figura 6.5d - Andamento della velocità del suono al variare della distanza per diversi valori di temperatura (25°C, 30°C, 35°C e 45°C).

In tutte le situazioni prese in considerazione, è stato misurato un aumento della velocità del suono di 2 m/s rispetto ai valori ottenuti con l'equazione teorica sopra accennata. Infatti, tra le velocità indicate dalla retta di fitting dei dati sperimentali (retta rossa) e la velocità ottenuta con il modello teorico, rappresentata dalla retta nera, vi è una differenza sostanzialmente costante di 2 m/s. Questa differenza comporta un errore di 0.56 mm nella valutazione della distanza.

I risultati dimostrano che gli effetti della temperatura sui tempi di volo non possono essere valutati in maniera precisa dall' algoritmo di Equazione 3.54.

Più in dettaglio la velocità del suono data dal modulo SRF05 è affetta da un errore relativo dello 0.3%, mentre lo stesso valore calcolato con il modello matematico dato dall'equazione (3.54), risulta essere dello 0.6%.

VARIAZIONI DI UMIDITA' RELATIVA (RH)

Al fine di avere una caratterizzazione accurata del sensore è stato necessario rendersi conto dell'influenza dell'umidità relativa sui valori in uscita dal sensore. Questo è stato l'obiettivo della seconda fase di lavoro in camera climatica. Il sensore è stato posto ad una distanza di 122 mm dal target in metallo. La temperatura impostata a 25 °C. Le prove, in camera climatica, sono state programmate per quantità crescenti di umidità relativa pari a: 30%, 40%, 50% e 60%; per ogni livello sono stati acquisiti 300 valori.

I risultati riguardanti l'SRF05 sono riportati in Tabella 6.5a.

Umidità relativa (HR%)	Media TOFs (μ s)
30 %	722.5 \pm 0.4
40 %	722.0 \pm 1.0
50%	721.9 \pm 0.9
60%	721.5 \pm 1.6

Tabella 6.5a - Correlazione tra medie degli output dei TOFs e umidità relativa.

Da questa si nota che le medie dei TOFs forniti dal sensore alle diverse percentuali di RH, non presentano apprezzabili differenze. La variazione massima nella misura della distanza legata alle variazioni dell'umidità (di circa un terzo di millimetro) è così piccola da poter essere trascurata rispetto a quella legata alle variazioni della temperatura già analizzate.

Le misure sopra riportate, indicano che la velocità del suono cambia notevolmente al variare della temperatura e quindi occorrerebbe almeno aggiungere un termometro al dispositivo finale per ottenere la sensibilità di misura richiesta. Ma

anche in questo modo si è visto che l'espressione teorica, che lega la variazione di velocità a quella di temperatura, presenta delle incertezze. Pertanto, si ritiene che un modo efficiente ed efficace per determinare la velocità del suono nelle particolari condizioni climatiche alle quali il sistema opera, è quello di installare un altro sensore ad ultrasuoni, SRF05, ad una distanza fissa rispetto ad un target di riferimento. In tale modo si potrà determinare con estrema precisione la velocità del suono che verrà successivamente usata per misurare la distanza sensore-pelo libero della superficie liquida.

6.6 Analisi dei segnali

In questa fase del lavoro di tesi, i test sono stati eseguiti in condizioni simili a quelle in cui il sensore ad ultrasuoni deve operare. In tale situazione il set-up di misura è stato modificato al fine di avere la traslazione della slitta e quindi anche del sensore ad ultrasuoni, lungo la direzione verticale.

Il target usato in queste prove è la superficie dell'acqua contenuta in un recipiente in PVC. L'uso dell'oscilloscopio ha permesso di indagare ancora più in profondità le cause della presenza del jitter time.

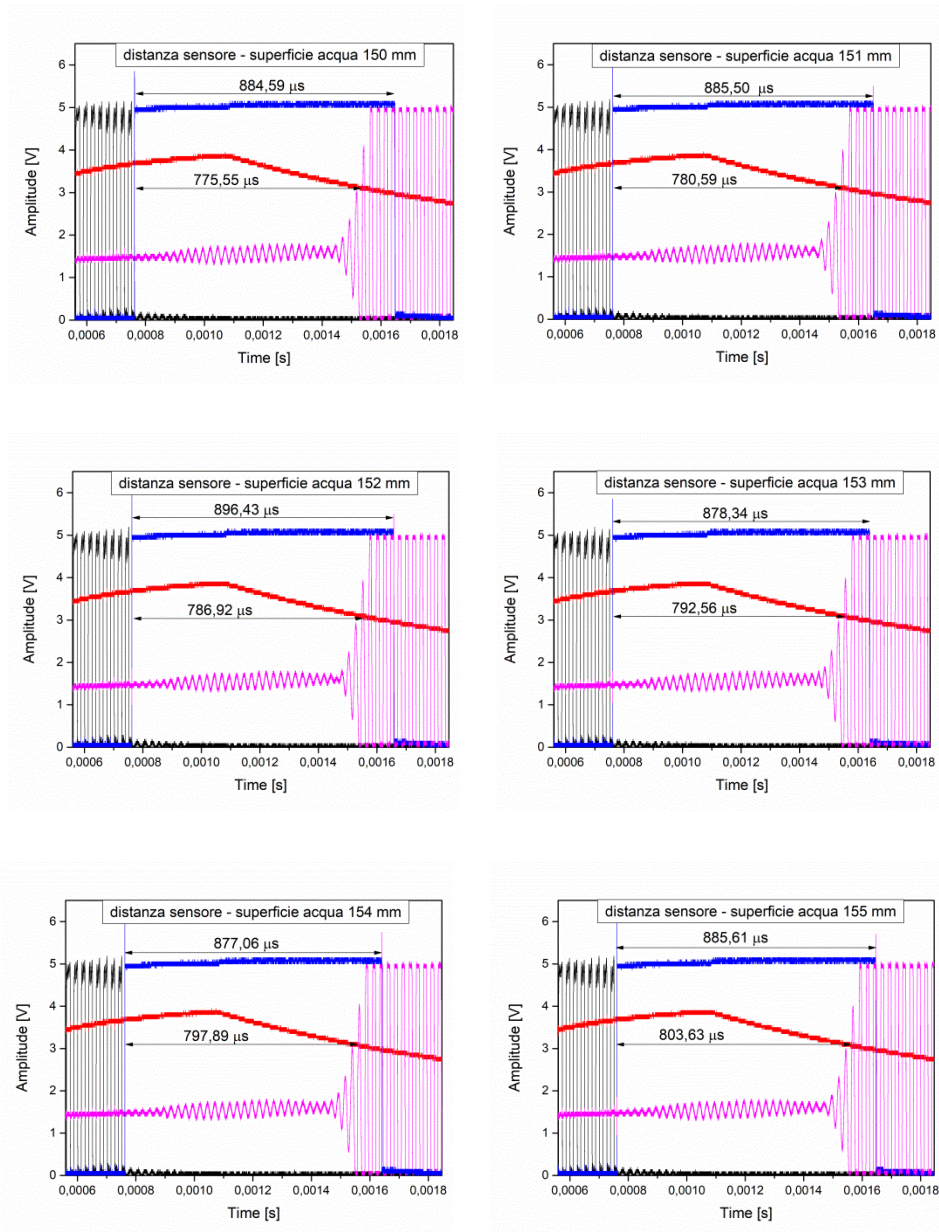
I grafici sottostanti di Figura 6.6a mostrano una delle tante corse effettuate dal sensore per distanze sensore-superficie acqua da 150 mm a 162 mm.

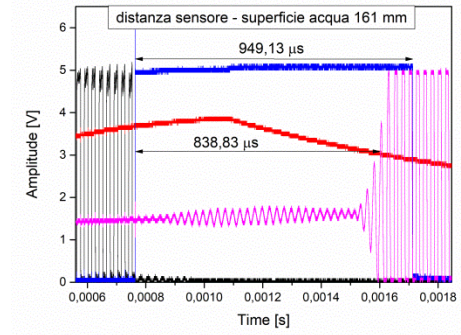
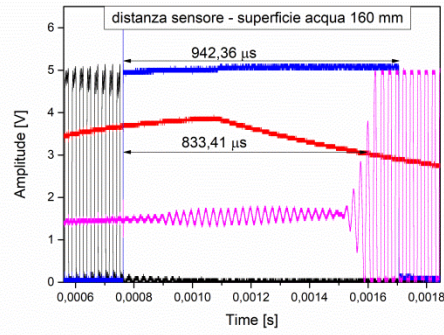
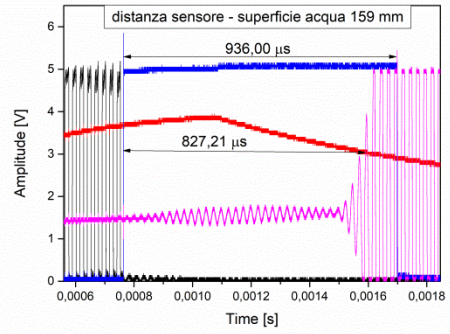
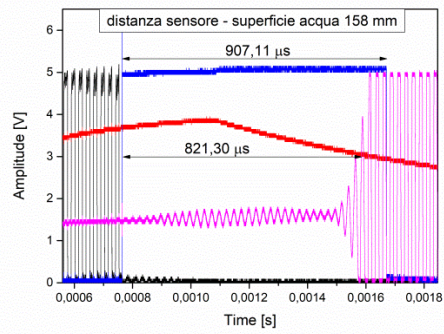
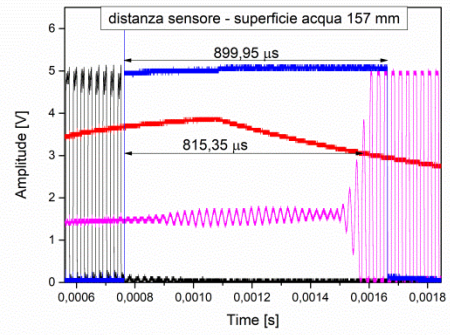
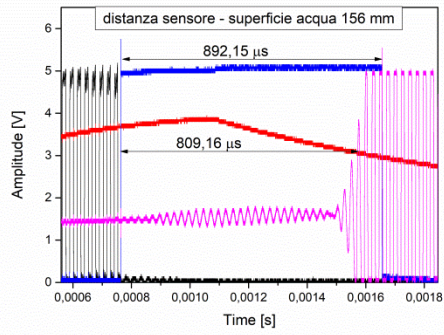
I segnali riportati in ogni grafico sono 4 e sono:

- otto impulsi a 40 kHz, inviati alla capsula trasmittente (segnale di colore nero);
- onda quadra, di lunghezza proporzionale al TOF per quella distanza (segnale di colore blu);
- onda ultrasonica riflessa dal target e arrivata alla capsula ricevente (segnale di colore magenta);
- curva esponenziale di soglia dinamica di chiusura onda quadra (segnale di colore rosso);

È opportuno sottolineare che in questa serie di test è stato preso in considerazione soltanto un valore del tempo di volo in uscita dal sensore ad ogni distanza (riportato sopra l'onda quadra) e non la media di 30 secondi di acquisizione.

Il dato trascritto invece sotto la curva rossa di threshold, indica l'intersezione esatta tra la soglia stessa e il segnale riflesso entrante.





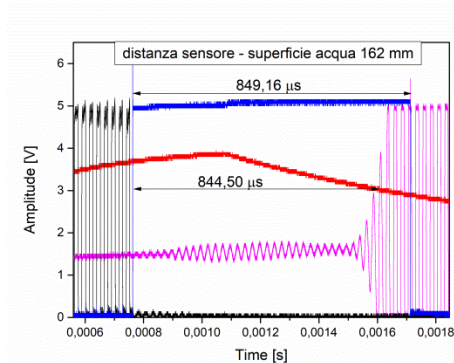


Figura 6.6a - Grafici che rappresentano i segnali del sensore SRF05, ricavati dall'oscilloscopio e analizzati tramite OriginPro Lab per distanze da 150 mm a 162 mm.

Ad ogni millimetro di salita del sensore lungo il piano verticale, il segnale di echo si sposta verso la destra del grafico, comportando un allungamento dell'onda quadra. La fase di salita della curva blu rimane sempre fissa lungo l'asse dei tempi ed è innescata ad un valore di soglia di 3.8 V.

Il microprocessore del sensore conta 4 picchi dopo l'intersezione segnale di echo-soglia e chiude l'onda quadra (fase di LOW). Questo previene errori di misura che potrebbero essere generati da falsi picchi o da rumori. Tale comportamento assume rilevanza soprattutto per distanze vicino al limite operativo superiore del SRF05, dove la progressiva attenuazione dei picchi, potrebbe mettere in risalto la presenza di falsi echi di ritorno alla capsula ricevente, dando valori di distanza completamente errati. Dalla sequenza delle misure sopra riportate è possibile notare tra le distanze di 152 mm e di 153 mm e quelle di 158 mm e 159 mm, la presenza delle irregolarità che si manifestano in questo tipo di sensore ad ultrasuoni e descritte nei precedenti paragrafi di questa tesi. La Figura 6.6b mostra in maniera più chiara la situazione.

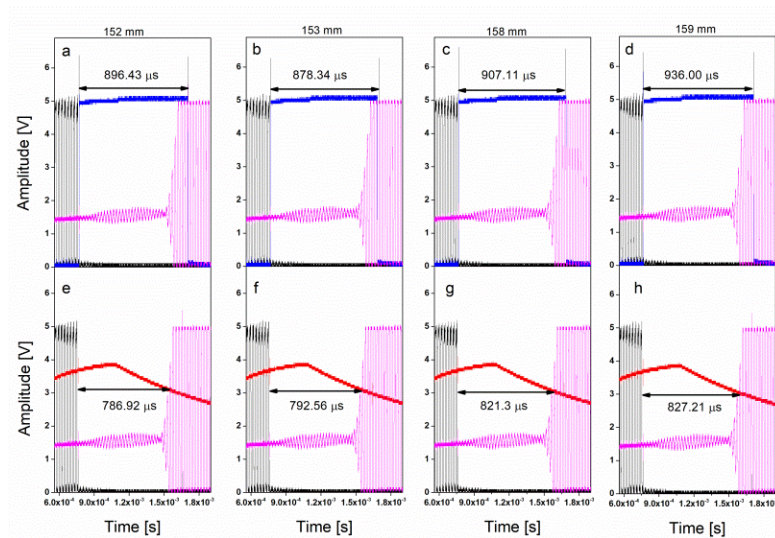


Figura 6.6b - Grafici indicanti la fase di inizio tra 152 mm e 153 mm e la fase di chiusura tra i 158 mm e i 159 mm del jitter time.

