



UNIVERSITÀ DI PISA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA DEI SISTEMI  
DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI**

**RELAZIONE PER IL CONSEGUIMENTO DELLA  
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE**

***Caratterizzazione delle prestazioni dei trasduttori  
acustici a celle di Bragg attraverso il controllo del  
processo produttivo***

**SINTESI**

---

RELATORI

Prof. Ing. Gino Dini  
*Dipartimento di  
Ingegneria dell'Energia dei Sistemi  
del Territorio e delle Costruzioni*

Ing. Vittorio Falcucci  
*Tecnav Systems s.r.l*

IL CANDIDATO

Alberto Grassi  
a.grassi@studenti.unipi.it

Sessione di Laurea Magistrale del 28/04/2021

# **Caratterizzazione delle prestazioni dei trasduttori acustici a celle di Bragg attraverso il controllo del processo produttivo**

**Alberto Grassi**

---

## **Sommario**

Il lavoro di tesi prevede lo studio del processo produttivo di cortine di sensori acustici a celle di Bragg. Il lavoro è suddiviso in tre macro-argomenti: una prima parte introduttiva in cui vengono presentate le principali applicazioni dell'acustica subacquea e viene analizzato il fenomeno della propagazione delle onde sonore in un mezzo non omogeneo dal punto di vista fisico, una seconda parte in cui vengono presentati i principali vantaggi della tecnologia dei sensori a celle di Bragg e viene analizzato il mercato dei sensori acustici, infine l'ultima parte che comprende lo studio del processo produttivo e la relazione delle attività di prova svolte in vasca. Nello specifico in questa ultima fase viene studiato il processo produttivo determinando la sequenza ottima delle operazioni e verrà calcolato il tempo di ciclo e i costi di produzione, in seguito saranno identificati le fasi del processo produttivo che influiscono sulle prestazioni del sensore a celle di Bragg e verrà studiato un controllo del processo che tenga conto della errata esecuzione di tali operazioni. Infine, vengono riportate le attività di misure eseguite in vasca, le prove sono composte da un'attività iniziale di preparazione dall'esecuzione stessa delle prove e da uno studio successivo dei risultati che hanno portato all'implementazione di modifiche del processo produttivo.

## **Abstract**

The thesis work involves the study of the production process of Bragg cell acoustic sensor arrays. This work is subdivided into three macro-topics: a first introductory part in which the main applications of underwater acoustics are presented and the phenomenon of sound wave propagation in a non-homogeneous medium, from a physical point of view, is analyzed, a second part where the main advantages of Bragg cell sensor technology are presented and the acoustic sensors market is analyzed, and finally the last part which includes the study of the production process and the report of the test activities carried out in a tank of water. Specifically, in this last phase the production process is studied by determining the optimal sequence of operations and the cycle time and the production costs will be calculated, then the phases of the production process that affect the performance of the Bragg cell sensor will be identified and it will be studied a process control that considers the incorrect execution of these operations. Lastly, the activities of measurements performed in the tank are reported, the tests consist of an initial preparation activity, the execution of the tests itself and a subsequent study of the results that led to the implementation of changes in the production process.

## **1 Introduzione**

In ambiente marino la possibilità di captare o inviare onde sonore è fondamentale, tutti gli altri mezzi di comunicazione che sfruttano onde elettromagnetiche non sono efficaci, per cui il suono risulta l'unico mezzo per comunicare. L'onda acustica in acqua ha una velocità maggiore e un'attenuazione inferiore alle onde sonore in aria a causa della maggiore densità dell'acqua. Gli idrofoni sono microfoni marini che immersi in acqua riescono a captare le onde sonore che vi si propagano; solitamente sono composti da una parte vibrante che risulta sensibile alla differenza di pressione che un'onda crea in acqua e da una parte rigida di sostegno. Esistono differenti soluzioni costruttive che permettono di trasformare la deformazione di un componente in segnale. Le tre tipologie principali di idrofoni disponibili in commercio sono: piezoelettrici, magnetostriativi ed elettrodinamici.

La trasmissione e la ricezione di segnali acustici in acqua hanno varie applicazioni: in ambito militare, per studi sismici e geologici, come ausilio alla navigazione e per scopi scientifici.