I grafici sopra mostrano la sequenza della misura dell'onda di ritorno ai bordi del jitter time. Esso inizia ad una distanza compresa tra i 152 mm (grafico a) e i 153 mm (grafico b), e finisce ad una distanza tra i 158 mm (grafico c) e i 159 mm (grafico d). Nella fase di inizio è evidente un forte decadimento di 18 μs dei tempi di volo, ossia alla lunghezza del tratto corrispondente all'onda quadra dopo i 152 mm e, nella fase finale, un rilevante aumento di 29 μs .

Nei casi al di fuori del tratto del jitter time (grafici a e d di Figura 6.6b), dove è riscontrabile una chiusura dell'onda quadra al quarto picco dopo i 4 Volt, il sensore fornisce tempi di volo regolari. Mentre nei tratti interessati dall'anomalia (grafici b e c di Figura 6.6b) del jitter time, la messa in LOW del segnale blu (onda quadra) avviene invece dopo il terzo picco. Questo fenomeno è la causa della presenza di tale irregolarità nella misura dei tempi, quindi delle distanze per questo tipo di sensore. Prendendo in esame, invece, la prima interazione tra la curva rossa (curva di soglia) e la curva di echo (grafici e, f, g, h, f di Figura 6.6b), non si riscontra nessuna anomalia, in quanto l'onda riflettente slitta di una corretta quantità verso destra allontanando il sensore dalla superficie del fluido millimetro dopo millimetro. Questi risultati sono indicati nella Tabella 6.6a.

Distanza [mm]	TOFs onda quadra [μs]	Retta di fitting [μs]	Residui [μs]	Deviazione standard [μs]
150	884.59	868.95	15.64	
151	885.50	875.19	10.31	
152	896.43	881.44	14.99	
153	878.34	887.68	-9.34	
154	877.06	893.93	-16.87	
155	885.61	900.17	-14.56	
156	892.15	906.42	-14.27	
157	899.95	912.66	-12.71	
158	907.11	918.91	-11.79	
159	936.00	925.15	10.85	
160	942.36	931.39	10.96	
161	949.13	937.64	11.49	
162	949.13	943.88	5.24	
				13.1
Distanza [mm]	TOFs onda quadra [μs]	Retta di fitting [μs]	Residui [μs]	Deviazione Standard [μs]
150	775.55	775.03	0.52	
151	780.59	780.82	-0.23	
152	786.92	786.61	0.31	
153	792.56	792.39	0.17	
154	797.89	798.18	-0.30	
155	803.63	803.97	-0.34	
156	809.16	809.75	-0.60	
157	815.35	815.54	-0.19	
158	821.30	821.33	-0.03	
159	827.21	827.12	0.09	
160	833.41	832.90	0.50	
161	838.83	838.70	0.14	
162	844.50	844.48	0.02	
				0.33

Tabella 6.6a - TOFs risultanti dalle prove di analisi del jitter time. Primo blocco riguardante i TOFs ricavati dalla lunghezza dell'onda quadra, secondo blocco TOFs forniti dall'intersezione tra soglia e segnale d'echo.

Come si può vedere dalla tabella, i tempi di volo, dati dal sensore, e quelli calcolati dall'intersezione segnale - soglia (differenza tra primo punto d'intersezione e apertura dell'onda quadra), risultano assai diversi e la deviazione standard dei valori residui, relativa ai tempi in microsecondi dell'onda quadra, in una corsa del sensore di 12 mm, è di 13.11 μs mentre è di 0.33 μs per quelli calcolati con l'intersezione diretta con la soglia.

Questo rivela, con maggiore forza, che il sensore percepisce spostamenti di 1 millimetro del target.

Tramite una slitta micrometrica manuale installata al posto della digitale, si è riusciti a scoprire quale fosse la distanza esatta di fine jitter time e, avanzando passo dopo passo di un decimo di millimetro alla volta tra 152 mm e 153 mm, si è giunti alla distanza di 158.06 mm, dove si è riscontrata una fluttuazione intermittente della chiusura dell'onda quadra.

In Figura 6.6c è raffigurata tale situazione:

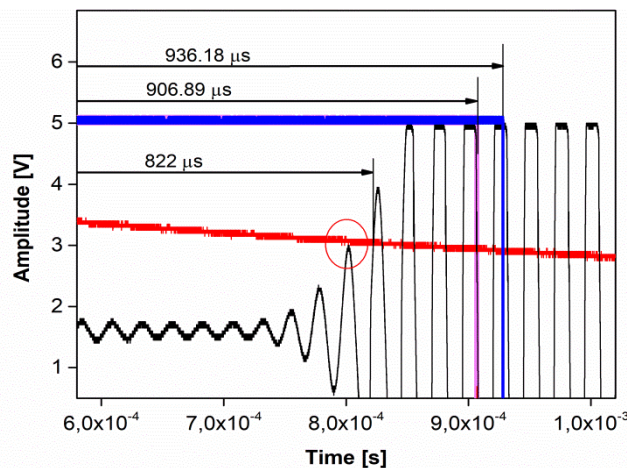


Figura 6.6c. - Particolare della misura effettuata a 158.06 mm, raffigurante la situazione di intermittenza di caduta in LOW dell'onda quadra.

In tale situazione è evidente che la prima intersezione tra la curva di soglia ed il segnale di echo (in nero nel grafico) può avvenire, a questa particolare distanza, in due punti: o nel picco pressoché adiacente alla curva di soglia (cerchio rosso) o nel picco immediatamente successivo. Per cui, quando il TOF è di 906.89 μs , si verifica il primo caso, ciò significa che vi è intersezione di un massimo dell'onda

che raggiunge il valore di 3 V, mentre quando l'onda quadra chiude a 936.16 μ s il contatto avviene con la porzione d'onda che, come si può vedere in Figura 6.6c, ha un massimo di 4 V.

La sistematicità di questa instabilità che si ripete ogni 40 mm, si può giustificare con il fatto che il tipo di situazione sopra descritta si presenta ad intervalli regolari a causa della costanza della velocità dell'onda e all'andamento quasi rettilineo della curva di soglia. Infatti, il jitter time si può anche interpretare come risultato della contemporanea azione di due effetti: 1) la traslazione del segnale verso destra nell'asse dei tempi all'aumentare della distanza sensore-target e 2) il progressivo decadimento dell'esponenziale di soglia lungo l'asse dei tempi.

Per poter ovviare a questo tipo di anomalia ed avere un livello di accuratezza entro il limite richiesto dal progetto, si potrebbe implementare il sistema di misura con un secondo sensore SRF05, fissato ad una distanza di 20 mm rispetto al primo (ovvero nell'intervallo tra due jitter time consecutivi). In questo modo dal confronto delle due misure è possibile comprendere se si è in presenza di un'anomalia ed eventualmente quale delle due misure è corretta.

6.6.1 Casi particolari studiati

Due test ulteriori, sono stati eseguiti a distanze superiori a tutte quelle fino ad ora provate. Il target usato in questo caso è la parete del laboratorio. Il sensore è stato fissato a 1.60 metri (1a prova) e a 2.50 metri (2a prova) da essa.

I grafici di Figura 6.6d e Figura 6.6e mostrano i risultati:

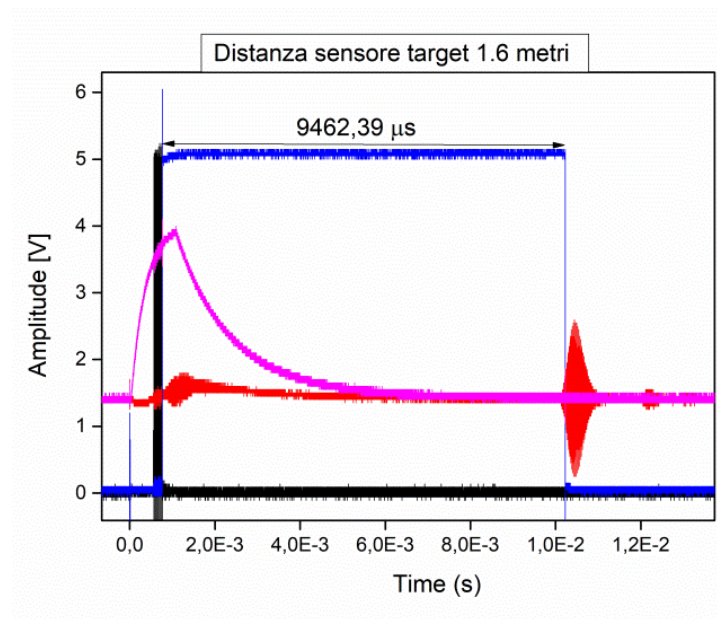


Figura 6.6d - Segnale ultrasonico (rosso) a 1.60 m.

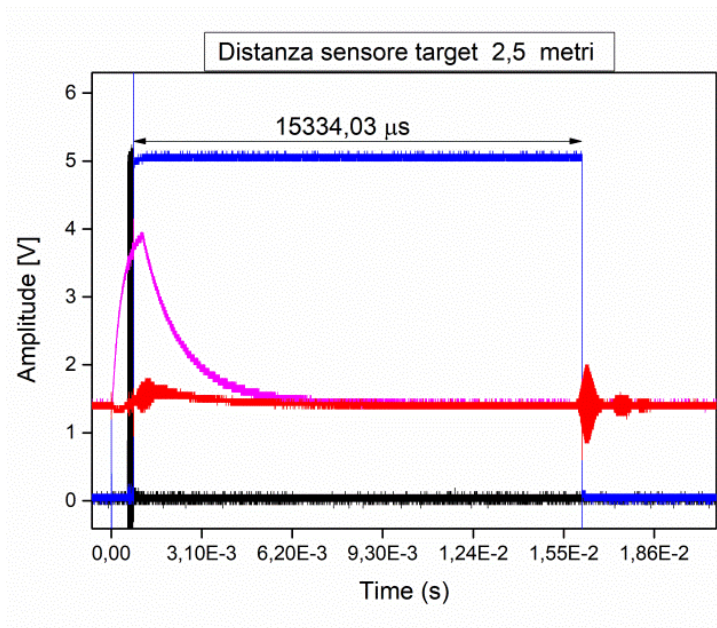


Figura 6.6e - Segnale ultrasonico (rosso) a 2.50 m.

Rispetto ai casi studiati fino ad ora, riguardanti distanze vicine al limite operativo inferiore del sensore, è più facile notare che un aumento della distanza provoca una spiccata riduzione dell'ampiezza del segnale d'echo (attenuazione), picco rosso nei grafici di Figura 6.6d e 6.6e , e quindi un conseguente slittamento del punto di intersezione (verso tempi più lunghi) tra soglia (curva rosa) e segnale. Tali osservazioni sono in perfetto accordo con quelle fatte per distanze inferiori del target confermando l'analisi effettuata.

Al fine di verificare il comportamento del sensore nella sua parte analogica, è stato utilizzato un materiale assorbente. Il target è stato sostituito con un parallelepipedo di gommapiuma con spessore di 80 mm e posto ad una distanza inferiore a 100 mm dal sensore.

Di seguito è riportato il grafico in Figura 6.6e caratterizzante questa situazione:

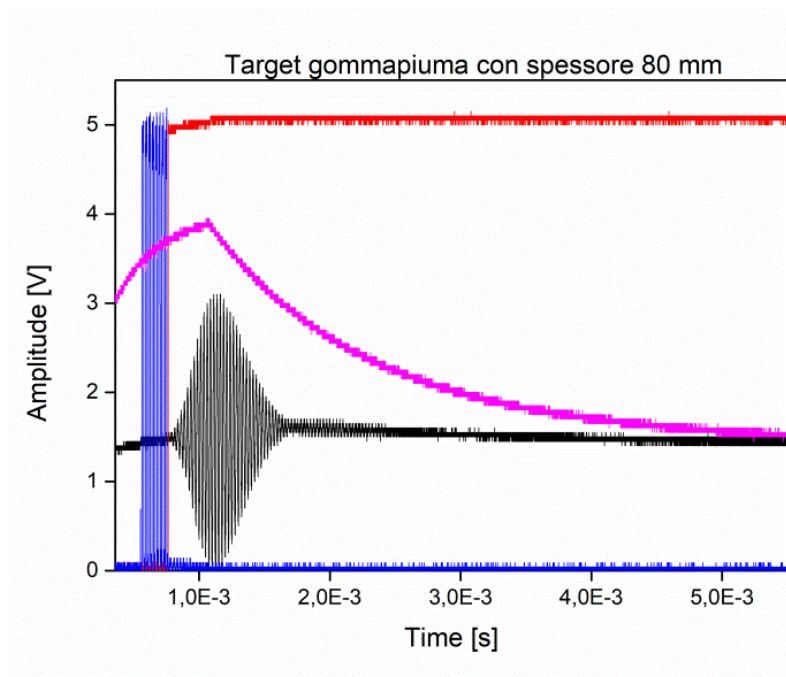


Figura 6.6e - Segnale echo da un target di gommapiuma.

Si nota che, per mezzo di un'attenuazione che provoca un abbassamento del picco del segnale in entrata, non si ha una interazione dello stesso con la curva esponenziale di soglia. In questo caso, infatti, nel grafico non avviene mai una chiusura in LOW dell'onda quadra corrispondente al tempo di ritorno dell'onda

ultrasonica. Il microprocessore fornisce un risultato di 30556 μs , che rappresenta il tempo massimo di volo che può misurare il sensore nel suo range operativo. Quindi, con questa prova si è accertato che la curva di soglia è effettivamente quella presa in considerazione in tutti i casi studiati precedentemente.

6.7 Processamento del segnale

A seguito dei risultati forniti dalle misure effettuate fino ad ora ed in particolare alla prematura caduta in LOW dell'onda quadra, si è provato a ricostruire il segnale ultrasonoro e si è cercato di trovare dei metodi di involuppo del segnale in grado di migliorare l'accuratezza della misura.

Attraverso un'analisi numerica eseguita tramite software Matlab [MATLAB® MathWorks], è stato ricostruito il segnale in tensione entrante nella capsula ricevente[Appendice]. La sua equazione è risultata essere:

$$V_s(t) = (at^2 + bt) \sin(2\pi ft) + A \quad (6.7.1)$$

Dove a e b sono parametri che descrivono la divergenza di ampiezza dei primi 5 picchi che superano i 2 Volt.