## **2 Propagazione delle onde acustiche in mare e sensori subacquei**

Lo studio delle onde acustiche in acqua ha creato una disciplina specifica rispetto allo studio di onde elettromagnetiche: l'acqua, infatti, non è un mezzo omogeneo. Il campo di pressione generato dall'onda è oscillante ma a differenza dei campi elettrici e magnetici delle onde elettromagnetiche è un campo scalare, non vettoriale, perché l'andamento della pressione nel tempo è indipendente dalla direzione di provenienza del suono. L'onda di pressione viene generata da un corpo che vibra e trasmette la sua energia al mezzo che lo circonda, le particelle del mezzo vibrano intorno alla loro posizione iniziale, trasmettendo il moto a quelle adiacenti e così facendo nel mezzo si diffonde l'onda a velocità costante. Questo movimento crea in ogni istante nel mezzo zone di densità variabile tra un minimo e un massimo. Le zone a maggiore densità hanno una maggiore pressione rispetto a quelle rarefatte.

La propagazione acustica raggiunge distanze molto elevate specialmente alle frequenze più basse, alle quali le perdite di trasmissione per assorbimento sono più limitate. Per questo, sono sempre allo studio tecnologie che permettano di aumentare l'efficienza di detezione e ridurre le dimensioni o i costi di acquisizione e di esercizio.

Gli idrofoni sono trasduttori elettroacustici che trasformano energia estratta da un'onda acustica in segnali elettrici. I trasduttori più diffusi sfruttano la proprietà di piezoelettricità di alcuni materiali. Gli idrofoni trattati in questa tesi sfruttano la tecnologia delle fibre ottiche e

delle celle di Bragg come componente sensibile. Le fibre ottiche sono dei filamenti vetrosi o polimerici di piccole dimensioni in grado di condurre un fascio luminoso, solitamente sono composte da filamenti concentrici: una sezione interna trasparente (core) ed una più esterna opaca (cladding) che riflette la luce, ed uno strato protettivo (coating). Il core trasmette le onde elettromagnetiche che compongono la luce, mentre il cladding riflette totalmente la luce, la riflessione totale è dovuta alla differenza degli indici di rifrazione, il fascio di luce in questo modo si propaga all'interno della fibra con attenuazione estremamente bassa.

Il reticolo di Bragg è un pezzo di fibra di qualche millimetro di lunghezza nel cui core, per mezzo del processo di fotoincisione, viene creata una modulazione periodica dell'indice di rifrazione lungo l'asse della fibra. Il reticolo ottenuto con il processo di fotoincisione ha lo scopo di filtrare le frequenze delle onde elettromagnetiche che percorrono la fibra, riflettendo solo una lunghezza d'onda e trasmettendo tutte le onde a frequenze diverse da quella desiderata. Le dimensioni del reticolo definiscono la lunghezza d'onda riflessa (fig 2-1).

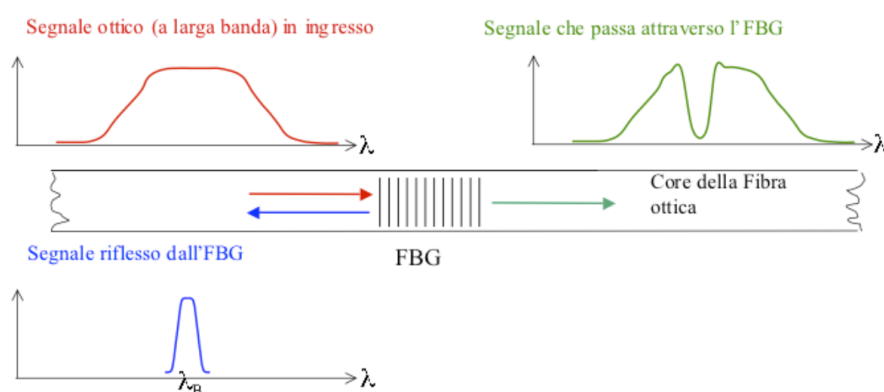


Figure 2-1 Funzionamento di una cella di Bragg (FBG)

Le deformazioni subite dalla cella modificano la distanza tra le incisioni e questo comporta la riflessione di una diversa lunghezza d'onda. Un idrofono che sfrutta la cella di Bragg è composto da un'apparecchiatura ottica che genera un segnale di luce laser da inviare all'interno della fibra, da un sensore che contiene la cella di Bragg, ed infine da un'apparecchiatura elettronica che attraverso fotodiodi e convertitori trasforma le variazioni di lunghezze d'onda della luce riflessa in un segnale digitale.

### 3 Motivazioni e finalità del lavoro di tesi

La tecnologia dei sensori a fibra ottica che sfruttano celle di Bragg presenta notevoli vantaggi per le applicazioni subacquee. Questi vantaggi hanno portato tre aziende a collaborare e ad eseguire ricerche in questo campo. Le tre aziende sono: "Dune" responsabile della parte software ed elettronica dell'idrofono, "Optosmart" che si occupa della parte ottica e "Tecnav

Systems” che si occupa delle prestazioni acustiche del sistema. Queste aziende hanno collaborato per eseguire studi finalizzati alla realizzazione di un prodotto che utilizzi le celle di Bragg. La tecnologia ricercata risulta di particolare interesse anche per la Marina Militare Italiana che vorrebbe creare all’interno del territorio nazionale conoscenze in questo ambito per realizzare un sensore a celle di Bragg con tecnologia italiana.

Lo scopo della presente tesi è quella di fornire un contributo alla suddetta ricerca, è stato dapprima analizzato il mercato degli idrofoni e sono state studiate le tecnologie disponibili. Sono stati poi identificati tutti i materiali necessari alla realizzazione del sistema di idrofoni a celle di Bragg, in particolare la fibra ottica il sistema di pompaggio laser e l’elettronica di controllo del laser e dell’analisi dei segnali. Contemporaneamente alla scelta dei materiali è stato definito il prodotto e le macrofasi principali del processo produttivo ed in seguito sono state determinate le prestazioni teoriche della configurazione scelta. Gli studi successivi, di cui questa tesi è il report, servono a determinare la prestazione e la sensibilità del prototipo costruito. Nella fase iniziale sarà analizzato in dettaglio il processo produttivo e ne verranno identificati i punti critici che incidono sulla sensibilità del sensore. Le valutazioni effettuate verranno supportate anche da una campagna di misure sul funzionamento degli idrofoni a celle di Bragg.

La verifica di funzionamento non si limiterà a determinare se il sensore si deforma come atteso secondo le specifiche di progetto quando sottoposto ad un campo di pressione, servirà anche a determinare il funzionamento della parte ottica ed elettronica e le corrette interazioni tra esse. Dopo aver verificato il funzionamento di tutti i componenti e del sistema completo si procederà a determinare il comportamento del sensore sottoposto ad onde acustiche in ambiente controllato. Per determinarne la sensibilità si eseguiranno delle prove prima in vasca e in seguito in mare aperto.

La ricerca sulle tecnologie delle celle di Bragg è finalizzata alla creazione di un nuovo prodotto, un idrofono o una serie di idrofoni da inserire sul mercato come alternative alle soluzioni già presenti. Risulta per cui necessario eseguire un’analisi di mercato per determinarne le dinamiche e valutare la convenienza dell’inserimento di un nuovo prodotto.

#### **4 Analisi di mercato**

Il mercato dei sensori acustici subacquei è composto da un numero ristretto di aziende che producono idrofoni e apparecchiature analoghe utilizzando le stesse tecnologie. La maggior parte dei sensori sono prodotti sfruttando le proprietà piezoelettriche di alcuni materiali, ma

esistono anche in minore quantità trasduttori magnetostrittivi ed elettrodinamici. Le aziende del mercato realizzano principalmente tre tipologie di prodotto per soddisfare bisogni differenti, i prodotti sono: Idrofoni, Proiettori acustici, Cortine di idrofoni. Le aziende solitamente vendono questi prodotti a livello mondiale, esistono anche piccole aziende che vendono i loro prodotti esclusivamente a livello nazionale, ma rappresentano una minoranza nel mercato. I clienti si suddividono in due grandi categorie: civili e militari.

L'azienda Tecnav Systems in collaborazione con le aziende Dune e Opto.smart sfruttando la tecnologia delle celle di Bragg all'interno di fibre ottiche vogliono servire gli stessi gruppi di clienti con un prodotto con caratteristiche differenti. I sensori costruiti non puntano a sostituire i prodotti tradizionalmente presenti sul mercato, ma bensì, puntano a specifici bisogni dei clienti non pienamente soddisfatti dai sensori tradizionali.

Il diagramma di Abell raffigurato in (fig 4-1) schematizza il posizionamento scelto da Tecnav per competere nel mercato dei sensori acustici. Nel diagramma risulta evidente come la posizione di Tecnav (rosso) si differenzi dal resto del mercato (blu).