L'equazione (6.7.1) espressa analiticamente può essere riscritta nell'equazione (6.7.2), il cui grafico è riportato nella Figura 6.7a.

$$V_s(t) = (2 * 10^8 t^2 + 11017 t) * \sin(2\pi * 40 * 10^3 * t) + 1.8 \quad (6.7.2)$$

Con lo stesso metodo è stata trovata l'equazione esponenziale della soglia (threshold), nella forma:

$$V_t(t) = V_0 e^{\frac{-t}{RC}} \quad (6.7.3)$$

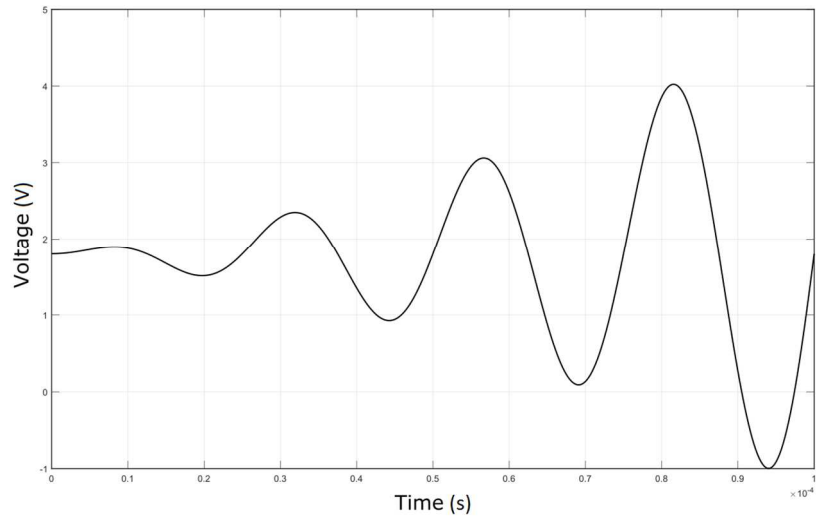


Figura 6.7a - Segnale echo processato.

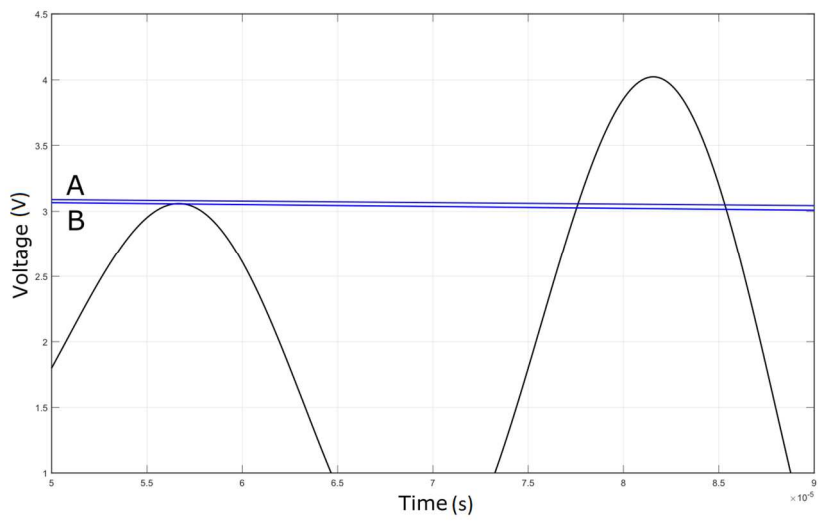


Figura 6.7b - Threshold A e threshold B nell'interazione con il segnale di echo

La Figura 6.7b mostra la simulazione dell'interazione tra il segnale processato di echo e la curva di scarica del circuito RC nella situazione descritta di fine jitter time a 158.06 mm, distanza sensore – pelo libero dell'acqua.

La threshold A rappresenta la soglia in assenza di jitter time, ovvero quando il microprocessore fornisce i TOFs regolari. La curva B è stata creata in maniera proporzionale alla fluttuazione elettrica dovuta al rumore che innalzerebbe di una piccola quantità il segnale entrante nella capsula ricevente, determinando lo spostamento del punto d'intersezione al picco precedente, quello con massimo a 3 V.

Le due soglie sono definite dalle due equazioni:

$$V_{At}(t) = 3.1473 * e^{\frac{-t}{2.7*10^{-3}}} \quad (6.7.4)$$

e

$$V_{Bt}(t) = 3.1404 * e^{\frac{-t}{2.1*10^{-3}}} \quad (6.7.5)$$

La loro differenza rappresenta l'entità della fluttuazione che provoca una misura non corretta.

A causa di tale fluttuazione, l'intersezione tra la soglia e il segnale avviene in due differenti picchi, denominati 1 R e 2 R in Figura 6.7c, corrispondenti a diversi TOF per la stessa distanza spaziale.

Numerosi algoritmi sono stati sviluppati in letteratura per ottimizzare la misura dei tempi di volo in aria[87][39][88][89].

In questo lavoro, per cercar di ridurre l'errore nella misura, sono presentati i metodi della demodulazione AM (Amplitude Modulation) e della trasformata di Hilbert. Il primo, è un'operazione che estrae da un segnale modulato in ampiezza le informazioni di bassa frequenza. La demodulazione in pratica avviene utilizzando un dispositivo non lineare (un diodo) con un filtro passa-basso in grado di ricostruire l'involuppo del segnale AM.

La trasformata di Hilbert definita dall'equazione (6.7.6):

$$\hat{x}(t) = H\{x(t)\} = x(t) * h_H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad t \in (-1; +1) \quad (6.7.6)$$

dove $\hat{x}(t)$ è il segnale trasformato e $h_H(t)$ è la risposta impulsiva, crea un inviluppo del segnale filtrandolo nella banda di frequenza 35 – 45 kHz, intorno alla frequenza di risonanza del trasduttore di trasmissione della sonda SRF05 di 40 kHz, per avere risultati più accurati.

Il grafico in Figura 6.7c mostra il segnale modificato con i metodi sopra descritti.

Le linee rossa e verde rappresentano rispettivamente l'inviluppo ricavato dalla trasformata di Hilbert e l'inviluppo della demodulazione AM.

Se si rilevano le intersezioni del segnale elaborato (linea rossa o verde) con le curve di soglia A e B, è possibile determinare l'effetto della fluttuazione elettrica sui TOF. In particolare, in Tabella 6.7a sono riportati i valori e le differenze di queste intersezioni sull'asse temporale.

Tali differenze corrispondono chiaramente alle possibili fluttuazioni delle misure dei tempi di volo dell'onda ultrasonica generata dal sensore SRF05.

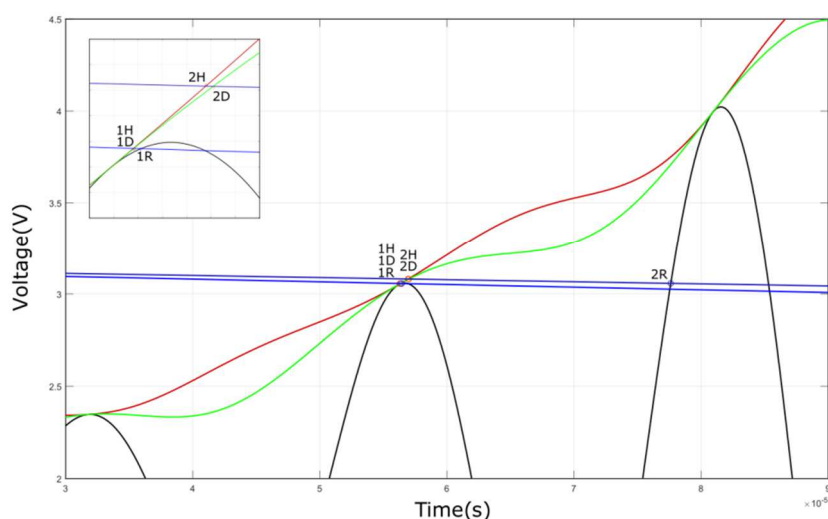


Figura 6.7c - Elaborazione del segnale con demodulazione AM (linea verde) e trasformazione di Hilbert (linea rossa). Il riquadro mostra l'interazione tra segnale di soglia e segnale di eco. 1R, 1D e 1H sono i punti di intersezione del segnale grezzo, del segnale di inviluppo e del segnale di trasformazione di Hilbert con la prima soglia esponenziale, rispettivamente. 2R, 2D e 2H sono le intersezioni tra i segnali di trasformazione grezzo, inviluppo e Hilbert e la seconda soglia esponenziale.

<i>METODO</i>	<i>SIMBOLO</i>	<i>1° Intersezione</i> (* 10 ⁻⁵) [s]	<i>2° Intersezione</i> (* 10 ⁻⁵) [s]	<i>Differenza 2°-1°</i> (* 10 ⁻⁵) [s]
Raw signal	R	5.642	7.761	2.12
AM demodulation	D	5.630	5,702	0.07
Hilbert transform	H	5.636	5.695	0.06

Tabella 6.7a - Valori temporali delle intersezioni tra i diversi segnali elaborati e le curve di soglia superiore e inferiore per una distanza fissa di 158.06 mm.

La differenza dei valori dei TOFs calcolata per una distanza fissa (in questo caso 158.06 mm) diminuisce significativamente da 21.19 μ s per il segnale grezzo a 0.72 μ s per il segnale elaborato con modulazione AM fino a diventare 0.59 μ s per l'involuppo ottenuto con la trasformata di Hilbert.

Questi metodi permettono quindi di migliorare le prestazioni del sensore SRF05 perché consentono di eliminare l'anomalia del jitter time. Essi forniscono un'analisi efficiente in tempo reale e valori accurati dei tempi di volo, d'altra parte però, comportano un aumento del costo totale del dispositivo e una maggiore complessità nelle componenti circuitali e nella configurazione del sistema di lettura del livello all'interno della boa, come può avvenire con l'implementazione di un dispositivo di elaborazione del segnale (DSP).

6.8 Confronto con target diversi

Come già detto nel capitolo 2, quando il fronte d'onda generato dalla sonda ad ultrasuoni si propaga nel mezzo comincia a degradarsi per una dispersione dell'energia all'interno della microstruttura dei materiali. Si può affermare che le oscillazioni meccaniche delle onde sonore si trasformano in calore, dando vita al fenomeno di attenuazione acustica.

La perdita di ampiezza del segnale dell'echo dovuta all'effetto dell'attenuazione per un dato tragitto dell'ultrasuono, sarà data dalla somma degli effetti di assorbimento che aumentano linearmente in funzione della frequenza e degli effetti di diffusione, questi ultimi dipendono dalla dimensione dei confini intergranulari della microstruttura e dalla lunghezza dell'onda che l'attraversa.

Ogni materiale è caratterizzato da un coefficiente di attenuazione dipendente dalla temperatura alla quale si trova il mezzo e dalla frequenza di lavoro del fascio ultrasonoro. Se è possibile ricavare il coefficiente d'attenuazione del materiale, l'abbassamento dell'ampiezza del segnale può essere calcolato in base alla nota equazione $A = A_0 e^{-\alpha x}$

In tutti i materiali, a frequenze elevate le onde sono attenuate più rapidamente rispetto a quelle a basse frequenze.

Per prove d'ispezione a coefficiente d'attenuazione elevato, come gomme o plastiche a bassa densità, sono generalmente adottate le basse frequenze.

In questa serie di test effettuati, sono stati scelti dei target arbitrari posizionati alle stesse distanze dalla sonda ad ultrasuoni.

I target solidi coinvolti per questa prova hanno stesse dimensioni della lamina in acciaio utilizzata per i suddetti esperimenti e sono un pannello di MD (medium-density fibreboard derivato dal legno), lastra di vetro e un parallelepipedo di gommapiuma.

Mentre i target liquidi presi in considerazione sono stati l'acqua contenuta in un recipiente in PVC e successivamente, uno strato d'olio della stessa altezza degli spessori dei materiali riportati sopra.

Le prove sono state eseguite per distanze sensore- target da 116 mm a 165 mm, per ognuna di esse sono stati rilevati 100 valori, i punti nel grafico di Figura 6.8a e 6.8b rappresentano la media aritmetica di tali valori.

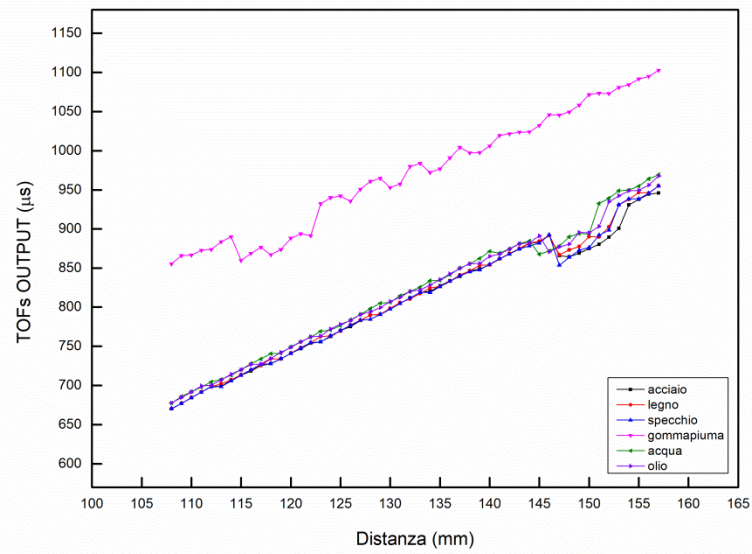


Figura 6.8a - Grafico distanza- TOFs per i diversi materiali.

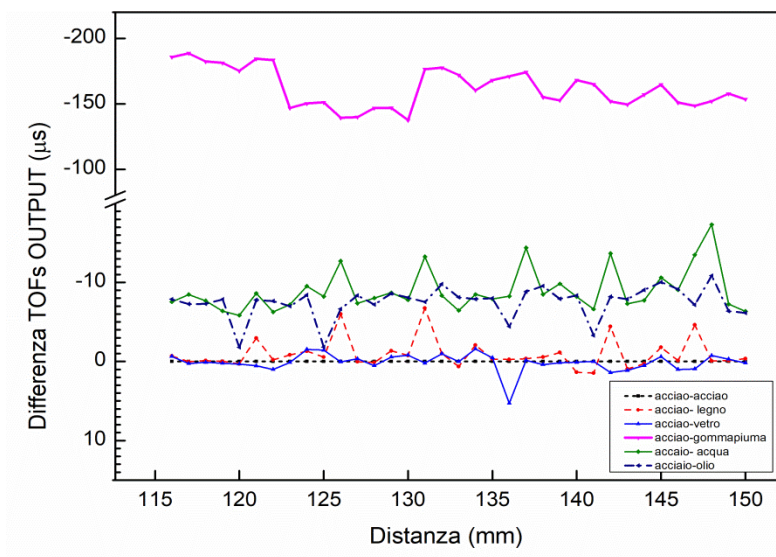


Figura 6.8b - Grafico residui dei TOFs per i diversi materiali nella parte lineare.

I risultati delle prove mostrati in Figura 6.8a, evidenziano la presenza del jitter time in tutte le curve, a parte in quella dove il target utilizzato è la gommapiuma. In questa situazione sono riscontrabili forti scostamenti dei tempi di volo alle varie distanze, i valori hanno oscillazioni tanto ampie da non rendere identificabile un'eventuale presenza del jitter time.

Le curve riguardanti gli altri materiali presentano invece lo stesso comportamento. Il jitter time è identificabile all'incirca alle stesse distanze riscontrate in precedenza.

Il grafico 6.8b mostra una rappresentazione dei valori dei TOFs misurati rispetto a quelli ricavati con il target d'acciaio (linea tratteggiata nera). Sono state prese in considerazione tutte quelle distanze precedenti all'avvento del jitter time.

Tale grafico mostra chiaramente un ritardo marcato dei valori quando è utilizzata la gommapiuma come bersaglio per l'onda ultrasonora, ed un leggero offset invece per le curve riguardanti l'acqua e l'olio. Per quanto riguarda la gommapiuma è possibile notare che i valori forniti dall'SRF05 si discostano di un valore che varia tra i 150 e i 200 μs rispetto ai valori dei TOFs ricavati dall'acciaio come target; negli altri due casi, invece (curva verde dell'acqua e curva blu dell'olio), lo scostamento è all'incirca di 7 - 8 μs . Il comportamento che si nota, soprattutto per la gommapiuma è giustificato dal decadimento in ampiezza del segnale di echo che ritorna alla capsula ricevente, come già detto nel capitolo precedente.

L'attenuazione del segnale è dovuta al potere assorbente del poliuretano espanso che fa in modo che la curva di soglia, essendo esponenziale, incontri il segnale in ingresso in un tempo successivo.

6.9 Confronto sensore ottico e SRF05

Un altro metodo provato per determinare il livello di un liquido all'interno di un serbatoio o all'aria aperta, è quello di usare un sensore ottico.

Date le specifiche del progetto, ovvero basso costo dell'intero sistema e sensibilità di circa 1 mm, si è cercato sul mercato un dispositivo economico, in grado di soddisfare le nostre esigenze ed avere anche un confronto con il sensore ad ultrasuoni fino a qui testato.

La scelta è ricaduta sul VL53L0X Ranging Sensor della ST Microelectronics mostrato in Figura 6.9a e Figure 6.9b. Questo dispositivo è di nuova generazione.

Tramite il laser ranging, alloggiato all'interno del modulo, rileva la misura dalla distanza attraverso il Time of Flight del fascio elettromagnetico. Secondo le prove effettuate e dai dati riportati dalla scheda tecnica la misura risulta accurata anche per diversi valori di riflettanza dei target. Il modulo VL53L0X usa un emettitore laser VCSEL da 940 nm, che risulta invisibile all'occhio umano.

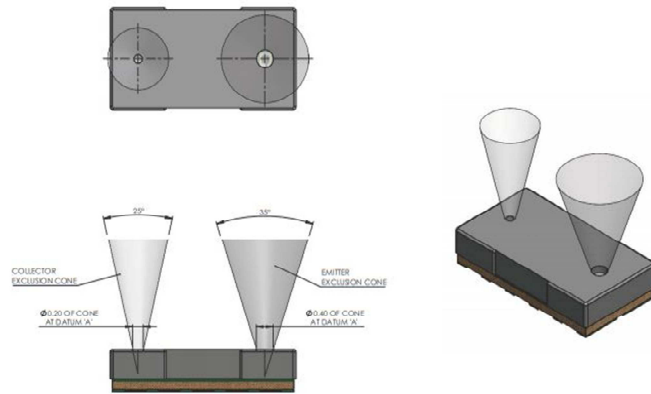


Figura 6.9a – Laser ranging (datasheet).

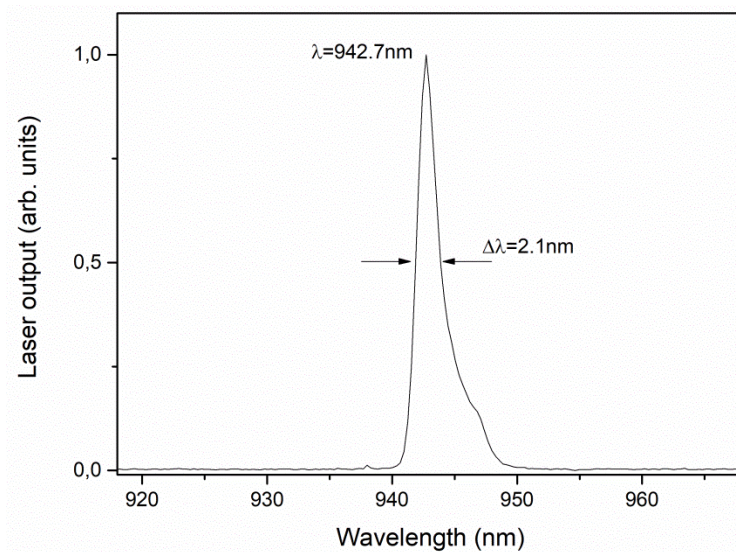


Figura 6.9b – Spettro di emissione del laser infrarosso del modulo ottico, ricavato per mezzo dello spettrofotometro del laboratorio di ottica.

Al fine di testare il sensore nel nostro dispositivo, è stato scritto un firmware in grado di leggere i dati di output e confrontarli con il sensore ad ultrasuoni.

Nel set-up di misura è stato aggiunto un nuovo supporto in plastica in grado di sorreggere il VL53L0X.

Per motivi di alloggiamento il sensore ottico è stato posto con un offset di 27 mm rispetto all'SRF05.

Le misure effettuate hanno riguardato campi di distanza sensore- target che vanno dai 134 mm ai 228 mm. Per ogni distanza sono stati catturati 205 valori in uscita che, per quanto riguarda il VL53L0X, corrispondono ad output in mm.

Inoltre, mantenendo inalterati le distanze operative, sono stati testati differenti target come fatto in precedenza con il sensore ad ultrasuoni.

I dati sotto riportati sono quelli con target costituiti da: piastra d'acciaio, superficie dell'acqua e superficie di uno strato d'olio di 5 mm emulsionato in acqua; per distanze di: 135 mm, 140 mm, 145 mm, 150 mm, 155 mm, 160 mm, 165 mm, e 170 mm.

I risultati usando l'acciaio come parete riflettente sono riportati in Figura 5.9c e nella Tabella 6.9a.

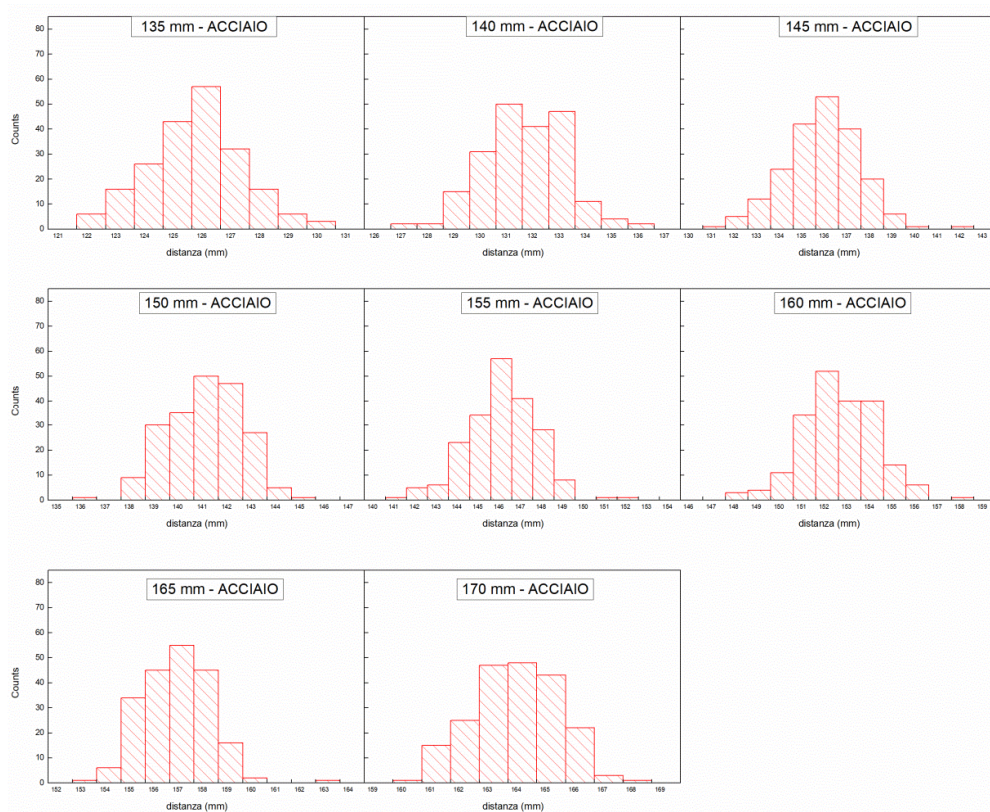


Figura 6.9c - Istogrammi per le diverse distanze con target in acciaio.

Target acciaio	Misurazioni totali	Media (mm)	Deviazione standard (mm)	Moda (mm)	Media (mm)
135 mm	205	125.64	1.65	126	126
140 mm	205	131.58	1.59	131	132
145 mm	205	135.79	1.67	136	136
150 mm	205	140.96	1.53	141	141
155 mm	205	146.04	1.67	146	146
160 mm	205	152.55	1.66	152	152
165 mm	205	156.78	1.41	157	157
170 mm	205	163.78	1.50	164	164

Tabella 6.9a - Risultati misurazioni con target in acciaio.

La media delle distanze di output risulta presentare un offset costante di circa 10 mm rispetto a quella data dalla slitta micrometrica per tutte le distanze prese in considerazione da 134 mm a 228 mm. Tale errore sistematico può essere colmato per via software.

Lo scarto quadratico medio risulta invece, essere superiore al millimetro per ogni singola distanza, anche per quelle non riportate in questa tabella.

I risultati ottenuti usando l'acqua come target sono invece mostrati negli istogrammi di Figura 6.9d e nella Tabella 6.9b.

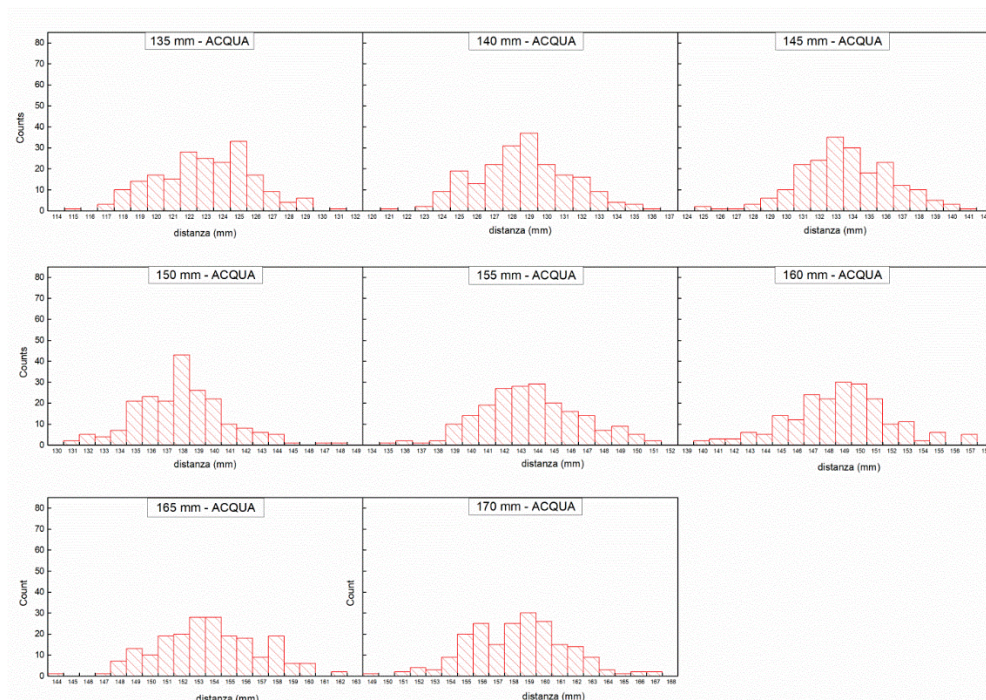


Figura 6.9d - Istogrammi per le diverse distanze con target costituito da acqua.

Target acqua	Misure totali	Media (mm)	Deviazione Standard (mm)	Moda (mm)	Mediana (mm)
135 mm	205	122.99	2.89	125	123
140 mm	205	128.66	2.71	129	129
145 mm	205	133.61	2.84	133	133
150 mm	205	137.98	2.87	138	138
155 mm	205	143.62	3.05	144	143
160 mm	205	148.74	3.31	149	149
165 mm	205	153.76	3.22	153	154
170 mm	205	158.31	3.10	159	158

Tabella 6.9a - Risultati misurazioni con target costituito da acqua.

In questa situazione è possibile notare un'offset leggermente aumentato tra la media dei dati in uscita e quelli forniti dalla slitta micrometrica. Tale valore si aggira intorno ai 12 mm.

Lo scarto quadratico medio invece aumenta più del 40% rispetto a quelli calcolati utilizzando la piastra d'acciaio. Quindi si ha una maggiore dispersione dei dati in uscita.

I grafici di Figura 6.9e e la Tabella 6.9c sono riferiti ai risultati ottenuti usando come liquido riflettente uno strato sottile d'olio.