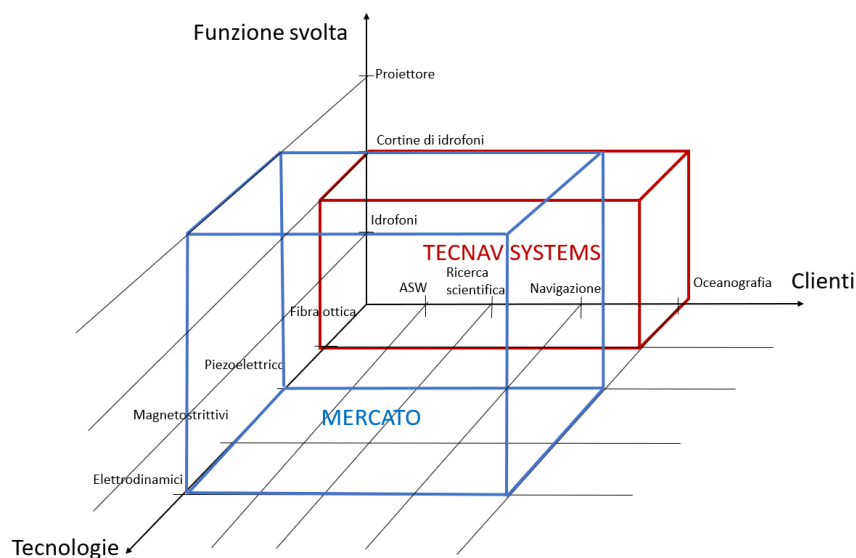


Figure 4-1 Diagramma di Abell,

Sfruttando il framework delle cinque forze di Porter viene analizzato il livello di competitività all'interno del mercato. Si deduce che il mercato non è attrattivo, non sembra avere alta profittabilità ed è caratterizzato da una sanguinosa competizione. Una nuova impresa che volesse entrare nel settore competendo con prodotti analoghi a quelli già realizzati da altri competitor risentirebbe di grosse difficoltà, i fornitori hanno un grosso potere e riuscire a conquistare nuovi clienti o a sottrarre clienti ai competitor è reso difficile dalle strategie di "Lock-in" messe in atto dalle imprese già presenti sul mercato.

La strategia di aggredire il mercato servendo i bisogni insoddisfatti dei clienti con prodotti differenti è il modo migliore per entrare nel settore, per cui Tecnav System e le aziende ad essa affiliata sembrano aver individuato un giusto posizionamento competitivo.

## **5 Variabilità e controllo dei processi produttivi di sensori acustici**

La fibra ottica date le sue dimensioni ridotte non subisce deformazioni rilevanti se immersa in acqua, quindi per aumentarne la sensibilità è necessario costruire un'interfaccia che amplifichi meccanicamente le deformazioni della cella e ne migliori le prestazioni. L'interfaccia con all'interno la cella di Bragg costituisce il sensore dell'idrofono (fig 5-1)



*Figure 5-1 Schema sensore*

Il processo di realizzazione della singola cella di Bragg è caratterizzato da un numero limitato di operazioni ed è interamente eseguito all'esterno su un unico macchinario che garantisce il controllo del processo. Perciò risulta più significativo analizzare il processo produttivo del sensore che, oltre a definire le prestazioni acustiche, prevede un numero maggiore di operazioni eseguite su macchinari differenti. La sensibilità dell'idrofono, infatti, è fortemente legata alle dimensioni e alle caratteristiche meccaniche dell'accoppiamento tra cella e interfaccia.

In quanto segue verranno descritte le componenti e il processo utilizzati per la realizzazione del sensore. L'interfaccia è divisa in tre parti (fig 5-2) per permettere l'inserimento, al momento dell'assemblaggio di componenti utili al funzionamento, come ad esempio la fibra contenente la cella di Bragg. Per la sua realizzazione viene utilizzata una stampante 3D FDM (Modellizzazione a Deposizione Fusa) con filamento di Policarbonato Ultimaker®. I sensori sono stati progettati per essere parte di un insieme di sensori collegati tra loro a distanza fissata, chiamata in gergo cortina, tutti funzionanti contemporaneamente. Le cortine permettono grazie alla sovrapposizione dei segnali registrati di definire la direzione della sorgente del suono. La cortina progettata è formata da un'unica fibra ottica a cui sono collegati più sensori fissati ad un cavo di acciaio di supporto.