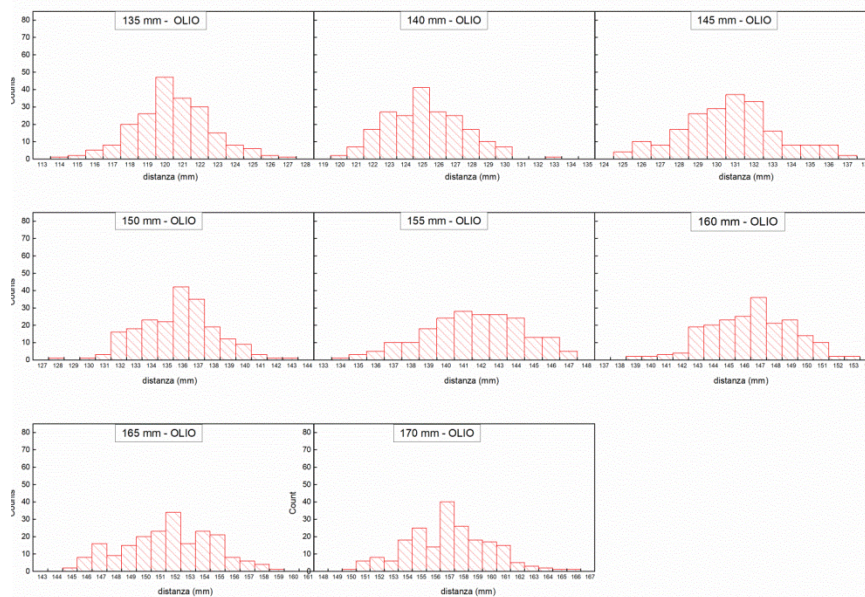


Figura 6.9e - Istogrammi per le diverse distanze con target costituito da olio.

Target olio	Misurazioni totali	Media (mm)	Deviazione Standard (mm)	Moda (mm)	Media (mm)
135 mm	206	120.46	2.20	120	120
140 mm	206	125.21	2.34	125	125
145 mm	206	130.68	2.57	131	131
150 mm	206	135.80	2.44	136	136
155 mm	206	141.57	2.81	141	142
160 mm	206	146.50	2.71	147	147
165 mm	206	151.67	3.06	152	152
170 mm	206	157.11	2.96	157	157

Tabella 6.9c - Risultati misurazioni con target costituito da olio.

Con lo strato d'olio usato come target si nota un aumento dell'offset che si aggira attorno ai 15 mm.

La variabilità della dispersione dei dati si mantiene invece allo stesso livello di quella osservata nel caso di acqua come superficie riflettente.

Il sensore ottico VL53L0X adottato in numerose applicazioni come misuratore di distanza, nonostante il prezzo di mercato inferiore all' SRF05 risulta inadatto per i nostri scopi, in quanto fornisce un errore sulla rilevazione della distanza di livello di oltre 1 mm.

Risulta invece un ottimo compromesso per applicazioni che richiedono un grado di accuratezza minore rispetto alle nostre esigenze per il suo elevato rapporto qualità/prezzo.

Capitolo 7 Particolari riguardanti il dispositivo finale

In questo capitolo vengono delineati altri aspetti su cui si è incentrato il lavoro riguardanti, prevalentemente, la realizzazione finale del dispositivo. In particolare è stato ottimizzato il disegno della boa attraverso software CAD. In seguito sono stati riportati alcuni studi preliminari compiuti per la ricerca di un possibile materiale da utilizzare come elettrodo. Infine è illustrato come è stato allestito un sistema, composto da moduli di trasmissione per la comunicazione in remoto delle informazioni fornite dal sensore.

7.1 Architettura boa

Come già descritto nell'introduzione, l'architettura della boa deve essere progettata in modo tale da potervi inserire il sistema di misurazione del livello dell'acqua e poter integrare due o più colonnine in cui vengano disposti gli elettrodi che dovranno garantire la trasmissione di corrente elettrica in acqua salata.

L'architettura iniziale riportata nel testo del brevetto è mostrata in Figura 7.1a.

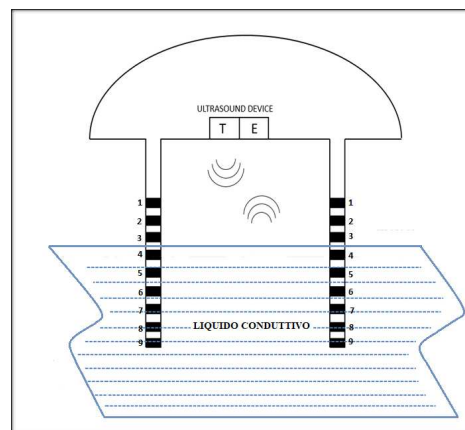


Figura 7.1a – Architettura iniziale della boa.

Nel disegno stilizzato, il sistema ad ultrasuoni è posto sotto il cappello della boa, tra due colonnine dove sono disposti gli elettrodi.

Oltre al modulo ultrasonoro, sulla parte ad esso sovrastante, dovranno trovar posto strumenti di trasmissione e ricezione dati, moduli per la localizzazione della boa e un apparato di alimentazione.

In questa tesi si è cercato anche di ottimizzare l'architettura del dispositivo finale, con l'obiettivo di semplificare la sua realizzazione da un punto di vista puramente costruttivo.

Il modello 2D di brevetto è stato migliorato ricostruendo un prototipo virtuale in 3D tramite software CATIA DASSAULTS SYSTEMES.

Di seguito sono mostrate, in Figura 7.1b, Figura 7.1c e Figura 7.1d alcune rappresentazioni di come potrebbe strutturarsi la boa.

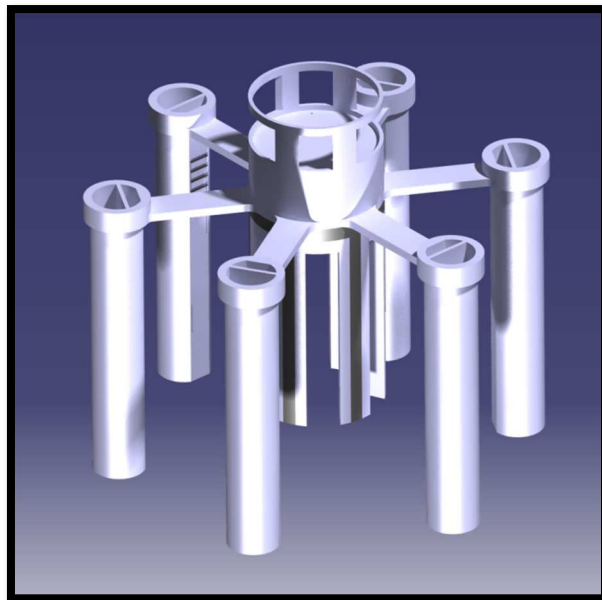


Figura 7.1b - Architettura ottimizzata della boa.

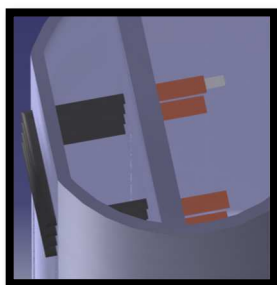


Figura 7.1c - Particolare elettrodo.

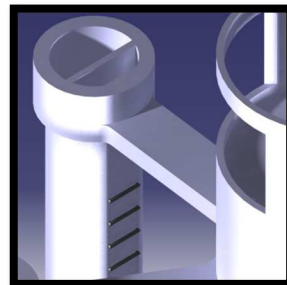


Figura 7.1d - Particolare colonnina.

In questo modello 3D sono state implementate le colonne dove verranno posizionati gli elettrodi di conduzione.

Da due colonne se ne sono aggiunte altre quattro. Le sei colonnine sono posizionate intorno all'anodo centrale realizzato in grafite, in nero nella Figura 7.1b in Catia. Tale anodo è inserito in un supporto cavo, di materiale leggero come può essere la plastica e cavo perché, all'interno di esso, agganciati nella parte superiore della struttura, troviamo posto i sensori ad ultrasuoni che devono fornire la misura del livello dell'acqua.

L'aumento del numero di colonne è giustificato da una soluzione più semplice dal punto di vista costruttivo per l'inserimento degli elettrodi.

Dal brevetto iniziale infatti, stabilita una sensibilità di misura dello spessore degli inquinanti dell'ordine del millimetro e quindi una dimensione e una distanza tra un elettrodo e l'altro uguale o inferiori al millimetro, l'inserimento di opportuni elettrodi può costituire notevoli difficoltà sia in fase di realizzazione che in quella di manutenzione.

Prendendo in considerazione non una, bensì sei colonne, vi è la possibilità di aumentare la distanza, in una stessa colonna, tra gli elettrodi di circa 6 volte. Questa soluzione consentirebbe una più facile installazione e sostituzione degli elettrodi di misura in caso di inefficienza.

Inoltre inserendo nel dispositivo finale un modulo giroscopico ed un accelerometro che consentano di calcolare l'inclinazione della boa durante la sua fluttuazione in ambiente marino ed ottimizzando l'algoritmo di misura, si potrebbe migliorare l'accuratezza nella misura. In particolare, si potrebbe determinare, dall'inclinazione

della boa, la posizione degli elettrodi rispetto al piano di interfaccia aria/acqua e inquinante/acqua.

Il prototipo 3D presenta inoltre una soluzione per cui la boa può consentire liberamente il passaggio del flusso marino o inquinante all'interno di essa grazie alla sua configurazione aperta. Il galleggiamento della struttura potrebbe essere garantito dall'applicazione di tre organi galleggianti a semiluna disposti ognuno tra una colonna e l'altra, in modo da lasciare libero il passaggio di un eventuale idrocarburo nei tre spazi tra le colonnine rimasti liberi.

7.2 Materiale per elettrodi

Uno studio preliminare ha permesso anche di individuare un possibile materiale adatto alla costruzione degli elettrodi mentre il sistema di conduzione della corrente, dovrà essere completamente isolato dall'acqua.

Molti dispositivi e strumenti in uso in ambiente marino utilizzano il Titanio Attivato per la sua resistenza alla corrosione marina[90].

In questa tesi sono riportate delle misure eseguite per mezzo del microscopio a scansione elettronica (SEM) che caratterizzano un filamento di tale materiale di forma cilindrica con raggio di base del valore di 1 mm.

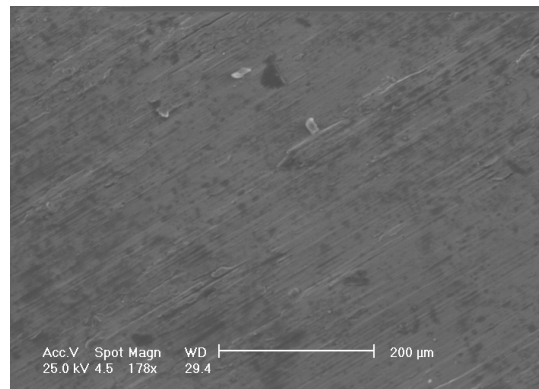


Figura 7.2a - Sezione filo in Titanio Attivato.

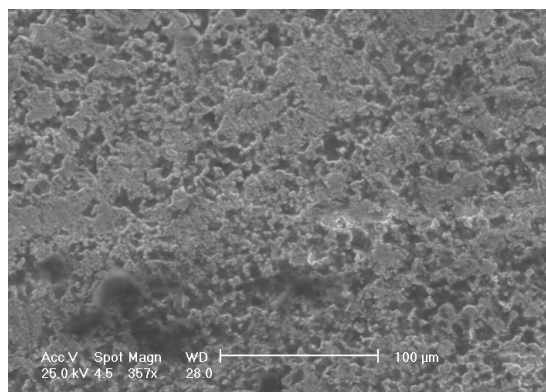


Figura 7.2b - Superficie filo in Titanio Attivato.

Tali fili di titanio Attivato sono facilmente reperibili sul mercato. Questo materiale come evidenziato dalle microanalisi condotte al SEM e riportate in Figura 7.2c e Figura 7.2d, presenta un cuore di Titanio puro protetto da uno strato scuro composto da ossido di Iridio e ossido di Tantalio.

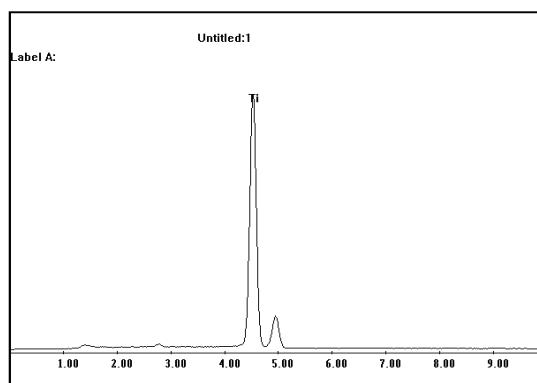


Figura 7.2c - Microanalisi sezione elettrodo.

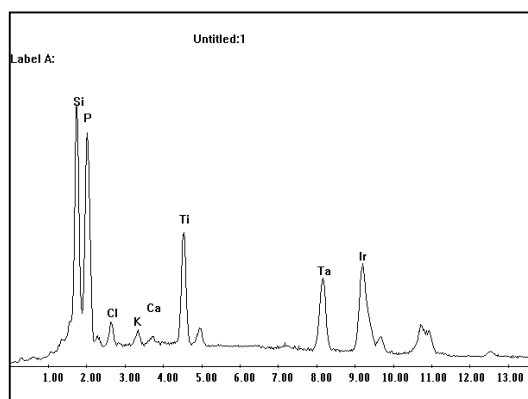


Figura 7.2d - Microanalisi superficie elettrodo.

7.3 Modulo di ricezione/trasmissione e localizzazione

Per la comunicazione tra sensore e stazione base e per la gestione dei dati forniti dal dispositivo finale, è stato sviluppato un sistema di trasmissione e ricezione attraverso moduli e componenti reperibili sul mercato. La figura 7.3a e la Figura 7.3b mostrano rispettivamente il modulo di trasmissione e il modulo di ricezione.



Figura 7.3a - Modulo di trasmissione.

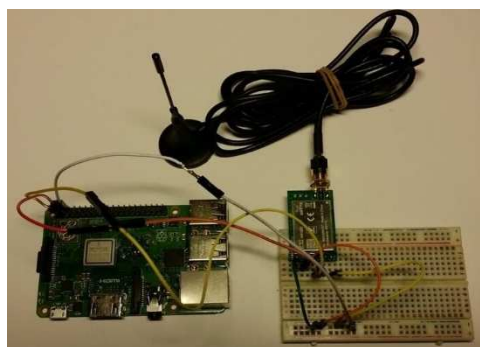


Figura 7.3b - Modulo di ricezione.