## 5.1 Processo produttivo

Il prodotto finale di cui si studia il processo produttivo è una cortina composta da 6 sensori. Per la realizzazione dei singoli sensori devono essere realizzate mediante la stampa 3D le tre parti (Upper, Mid, Down), deve essere accoppiata la cella di Bragg al componente Upper, devono essere effettuati dei fori sul componente Mid e infine le tre parti devono essere unite insieme e serrate in posizione con 8 viti. (fig 5-2). Per il sequenziamento delle operazioni si considera il parco macchine al momento disponibile composto da una

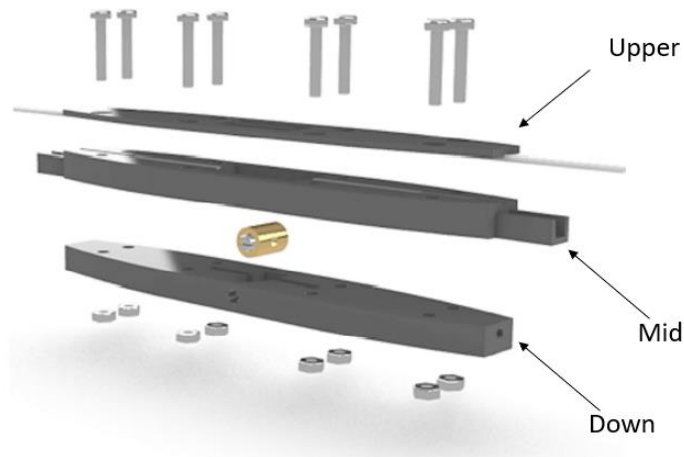


Figure 5-2 Schema esploso

stampante 3D Ultimaker 3™, una giuntatrice ottica e un trapano manuale. In figura 5-3 è raffigurato il diagramma di Gantt del sequenziamento ottimo identificato, si può notare come le operazioni manuali in arancione siano eseguite in ombra rispetto alle attività di

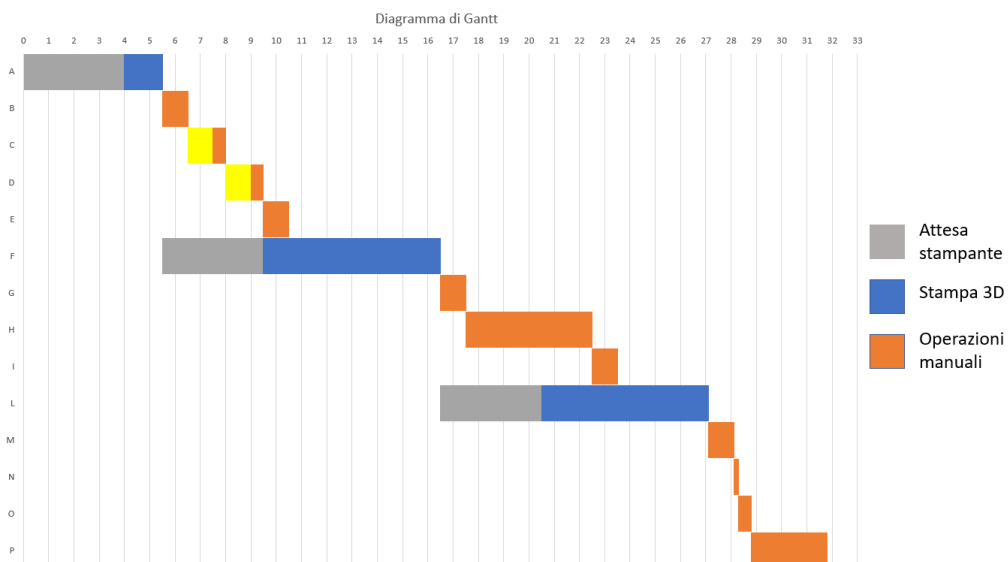


Figure 5-3 Diagramma di Gantt Sensore

stampata in blu, in grigio il tempo necessario alla macchina a scaldarsi. Il cammino critico delle operazioni di produzione di un sensore risulta composto dalle attività A, F, L, M, N, O, P determinando un tempo di realizzazione pari a 31,8 minuti.



Le operazioni di unione di due sensori per formare una cortina sono: unire le due estremità di fibra che spuntano da ciascun sensore, fissarli al cavo d'acciaio ed eseguire una colata di resina tra i due sensori per proteggere le fibre. La resina ha bisogno di un periodo dalle 12 alle 24 ore per polimerizzare completamente però il produttore indica nella scheda tecnica un intervallo di soli 30 min. necessario alla gelificazione. Il sequenziamento delle attività relative all'assemblaggio della cortina è schematizzato nel diagramma di Gantt sottostante (fig 5-4), le operazioni devono essere fatte in sequenza senza alcuna possibilità di sovrapposizioni.