I componenti utilizzati sono:

- modulo di trasmissione e ricezione RF wireless a 868 MHz; esso adotta la tecnologia LoRa spread-spectrum, è in grado di correggere attivamente i pacchetti di dati interferiti in funzione della distanza di comunicazione, che come riportato dal datasheet risulta essere all'incirca di 3 Km e garantisce una potenza di trasmissione di 1000 mW che corrisponde a 20 dB di potenza irradiata;
- 2 antenne con frequenza di lavoro nell'intorno di 868 MHz e guadagno di 3 dB;
- scheda di gestione per segnali in entrata, Raspberry Pi modello B+, in cui è stato caricato il programma trascritto in Python e php, in grado di poter interfacciare l'utente, o il tecnico, con il sensore finale;
- modulo di localizzazione GPS XSOURCE NEO-6M.

In figura 7.3c è riportato lo schema a blocchi dell'intero sistema.

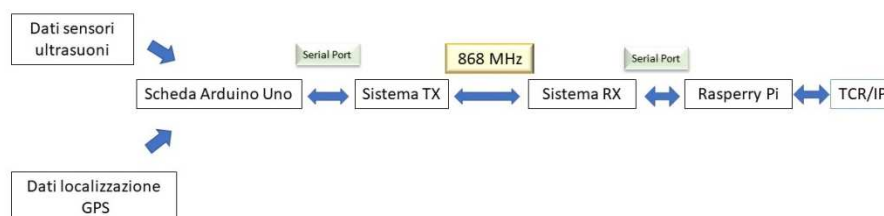


Figura 7.3c - Schema a blocchi sistema TX/RX.

I dati raccolti dal microcontrollore Arduino Uno, riguardano i dati analogici e digitali in uscita dal sistema di misurazione del livello del liquido in mare e dal modulo di localizzazione GPS; una volta elaborati vengono trasmessi tramite modulo wireless nella banda ISM (Industrial Scientific and Medical) a 868 MHz. La fase di ricezione viene gestita dallo stesso modello di trasmettitore e il Rasperry provvede ad elaborare i dati in modo intelligibile attraverso un browser Web.

Il sistema di trasmissione, pensato in modo da avere un'alta affidabilità e un modesto consumo elettrico, effettua l'incapsulamento dei dati tramite specifico algoritmo e li invia.

Il sistema di ricezione recupera i dati trasmessi tramite il modulo radio e attraverso un programma elaborato in Python [Appendice], gestisce il canale, verifica la correttezza e l'integrità dei pacchetti ricevuti ed in seguito li elabora per archivarli tramite un file json.

Successivamente un secondo programma in php, codice di linguaggio adatto per comunicazioni via Web, recupera l'ultima versione dei dati e li unisce alle mappe di Google, creando un'interfaccia di facile interpretazione per l'utente finale, mostrata in figura 7.3d.

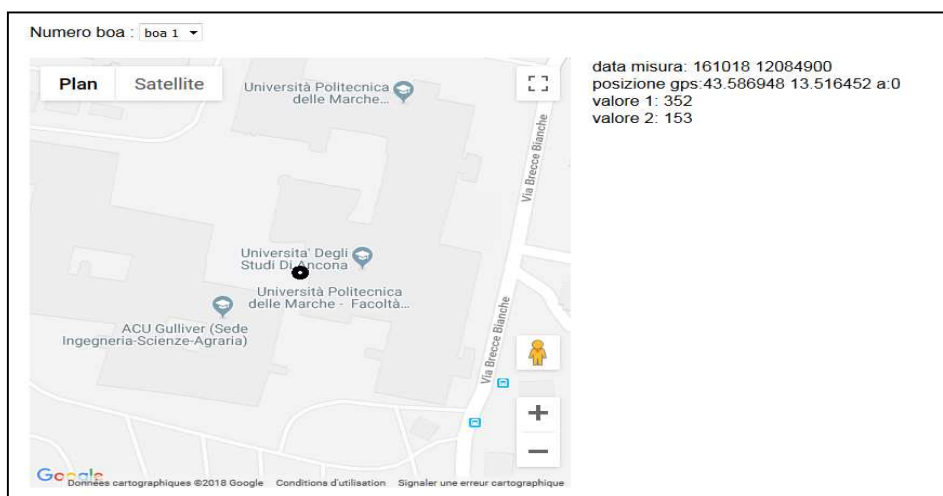


Figura 7.3d - Interfaccia di comunicazione. Con il simbolo anulare nero è rappresentato il punto dove è posta la boa, in questo caso il piazzale dell'Università politecnica della Marche, ed in alto a destra le coordinate di latitudine e longitudine, i valori forniti dal sensore ad ultrasuoni e l'orario.

I dispositivi radio e le bande di frequenza utilizzate sono state scelte in base a due specifiche: numero ristretto di dati, quindi bassa potenza disponibile e distanza elevata di comunicazione.

La banda di frequenza è stata adottata per la sua affidabilità, il suo largo impiego nei sistemi di comunicazione e la sua libertà da vincoli di licenza radio.

La Figura 7.3e, mostra, nella parte superiore, lo spettro di trasmissione, centrato sulla frequenza di lavoro, mentre nella parte inferiore l'intervallo di tempo della durata della trasmissione del pacchetto dato.

In figura 7.3f, è riportata invece la misura del coefficiente di riflessione ($|S_{11}|$) dell'antenna utilizzata, eseguita presso il laboratorio del Dipartimento di Informatica e elettronica.

Dalle misure si evince che l'antenna è perfettamente adattata alla banda di frequenza scelta.

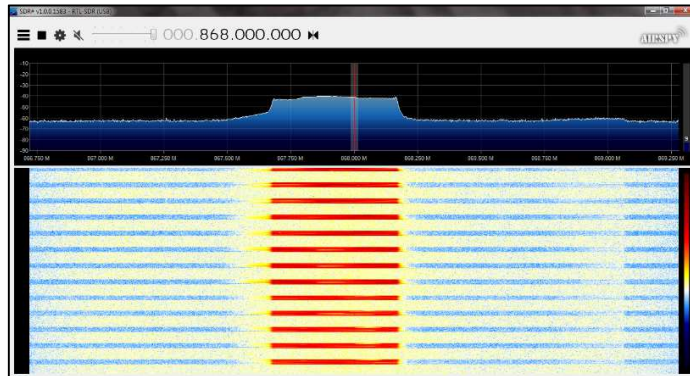


Figura 7.3e - Spettro di trasmissione.

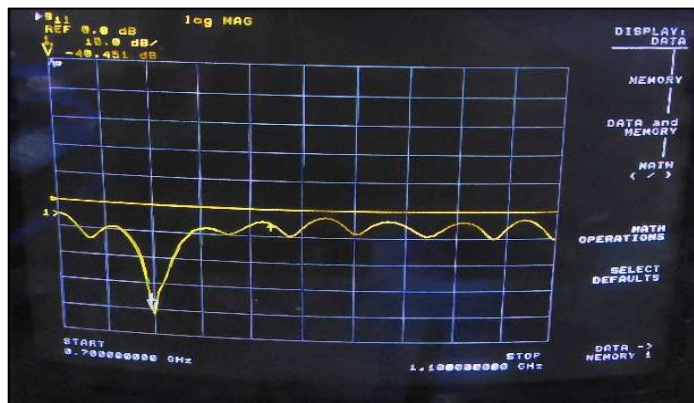


Figura 7.3f - Misura coefficiente di riflessione.

Conclusioni

Il lavoro di Dottorato si è concentrato, principalmente, sulla caratterizzazione e sulla realizzazione di un sistema per la misurazione della posizione del livello del mare attraverso un sensore ad ultrasuoni, l'SRF05. L'intero dispositivo è gestito da un microprocessore ATmega328p della scheda Arduino. La scelta dei componenti e dei sensori è stata effettuata con la prospettiva di mantenere un basso costo di realizzazione e di manutenzione ed una sensibilità nell'individuazione del pelo libero dell'acqua dell'ordine di un millimetro.

Le principali conclusioni possono essere espresse come segue:

- La caratterizzazione del sensore SRF05 ha permesso di evidenziare anomalie impreviste nei valori forniti del Time of Flight dell'onda ultrasonica (TOFs). Tali effetti, chiamati in questa tesi Jitter Time, rendono l'errore nella misura della distanza di un oggetto e/o di una superficie posta perpendicolarmente alla sonda dell'ordine del centimetro. Infatti, a certe distanze, i valori dei tempi di volo si discostano da una regolare distribuzione media di 25 μs per arrivare anche a 33 μs .
- L'anomalia del jitter time si traduce nella rilevazione di un tempo di percorrenza del segnale ultrasonico più breve (valore di distanza errato). La ragione di tale anomalia è stata individuata in un'errata intersezione tra il segnale di echo e la curva esponenziale di threshold.
- La caratterizzazione dell'SRF05 ha permesso di studiare il comportamento dell'onda ultrasonica di 40 kHz in funzione del materiale usato come target (variazione densità, modulo di elasticità e/o compressibilità e coefficienti di riflessione). Per prefissate distanze, leggeri ritardi sui TOFs (all'incirca 7 μs) si riscontrano quando si utilizzano come target superfici liquide (acqua e/o olio) rispetto a materiali solidi, come acciaio, legno (MDF), vetro ecc. Mentre differenze di TOFs maggiori (tra i 150 μs e i 200 μs) si riscontrano rispetto ad un target in acciaio quando si usa, per le stesse distanze, il poliuretano espanso (gommapiuma) come superficie riflettente.

- I test effettuati in camera climatica mostrano un'evidente variazione dei tempi di volo per cambiamenti di temperatura da 5°C a 45°C, mentre non si riscontrano sensibili cambiamenti legati a variazioni di umidità relativa tra il 30% e il 60%.
- Una ricostruzione matematica del segnale di echo ha permesso di verificare che attraverso una demodulazione AM o tramite il metodo della trasformata di Hilbert, vi è la possibilità di aumentare l'accuratezza di misura del sistema eliminando l'anomalia del jitter time, ma questo comporta la necessità di implementare il dispositivo con ulteriori moduli (DSP), aumentando costi e complessità.

A seguito delle osservazioni sopra riportate, si è concluso che il prototipo finale debba prevedere l'uso contemporaneo di tre sensori ad ultrasuoni SRF05. In dettaglio, la misura della velocità del suono nelle specifiche condizioni di utilizzo del dispositivo (abbiamo visto come dipenda dalla temperatura dell'aria e come sia difficile da stimare per via teorica), costringe l'installazione di un SRF05 posto ad una distanza fissa da un target in acciaio (materiale maggiormente studiato in questa tesi). La sistematica comparsa dell'anomalia del jitter time può essere risolta dotando il dispositivo di due sensori ad ultrasuoni SRF05 (identici), installati a diversa altezza e entrambi usati per misurare la posizione del pelo libero del fluido. L'aumento inevitabile dei costi legato alla presenza di tre sensori invece che uno non pregiudica comunque la finalità del progetto.

L'algoritmo di misura, gestito dal microprocessore della scheda ArduinoUno, è stato ottimizzato sia per avere una misura affidabile di livello fornito dai tre sensori SRF05, sia per comandare i moduli di trasmissione dati e di localizzazione (GPS).

Gli ulteriori sviluppi dovrebbero riguardare le istruzioni per la gestione degli elettrodi, compreso uno studio sistematico della conducibilità elettrica attraverso fluidi inquinanti e non, solo in parte affrontato in questo periodo di Dottorato e non riportato in questa tesi. Inoltre, è necessaria un'ulteriore ottimizzazione della configurazione dell'intero dispositivo (integrazione di giroscopi, accelerometri ecc.) che parta dal prototipo virtuale descritto nel Capitolo 7.

Bibliografia

- [1] ITOPF, “Leadership, Command & Management of Marine Oil Spills,” *Tech. Inf. Pap.*, vol. 10, p. London:ITOPF, 2012.
- [2] ITPOF, “TIP 02: Fate of Marine Oil Spills.,” *ITPOF Tech. Inf. Pap.*, 2011.
- [3] ITOPF, “Effects of Oil Pollution on the Marine Environment,” *Tech. Inf. Pap.*, vol. 13, 2013.
- [4] ITOPF, “Effects of oil pollution on fisheries and mariculture,” *Tech. Inf. Pap.* pp. 2–11, 2011.
- [5] D. S. Miguel Patel, N.Cariglia, P. Marchand, J.Brandt, “Environmental damage: changing perceptions and future outlook,” *ITOPF*, 2018.
- [6] G. of I. An Autonomous Body under the Ministry of Earth Sciences, “ESSO - Indian National Centre for Ocean Information Services.” [Online]. Available: <http://www.incois.gov.in/portal/index.jsp>.
- [7] Y. Han, I. M. Nambi, and T. Prabhakar Clement, “Environmental impacts of the Chennai oil spill accident – A case study,” *Sci. Total Environ.*, vol. 626, pp. 795–806, Jun. 2018.
- [8] A. Konstantinidis, “Greek oil spill spreads to Athens Riviera.” [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us>.
- [9] G. Mullany (The N. Y. T), “Huge Oil Spill Spreads in East China Sea, Stirring Environmental Fears Image.” [Online]. Available: <https://www.nytimes.com>.
- [10] D.Etkin, “Presented at: Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar (June 2000),” *Arctic*, no. June, 2000.
- [11] ITOPF, “TIP 12: Effects of oil pollution on social and economic activities ” *Tech. Inf. Pap.*
- [12] ITOPF, “Contingency Planning for Marine Oil Spills,” *Tech. Inf. Pap.*, no. 16, p. 12, 2011.
- [13] S. Vogel, "*Life in moving fluids : the physical biology of flow*". Princeton University Press, 1994.
- [14] L. Chernyak, S. Boychenko, L. Fedorovich, V. Novikova, R. Prentkovskienė, and S. Pukalskas, “Dependence of Evaporation Losses on Petrol Quality,” *Transport*, vol. 25, no. 4, pp. 442–447, 2010.
- [15] A. Badia and E. Bures, “A Citizen Monitor ’ s Guide to Hydrocarbons,” vol. 4, pp. 1–14, 2010.
- [16] S. Di Muccio, G. Rak, P. Giordano, M. Mannozi, V. Sammarini, and L. Alcaro, “Sversamento di idrocarburi in mare: stima delle conseguenze ambientali e valutazione delle tipologie d’intervento,” in *Quaderni delle emergenze ambientali in mare*, 2014.
- [17] K. Grüner, R. Reuter, and H. Smid, “A new sensor system for airborne