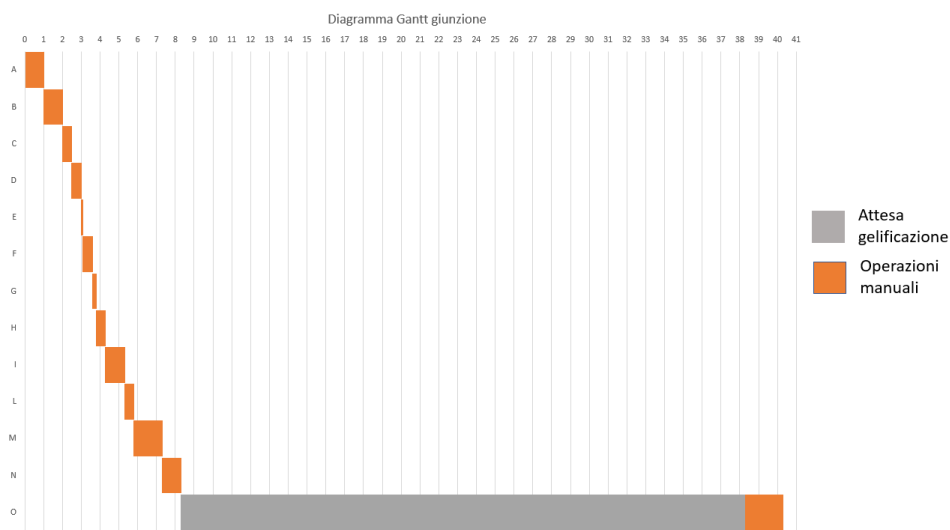


Figure 5-4 Diagramma di Gantt cortina

Per la realizzazione di una intera cortina è necessario identificare il miglior sequenziamento tra queste due macro-attività appena analizzate. Considerando il tempo necessario alla gelificazione della resina e il tempo necessario alla realizzazione di un sensore si è ipotizzato di realizzare un sensore in questo periodo di tempo. Si è notato infine che anticipando l'inizio della stampa del particolare Upper si trova il sequenziamento ottimo non ulteriormente migliorabile. Nel grafico sottostante è riportato il sequenziamento ipotizzato (fig 5-5).

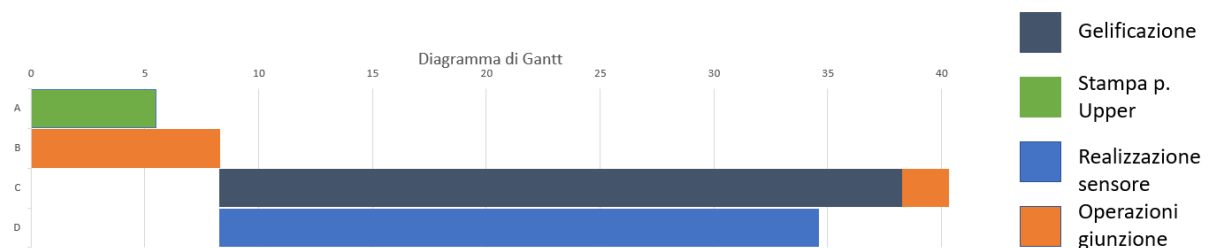


Figure 5-5 Sequenziamento Operazioni sensore-cortina configurazione ottima

Una volta identificato il sequenziamento ottimo delle attività si procede a determinare il tempo necessario alla creazione di una cortina di un numero "n" di trasduttori. Per realizzare una cortina di n elementi dovranno essere eseguite n-1 volte le operazioni di giunzione di due sensori, con in ombra la realizzazione di un altro sensore (fig 5-5), e una volta sola le

operazioni di realizzazione di un singolo sensore (fig 5-3). Il tempo totale per la realizzazione di una cortina composta da 6 trasduttori risulta essere 233 minuti, per cui un operatore è in grado di realizzare due prodotti in un turno di lavoro. Inoltre, è stato determinato anche il costo totale di produzione di ogni prodotto. Nel calcolo si è considerato il costo dei materiali consumabili relativo al singolo prodotto, la manodopera relativa al tempo di produzione, i costi dei macchinari utilizzati allocati in base alle ore di utilizzo e il consumo energetico relativo all'uso dei macchinari valutato rispetto al consumo medio. Infine, è stata valutata anche l'incidenza su ogni prodotto dei costi amministrativi relativi allo specifico progetto. Il costo totale della cortina risulta essere pari a 831 €.

## **5.2 Identificazione e caratterizzazione dei parametri di processo che influenzano le prestazioni**

Le possibili applicazioni di un idrofono sono determinate dai suoi parametri di funzionamento. Le prime prestazioni che vengono analizzate nella scelta di un idrofono per una specifica applicazione sono la sensibilità, la frequenza minima e quella massima di funzionamento. La "sensibilità" di un dispositivo è, per definizione, il rapporto tra la variazione del suo parametro di uscita osservabile e l'entità della sollecitazione d'ingresso imposta. Negli idrofoni a fibra ottica questi due parametri sono, rispettivamente, la lunghezza d'onda ottica di risonanza della cella di Bragg e la pressione esterna. La frequenza minima di lavoro è legata al fatto che l'idrofono è progettato a "camera aperta", ovvero non sigillata, e dunque lavora in condizioni di allagamento. La frequenza massima invece è legata alle dimensioni geometriche della parte sensibile del trasduttore chiamato "bender".

## **5.3 Implicazioni sul processo produttivo dei parametri prestazionali del prodotto**

Dopo aver identificato quali parti della cortina hanno influenza sulle prestazioni della stessa, in questo capitolo si procede a determinare per mezzo di quali operazioni queste parti vengono realizzate, ciascuna delle operazioni identificata verrà considerata critica. Le operazioni che influenzano le prestazioni del sensore e di tutta la cortina sono: la stampa del particolare "UPPER" e le operazioni effettuate manualmente dall'operatore su questo particolare, il serraggio dello stringi cavo con cui viene definita la distanza tra i due traduttori e infine l'unione dei due pezzi di fibra all'interno della giuntatrice ottica.

Per ogni operazione sono state determinate le modalità di guasto, le modalità di verifica e la metodologia di riparazione. Dopo aver determinato il tempo necessario ad ogni ripristino è

stato calcolato il ritardo e l'extracosto che ciascuna non conformità comporta sul processo di produzione della cortina.

Il passaggio successivo è stato determinare la probabilità con cui ogni non conformità si manifesta, con il valore di ogni probabilità è stato possibile determinare un tempo medio e un costo medio di produzione realistico che tenga in considerazione la possibile insorgenza di non conformità critiche per le prestazioni del trasduttore. Per determinare il tempo medio è stato identificato lo spazio degli eventi composto da tutte le modalità di guasto combinate e sfruttando il valore atteso della distribuzione multinomiale è stato determinato il tempo medio di produzione. Si è per cui calcolato un ritardo medio di 2,2 min e un costo di produzione maggiorato di 0,7 €.

## 6 Valutazione del nuovo prodotto

Il test ha lo scopo principale di verificare il funzionamento del sensore ottico in acqua e il buon funzionamento delle componenti del progetto analizzato in questo lavoro e le relative

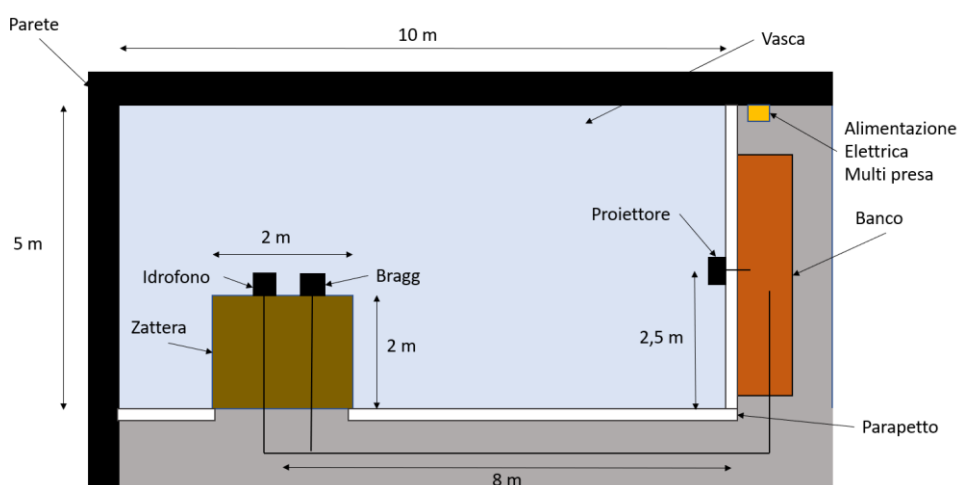


Figure 6-1 Vista superiore schema set-up prove vasca

interazioni. Le prove vengono utilizzate anche per misurare la dinamica del segnale, ossia verificare il livello minimo di intensità sonora distinguibile dal rumore di fondo. Le prove verranno eseguite anche per identificati alcuni aspetti critici relativi alle prestazioni del prodotto che necessitano di ulteriore analisi. Il set-up delle prove è raffigurato in figura 6-1.