- measurements of maritime pollution and of hydrographic parameters,” *GeoJournal*, vol. 24, no. 1, pp. 103–117, 1991.
- [18] A. Wadsworth, W. J. Looyen, R. Reuter, and M. Petit, “Aircraft experiments with visible and infrared sensors,” *Int. J. Remote Sens.*, 1992.
- [19] D. Wang, D. Pan, Y. Zhan, and Q. Zhu, “Experiment of monitoring oil spill on the base of EOS/MODIS data,” *SPIE – Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 7831, p. 78311T, 2010.
- [20] M. Fingas and C. Brown, “Review of oil spill remote sensing,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 83, no. 1, pp. 9–23, Jun. 2014.
- [21] H.-Y. Shen, P.-C. Zhou, S.-R. Feng, S. Hui-yan, Z. Pu-cheng, and F. Shao-ru, “Research on multi-angle near infrared spectral-polarimetric characteristic for polluted water by spilled oil,” in *Proceedings of the SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2011.
- [22] C. González, S. Sánchez, A. Paz, J. Resano, D. Mozos, and A. Plaza, “Use of FPGA or GPU-based architectures for remotely sensed hyperspectral image processing,” *Integration*, vol. 46, no. 2, pp. 89–103, Mar. 2013.
- [23] G. Bitelli, “Uso di immagini iperspettrali hyperion nell’analisi di acque lacustri,” 2009.
- [24] M. N. Jha, J. Levy, and Y. Gao, “Advances in remote sensing for oil spill disaster management: State-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance,” *Sensors*, vol. 8, no. 1, pp. 236–255, 2008.
- [25] J. W. Salisbury, D. M. D’Aria, and F. F. Sabins, “Thermal infrared remote sensing of crude oil slicks,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 225–231, Aug. 1993.
- [26] M. Fingas, C. E. Brown, “Review of oil spill remote sensing,” *Spill Sci. Technol. Bull.*, vol. 4, no. 4, pp. 199–208, 1997.
- [27] M. Fingas and C. E. Brown, “Oil Spill Remote Sensing: A Review,” in *Oil Spill Science and Technology*, Elsevier, 2011, pp. 111–169.
- [28] M. Gade, H. Hühnerfuss, and G. M. Korenowski, “Marine surface films: Chemical characteristics, influence on air-sea interactions and remote sensing,” *Mar. Surf. Film. Chem. Charact. Influ. Air-Sea Interact. Remote Sens.*, no. November 2015, pp. 1–341, 2006.
- [29] C. E. Brown, M. F. Fingas, “Development of airborne oil thickness measurements,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 47, no. 9–12, pp. 485–492, Sep. 2003.
- [30] I. Leifer *et al.*, “State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the Deepwater Horizon oil spill,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 124, pp. 185–209, 2012.
- [31] B. Minchew, C. E. Jones, and B. Holt, “Polarimetric analysis of backscatter from the deepwater horizon oil spill using l-band synthetic aperture radar,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 10 PART1, pp. 3812–3830,

- 2012.
- [32] T. Ulaby, R. K. Moore and A. K. Fung., "A review of: 'Microwave Remote Sensing—Active and Passive'." *Int. J. Remote Sens.*, vol. 5, no. 2, p. 463, 1984.
- [33] C. E. Brown, "Laser Fluorosensors," in *Oil Spill Science and Technology*, Elsevier, 2011, pp. 171–184.
- [34] F. E. Hoge, "Oil film thickness measurement using airborne laser-induced water Raman backscatter," *Appl. Opt.*, 1980.
- [35] R. O'Neil, "3.3 Field Performance of a Laser Fluorosensor for the Detection of Oil Spills," *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979.
- [36] G. Barucca, P. Mengucci, and E. Tiberi, "International PATENT N. WO 2015/079471 A1." .
- [37] G. Barucca, P. Mengucci, and E. Tiberi, "Italian PATENT N.0001420869."
- [38]. J. David N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, vol. 34, no. 11. 2016.
- [39] Y. S. Huang, Y. P. Huang, K. N. Huang, and M. S. Young, "An accurate air temperature measurement system based on an envelope pulsed ultrasonic time-of-flight technique," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 78, no. 11, 2007.
- [40] K. N. Mozie, "Characterization of Ultrasonic Waves in Various Drilling Fluids," FMH606 Master's Thesis 2017.
- [41] G. S. K. Wong and T. F. W. Embleton, "Variation of the speed of sound in air with humidity and temperature," *JASA*, vol. 77, no. 5, pp. 1710–1712, 1985.
- [42] M. E. Pedinoff, "Absorption of ultrasonic waves in pure methylcyclohexane," *J. Chem. Phys.*, vol. 36, no. 3, pp. 777–783, 1962.
- [43] L. Colombo and S. Giordano, *Introduzione alla teoria della elasticità - Meccanica dei solidi continui in regime lineare elastico*. 2007.
- [44] S. W. Rienstra, A. Hirschberg, "An Introduction to Acoustics", 2014.
- [45] H. Georgi, "The physics of waves". 2015.
- [46] R. Di Francesco, "Introduzione alla meccanica del continuo". 2012.
- [47] T. Dahl, J. L. Ealo, H. J. Bang, S. Holm, and P. Khuri-Yakub, "Applications of airborne ultrasound in human-computer interaction," *Ultrasonics*, vol. 54, no. 7, pp. 1912–1921, 2014.
- [48] S. Lenci, "Lezioni di Meccanica Strutturale". 2004.
- [49] P. Mazzoldi - M. Nigro - C. Voci, "Elementi di Fisica Vol. 2 - Elettromagnetismo e Onde". 2008.
- [50] D. a Bohn, "Environmental effects on the speed of sound," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 36, no. 4, pp. 223–231, 1988.
- [51] T. Leighton, "What is ultrasound?," *Ultrasound Int.*, vol. 3, no. 2, pp. 109–111, 2006.
- [52] D. Scullino, "Applicazione degli ultrasuoni". 2008.

- [53] T. J. Licznarski, J. Jaroński, and D. Kosz, "Ultrasonic system for accurate distance measurement in the air," *Ultrasonics*, vol. 51, no. 8, pp. 960–965, 2011.
- [54] J. Majchrzak, M. Michalski, and G. Wiczyński, "Distance Estimation With a Long-Range Ultrasonic Sensor System," *IEEE Sens. J.*, vol. 9, no. 7, pp. 767–773, 2009.
- [55] J. Park, Y. Je, H. Lee, and W. Moon, "Design of an ultrasonic sensor for measuring distance and detecting obstacles," *Ultrasonics*, vol. 50, no. 3, pp. 340–346, 2010.
- [56] S. Noykov and C. Roumenin, "Calibration and interface of a polaroid ultrasonic sensor for mobile robots," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 135, no. 1, pp. 169–178, 2007.
- [57] A. . Marioli, D.; Narduzzi, C.; Offelli, C.; Petri, D.; Sardini, E.; Taroni, "Digital time of flight measurement for ultrasonic sensors," *Instrum. Meas. Technol. Conf.*, vol. 41, no. 2, pp. 198–201, 1991.
- [58] D. Marioli, E. Sardini, and A. Taroni, "Ultrasonic Distance Measurement for Linear and Angular Position Control," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 37, no. 4, pp. 578–581, 1988.
- [59] A. Carullo, M. Parvis, and S. Member, "An Ultrasonic Sensor for Distance Measurement in," *IEEE Sens. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 143–147, 2001.
- [60] A. K. Shrivastava, A. Verma, and S. P. Singh, "Shrivastava, Verma, Singh - Distance Measurement of an Object or Obstacle by Ultrasound Sensors using P89C51RD2 - 2010," *Int. J. Comput. Theory Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 2–6, 2010.
- [61] M. Suleiman, G.I. Saidu, M. I. Ilyasu, et al., "Ultrasonic Fluid Level Measuring Device," *IJRDET*, vol. 4, no. 1, pp. 2347–6435, 2015.
- [62] D. K. Fisher and R. Sui, "An inexpensive open-source ultrasonic sensing system for monitoring liquid levels," *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 15, no. 4, pp. 328–334, 2013.
- [63] F. Bandini, J. Jakobsen, D. Olesen, J. A. Reyna-Gutierrez, and P. Bauer-Gottwein, "Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles," *J. Hydrol.*, vol. 548, pp. 237–250, 2017.
- [64] J. E. Browne, "A review of Doppler ultrasound quality assurance protocols and test devices," *Phys. Medica*, vol. 30, no. 7, pp. 742–751, 2014.
- [65] A. Genc, M. Ryk, M. Suwała, T. Żurakowska, and W. Kosiak, "Ultrasound imaging in the general practitioner's office – a literature review," *J. Ultrason.*, vol. 16, no. 64, pp. 78–86, 2016.
- [66] P. C. May, M. R. Bailey, and J. D. Harper, "Ultrasonic propulsion of kidney stones," *Curr. Opin. Urol.*, vol. 26, no. 3, pp. 264–270, 2016.
- [67] J. D. Harper *et al.*, "Preclinical safety and effectiveness studies of ultrasonic propulsion of kidney stones," *Urology*, vol. 84, no. 2, pp. 484–489, 2014.

- [68] S. A. L. Glegg, M. P. Olivieri, R. K. Coulson, and S. M. Smith, "A passive sonar system based on an autonomous underwater vehicle," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 700–710, 2001.
- [69] D. Ciunzo, P. K. Willett, and Y. Bar-Shalom, "Tracking the tracker from its passive sonar ML-PDA estimates," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 1, pp. 573–590, 2014.
- [70] G. C. Carter, "Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing," *IEEE Trans. Acoust.*, vol. 29, no. 3, pp. 463–470, 1981.
- [71] J. Liang, L. Xu, J. Li, and P. Stoica, "On designing the transmission and reception of multistatic continuous active sonar systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 1, pp. 285–299, 2014.
- [72] A. D'Amico and R. Pittenger, "A brief history of active sonar," *Aquat. Mamm.*, vol. 35, no. 4, pp. 426–434, 2009.
- [73] R. Yang, Y. Bar Shalom, C. Jauffret, A.-C. Pérez, and G. Wah NG, "Maneuvering Target Tracking Using Continuous Wave Bistatic Sonar with Propagation Delay," *JAIF*, vol. 13, no. 1, 2018.
- [74] I. Sillitoe, M. Lundin, S. Caselli, and D. Ferraro, "Experiments in Robust Bistatic Sonar Object Classification for Local Environment Mapping," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 2147–2152, 2001.
- [75] V. Anmarkrud and K. Thomas, "Modelling multistatic sonar performance," *Proc. 36th Scand. Symp. Phys. Acoust. 2-5 Febr*, no. February, 2014.
- [76] J. Sindt, P. a M. De Theije, and V. Cedex, "Target Localisation with Multistatic Systems," *Proc. Seventh Eur. Conf. Underw. Acoust. ECUA*, pp. 1–10, 2004.
- [77] A. Song, M. Badiy, H. C. Song, and W. S. Hodgkiss, "Impact of source depth on coherent underwater acoustic communications," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no. 2, pp. 555–558, 2010.
- [78] M. Wang, Y. Lei, and Y. Zhou, "High-intensity focused ultrasound (HIFU) ablation by the frequency chirps: Enhanced thermal field and cavitation at the focus," *Ultrasonics*, vol. 91, no. August, pp. 134–149, 2018.
- [79] L. C. Lynnworth, "*Ultrasonic Measurements for Process Control*," 1989.
- [80] W. B. Guo, "Ultrasonic Soldering Aluminum at Low Temperature," *Weld. J.*, vol. 94, no. 6, 2015.
- [81] "SRF05 Ultra-Sonic Ranger Technical Documentation," 2014.
- [82] "Air Ultrasonic Ceramic Transducers 400ST/R160."
- [83] UTS SERIES NEWPORT, "High-Performance Precision Translation Stages." pp. 1–35, 2014.
- [84] Delta Ohm, Hygro-thermometers Technical Documentation.
- [85] "HC-SR05/HY-SRF05 Precision Ultrasonic Sensor Technical Documentation."
- [86] ST, "VI53L0X Datasheet," 2017.

- [87] M. Parrilla, J. J. Anaya, and C. Fritsch, "Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 40, no. 4, pp. 759–763, 1991.
- [88] A. Grennberg and M. Sandell, "Estimation of Subsample Time Delay Differences in Narrowband Ultrasonic Echoes Using the Hilbert Transform Correlation," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 41, no. 5, pp. 588–595, 1994.
- [89] B. Audoin and J. Roux, "An innovative application of the Hilbert transform to time delay estimation of overlapped ultrasonic echoes," *Ultrasonics*, vol. 34, no. 1, pp. 25–33, 1996.
- [90] P. Castro, A. A. Sagüés, E. I. Moreno, L. Maldonado, and J. Genescá, "Characterization of Activated Titanium Solid Reference Electrodes for Corrosion Testing of Steel in Concrete," *Corrosion*, vol. 52, no. 8, pp. 609–617, 1996.

APPENDICE

Codice per gestione sensori ad ultrasuoni (C++).

```
#define TEMP_MAX_ECO 35000
#define MISURE_AL_SECONDO 20

const int numReadA = 100;
int readA[numReadA];
int arrayIndexA = 0;
float tA = 0;
unsigned long avervelA = 0;
const int numReadB = 100;
int readB[numReadB];
int arrayIndexB = 0;
float tB = 0;
float averdB = 0;
const int numReadC = 100;
int readC[numReadB];
int arrayIndexC = 0;
float tC = 0;
float averdC = 0;
int echA = 6;
int triA = 7;
int echB = 5;
int triB = 9;
int echC = 4;
int triC = 3;
float pulseTimeA = 0;
float velA = 0;
float flex = 0;
float pulseTimeB = 0;
float diB = 0;
float diC = 0;
int gradi = 0;
float real = 0;
float pulseTimeC = 0;
int pot = 0;
int value = 0;

unsigned long Timestamp;
int TempoMaxAttesaEcho= TEMP_MAX_ECO
int TempoRipetizioneCiclo= flex/MISURE_AL_SECONDO

void setup() {

    pinMode(triA, OUTPUT);
    pinMode(echA, INPUT);
    pinMode(triB, OUTPUT);
    pinMode(echB, INPUT);
    pinMode(triC, OUTPUT);
    pinMode(echC, INPUT);
    for (int tRead = 0; tRead < numReadA; tRead++) {
        readA[tRead] = 0; }
```

```

        for (int tRead = 0; tRead < numReadB; tRead++) {
            readB[tRead] = 0;
            for (int tRead = 0; tRead < numReadC; tRead++) {
                readC[tRead] = 0;
            }

            Serial.println("Inizio nuova acquisizione")
            Serial.begin(115200);
        }

void loop() {
    digitalWrite(triA, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(triA, LOW);
    delayMicroseconds(10);
    pulseTimeA = pulseIn(echA, HIGH);
    Timestamp = millis()
    vela = ((flex / pulseTimeA)*2);
    totA = tA - readA[arrayIndexA];
    readA[arrayIndexA] = pulseTimeA;
    totA = tA + readA[arrayIndexA];
    arrayIndexA = arrayIndexA + 1;

    if (arrayIndexA >= numReadA){
        arrayIndexA = 0;
    };

    avervelA = (tA/numReadA);
    delay(100);

    digitalWrite(triB, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(triB, LOW);
    pulseTimeB = pulseIn(echB, HIGH);
    diB = (pulseTimeB * vela * 0.0005);
    tB = tB - readB[arrayIndexB];
    readB[arrayIndexB] = pulseTimeB;
    tB = tB + readB[arrayIndexB];
    arrayIndexB = arrayIndexB + 1;

    if (arrayIndexB >= numReadB) {
        arrayIndexB = 0;
    };

    gradi = (((5*aververA*aververA*0.029)/(7*8.31451))- 273.15);
    avdB = (tB / numReadB);
    real = avDistB - 6;
    pulseTimeC = pulseIn(echC,HIGH);
    diC = (pulseTimeC * vela * 0.0005)
    tC = tC - readC[arrayIndexC];
    readC[arrayIndexC] = pulseTimeC;
    tC = tC + readC[arrayIndexC];
    arrayIndexC = arrayIndexC + 1;

    if (arrayIndexC >= numReadC) {
        arrayIndexB = 0;
    }
    avdC= (tC/numReadC);

```

```
dBdC= avdC - avdB;
value = analogRead(potPin)
Serial.print("sA = ");
Serial.println(velA,DEC);
Serial.print ("tA ");
Serial.print (pulseTimeA);
Serial.println();
Serial.print ("grA = ");
Serial.print (gradi);
Serial.print (" sB = ");
Serial.println(real, DEC);
Serial.print ("t.B ");
Serial.print (diB);
Serial.print ("t.C");
Serial.println (diC);

delay (TempoRipetizioneCiclo);

}
```

Codice per misure in laboratorio (C++).

```
#define TEMP_MAX_ECO 35000
#define MISURE_AL_SECONDO 20

int echo = 6;
int trig = 7;

float pulseTime = 0;
float distance= 0;
float vel=0;
unsigned long Timestamp;
int TempoMaxAttesaEcho= TEMP_MAX_ECO;
int TempoRipetizioneCiclo= 1000/MISURE_AL_SECONDO;

int outPin = 2;
int outPinN = 7;

void setup(){
    pinMode (trig,OUTPUT);
    pinMode (echo,INPUT);

    Serial.begin(115200);
    pinMode(outPin, OUTPUT);
    pinMode(outPinN, OUTPUT);
    digitalWrite(outPin, LOW);
    digitalWrite(outPinN, HIGH);
    Serial.println("Inizio nuova acquisizione");
}

void loop() {

    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trig,HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite (trig,LOW);
    pulseTime= pulseIn(echo,HIGH,TempoMaxAttesaEcho);
    Timestamp=millis();
    Serial.print(Timestamp);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(pulseTime);
    Serial.println(" ; ");

    delay(TempoRipetizioneCiclo);
}
}
```


Codice per localizzazione dispositivo (C++).

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPS.h>

SoftwareSerial serial1(10, 11);
TinyGPS gps1;

void setup() {
    serial1.begin(9600);
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    bool flag = false;

    while (serial1.available()) {
        char cIn = serial1.read();
        Serial.print(cIn);
    }

    if (flag) {
        long lat, lng;
        unsigned long idadeInfo;
        gps1.get_position(&lat, &lng, &idadeInfo);

        if (lat != TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE) {
            Serial.print("lat: ");
            Serial.println(float(lat) / 100000, 6);
        }

        if (lng != TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE) {
            Serial.print("lng: ");
            Serial.println(float(lng) / 100000, 6);
        }

        if (idadeInfo != TinyGPS::GPS_INVALID_AGE) {
            Serial.print("info (ms): ");
            Serial.println(idadeInfo);
        }

        int anno;
        byte mes, giorno, ora, minuto, sec, cent;
        gps1.crack_datetime(&anno, &mes, &giorno,
            &ora, &minuto, &sec, &cent, &idadeInfo);

        Serial.print("Data (GMT): ");
        Serial.print(giorno);
        Serial.print("/");
        Serial.print(mes);
        Serial.print("/");
        Serial.println(anno);

        Serial.print("ora (GMT): ");
        Serial.print(ora);
        Serial.print(":");
    }
}
```

```

Serial.print(minuto);
Serial.print(":");
Serial.print(sec);
Serial.print(":");
Serial.println(cent);

float ant;
ant = gpsl.f_altitude();

if ((ant != TinyGPS::GPS_INVALID_ALTITUDE) &&
    (ant != 1000000)) {
    Serial.print("alt (cm): ");
    Serial.println(ant);
}

unsigned long sat;
sat = gpsl.course();
Serial.print("sat: ");
Serial.println(float(sat) / 100, 2);

unsigned long pre;
sat = gpsl.satellites();
pre = gpsl.hdop();

if (sat != TinyGPS::GPS_INVALID_SATELLITES) {
    Serial.print("sat: ");
    Serial.println(sat);
}

if (pre != TinyGPS::GPS_INVALID_HDOP) {
    Serial.print("pre (cents de sec): ");
    Serial.println(pre);
}
}

```

Codice per sensore ottico (C++).

```
int echo = 6;
int trig = 7;
float pulseTime = 0;
float distance = 0;
float vel = 0;
int time;
int outPin = 2;
int outPinN = 7;

#include <Wire.h>
#include <VL53L0X.h>

VL53L0X sensor;

void setup(){

    pinMode (trig,OUTPUT);
    pinMode (echo,INPUT);

    Serial.begin(9600);
    pinMode(outPin, OUTPUT);
    pinMode(outPinN, OUTPUT);
    digitalWrite(outPin, LOW);
    digitalWrite(outPinN, HIGH);

    Wire.begin();

    sensor.init();
    sensor.setTimeout(500);

};

void loop() {

    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trig,HIGH);
    delayMicroseconds(10);

    digitalWrite (trig,LOW);

    pulseTime= pulseIn(echo,HIGH);

    Serial.print(pulseTime);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(sensor.readRangeSingleMillimeters());
    if (sensor.timeoutOccurred()) {
        Serial.print("TIMEOUT");
    };

    delay(100);

};
```

Codice gestione trasmissione/ricezione dati (PYTHON).

```
import json
import string
import serial
import time

def func(tmp):

    print tmp

    n = tmp.find("ID")
    id = tmp[n + 2 :n + 5]
    id = int(id)

    tt = None
    var = None
    cc = None

    a = -1
    b = -1

    lat = -1
    lng = -1
    c = "";
    t = -1

    if tmp.find("Va") != -1:
        n = tmp.find("Va")
        a = tmp[n + 2 :n + 7]
        a = int(a)

    if tmp.find("Vb") != -1:
        n = tmp.find("Vb")
        b = tmp[n + 2 :n + 7]
        b = int(b)
        var = {'Va':a, 'Vb':b}

    if tmp.find("C") != -1:
        n = tmp.find("C")
        c = tmp[n + 1 :n + 26]
        lat = c[0:9]
        lng = c[10:19]
        t = c[20:26]
        t = int(t)
        cc = {'lat':lat, 'lng':lng, 'a':t}

    n = tmp.find("Z")
    n2 = tmp.find("T")
    t5 = tmp[n + 1 :n2]

    n = tmp.find("T")
    n2 = tmp.find("S")
    t6 = tmp[n + 1 :n2]
```

```
tt = t5 + " " + t6

tmpjson = json.dumps({'id': id, 'var': var, 'c': cc, 'd': tt})

file = open("/var/www/html/tmp.json", "w")
file.write(tmpjson)
file.close()
print tmpjson
print "-----"

port = serial.Serial("/dev/ttyS0", baudrate = 9600, timeout = 2)
buff = ""
while True:
    rcv = port.read(1)
    buff = buff + rcv
    if buff.find("END") != -1:
        func(buff)
        buff = ""
```

Codice per interfaccia utente (html js).

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<script src="./angular.min.js"></script>
<script src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key="></script>
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<style>
  body {
    margin: 0;
    font-family: Arial, Helvetica, sans-serif;
  }

  ul.topnav {
    list-style-type: none;
    margin: 0;
    padding: 0;
    overflow: hidden;
    background-color: #333;
  }

  ul.topnav li {float: left;}

  ul.topnav li a {
    display: block;
    color: white;
    text-align: center;
    padding: 14px 16px;
    text-decoration: none;
  }

  ul.topnav li a:hover:not(.active) {background-color: #111;}

  ul.topnav li a.active {background-color: #4CAF50;}

  ul.topnav li.right {float: right;}

  @media screen and (max-width: 600px){
    ul.topnav li.right,
    ul.topnav li {float: none;}
  }

  .boa{
    position: absolute;
    top: 80px;
    left:20px;
  }

  .map{
    position: absolute;
    top: 120px;
    left:20px;
    width:500px;
    height:500px;
  }

  .data{
```

```

        position: absolute;
        top: 120px;
        left: 540px;
        width: 500px;
        height: 500px;
    }
</style>
</head>
<body>
    <ul class="topnav">
        <li><a class="active" href="./index.php">Live</a></li>
        <li><a href="./archivio.php">Archivio</a></li>
    </ul>
    <div style="padding: 0 16px;" ng-app="myApp" ng-controller="myCtrl">
        <div class="boa">
            Numero boa:
            <select ng-model="tmp_boa">
                <option ng-repeat="boa in list_boa"="{{boa.codice}}">
                    {{boa.nome}}
                </option>
            </select>
        </div>

        <div class="map" id="googleMap"></div>

        <div class="data">
            data misura: {{dat}}<br>
            posizione gps: {{gps.lat}} {{gps.lng}} a: {{gps.a}}<br>
            valore 1: {{val}}<br>
            valore 2: {{va2}}<br>
        </div>

        <script>
            var app = angular.module('myApp', []);
            app.controller('myCtrl', function($scope, $http, $interval) {
                var map;
                $scope.tmp_boa = "";
                $scope.list_boa = [];
                var mapCanvas = document.getElementById("googleMap");

                run = function () {
                    $http.get("./app.php?list").success(function (r) {
                        $scope.tmp_boa = r.default;
                        $scope.list_boa = r.list;
                        var center =
                            new google.maps.LatLng(43.587807, 13.516171);
                        map = new google.maps.Map(mapCanvas, {
                            center: center,
                            zoom: 15
                        });
                        $interval(boa, 1000);
                    });
                };

                boa = function () {
                    $http.get("./tmp.json").success(function (r) {
                        $scope.val = r.var.Va;
                    });
                };
            });
        </script>
    </div>
</body>
</html>

```

```
$scope.va2 = r.var.Vb;
$scope.dat = r.d;
$scope.gps = r.c;

if(r.c == null){
  var center = new
  google.maps.LatLng(43.587807,13.516171);
  map = new google.maps.Map(mapCanvas, {
    center: center,
    zoom: 15
  });
}

}else{
  var center = new
  google.maps.LatLng(
  $scope.gps.lat, $scope.gps.lng);
  map.setCenter(center);
  var marker = new google.maps.Marker({
    icon: {
      path: google.maps.SymbolPath.CIRCLE,
      scale: 5
    },
    map: map,
    position: center,
    title: ''
  });
};
});
run();
});
</script>
</div>
</body>
```


Parte codice elaborazione segnale 1 (Matlab).

```
clear
clc

T = 0.0001;
N = 2^15;
fs = N/T ;
t = (0:N-1)/ fs;
x = sin(t*40*10^3 * 2 * pi) ;

e = t.^2*200000000 + t*11017 ;

x = x.*e;

xa = hilbert(x) ;
ma = abs(xa);

ylower = envelope(x) ;

xo = x + 1.8;
ma = ma + 1.8;
ylower = ylower + 1.8;

figure
%plot(t, xo ,t,ma, t, ylower )
%plot(t, xo, 'color', [1 0 1])
grid on
hold on

plot(t, ma, 'r')
plot(t, ylower , 'y')

scatter(5.696e-5, 3.082, 'r');
scatter(5.702e-5, 3.081, 'y');
e1 = exp(-(t)/0.0021) * 3.1404;
%eq scarica condensatore

plot(t,e1, 'b' )
scatter(5.642e-5, 3.057, 'b');

e2 = exp(-(t)/0.0027) * 3.1473;
%eq scarica condensatore

plot(t,e2,'c')

scatter(7.761e-5, 3.058,'c');
xlim([5*10.^-5 9*10.^-5])
ylim([1 4.5])
x0=10;
y0=10;
width=600;
height=400
set(gcf, 'units', 'points', 'position', [x0,y0,width,height])
```

Parte codice elaborazione segnale 2 (Matlab).

```
clear
clc

T = 0.0001;
N = 2^15;
fs = N/T ;
t = (0:N-1)/ fs;

x = sin(t*40*10^3 * 2 * pi) ;

e = t.^2*200000000 + t*11017 ;

x = x.*e;

xa = hilbert(x) ;
ma = abs(xa);

ylower = envelope(x) ;

xo = x + 1.8;
ma = ma + 1.8;
ylower = ylower + 1.8;

figure
plot(t, xo ,t,ma, t, ylower )
plot(t, xo, 'color', [0 0 0])
grid on
hold on

%plot(t, ma, 'color', [.8 0 0])
%plot(t, ylower, 'color', [1 .5 0])

%scatter(5.696e-5, 3.082,[], [.8 0 0])
%scatter(5.702e-5, 3.081,[], [1 .5 0])

%scatter(5.636e-5, 3.057,[], [.8 0 0])
%scatter(5.637e-5, 3.057,[], [1 .5 0])

e1 = exp(-(t)/0.0021) * 3.1404;
%eq scarica condensatore

plot(t,e1, 'b')
%scatter(5.642e-5, 3.057, 'b');

e2 = exp(-(t)/0.0027) * 3.1473;
%eq scarica condensatore

plot(t,e2, 'color', [.110, .100, .70])

%scatter(7.761e-5, 3.058,[], [.110, .100, .70]);
```

```
xlim([0 10.^-4])
ylim([1 4.5])
x0= 0;
y0= 0;
width = 1200;
height = 800;
set(gcf,'units','points','position',[x0,y0,width,height])

xlabel('Time [s]') % x-axis label
ylabel('Voltage [V]') % y-axis label
%axis([5.6*10^-5 5.74*10^-5 3.03 3.1])
axis([5*10^-5 9*10^-5 1 4.5])
```