### 6.1 Esecuzione e descrizione delle prove in vasca

L' esecuzione della prova consiste nella produzione di diversi segnali all'interno della vasca per mezzo del proiettore e nella raccolta dei dati dell'idrofono a celle di Bragg. Per verificare la corretta propagazione del segnale all'interno della vasca è stato utilizzato un idrofono calibrato di riferimento e un oscilloscopio. Tra gli aspetti critici evidenziati è emersa la

fragilità della fibra ottica e in generale del sensore. Durante le giornate di prove i sensori si sono guastati. In seguito ad una prima analisi dei dati si è anche osservato che i sensori hanno una difficile impostazione della sensibilità, ogni sensore perde sensibilità con l'utilizzo. La causa del problema è stata ritenuta essere lo svitamento subito dalle viti di serraggio in seguito alla movimentazione e l'utilizzo del trasduttore. Si è notato infatti come la sensibilità del sensore è fortemente legata alla coppia di serraggio delle viti. Come soluzione è stato ipotizzato l'utilizzo di un dispositivo per bloccare le viti. Date le ridotte dimensioni del corpo le scarse forze in gioco è sufficiente applicare una colla frena-filetti sui filetti della vite prima di serrare il dado. Dopo aver determinato il tempo necessario all'applicazione della colla l'operazione è stata inserita all'interno del sequenziamento del processo produttivo, come si evince dal diagramma in figura 6-2 la nuova operazione non comporta un aumento del tempo di produzione della cortina. Il costo della nuova operazione comprende solo il costo del materiale che risulta essere 0,8 € al pezzo.

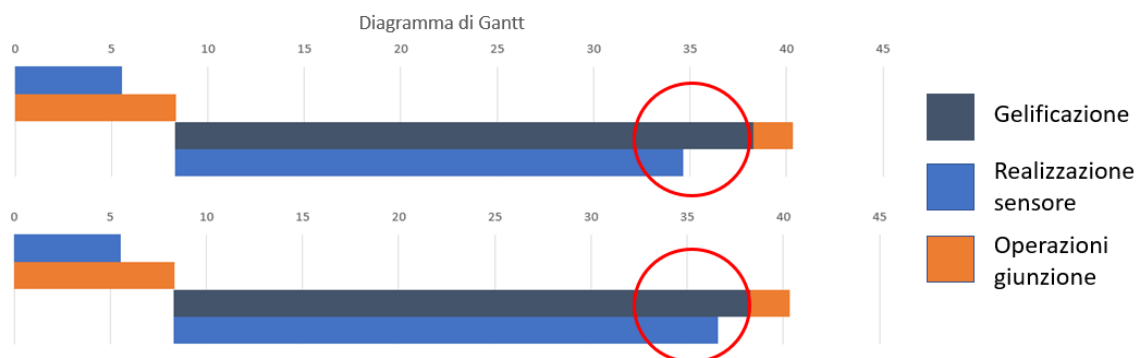


Figure 6-2 Diagramma di Gantt della produzione prima e dopo le modifiche derivanti dalle prove

## 7 Conclusioni

Le prove hanno permesso di verificare il corretto funzionamento dell'idrofono, di misurarne la dinamica e di individuare una modifica del processo produttivo. Purtroppo per motivi legati alla pandemia non è stato possibile eseguire le prove in mare, ma per decretare la corretta interazione delle parti che compongono il sistema risultano sufficienti le misure in vasca. Studiando il processo produttivo con un maggiore dettaglio si è potuto determinare in modo più accurato il costo di realizzazione e il numero di cortine realizzabile con l'attuale disponibilità di macchinari e risorse. In futuro dovranno essere eseguite ulteriori prove per poter calibrare i trasduttori: ogni trasduttore acustico che viene realizzato e venduto commercialmente deve essere calibrato. La calibrazione permette di definire i parametri del trasduttore in modo univoco tramite l'applicazione di standard di misura normati a livello internazionale.