

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

## **Set up sperimentale di un azionamento elettrico per l'attenuazione del moto ondoso**

Relatore: Prof. Andrea Tortella

Correlatore: Prof. Luca Martinelli

Laureando: Matteo Viola

1133038

Anno Accademico 2019/2020



# Sommario

1	Introduzione .....	10
2	Conversione di energia da moto ondoso.....	12
2.1	Caratteristiche del moto ondoso .....	12
2.2	Panoramica sull'energia dalle onde .....	13
2.2.1	Stima della risorsa energetica delle onde.....	15
2.3	Estrazione di energia dalle onde.....	17
2.4	Panoramica sui WEC .....	18
2.4.1	Attenuatore Pelamis .....	18
2.4.2	Point absorber con controllo MPPT.....	20
2.4.3	OWC .....	22
2.5	Sistema di controllo .....	23
2.5.1	Definizioni e terminologia di controllo PID.....	25
2.5.2	Risposta proporzionale, integrativa e derivativa .....	26
3	Strumentazione utilizzata e relativa installazione.....	28
3.1	Introduzione alla logica di controllo .....	28
3.2	Strumentazione elettrica ed elettronica.....	29
3.2.1	Motore asincrono e inverter .....	29
3.2.2	Assemblaggio motore/inverter con prova a vuoto.....	30
3.2.3	Controller NI CompactRio e moduli I/O .....	31
3.2.4	Collegamenti dei segnali di controllo.....	33
3.2.5	Descrizione sonde .....	35
3.3	Progettazione software LabView .....	36
3.4	Caratteristiche strutturali e fisiche .....	39
3.4.1	Laboratorio e canale ad onde .....	39
3.4.2	Struttura del corpo galleggiante .....	40
3.4.3	Schema di funzionamento dell'attuatore lineare del carrello .....	41
3.5	Funzionamento generale .....	42
4	Test preliminari e preparatori .....	45
4.1	Calibrazione e filtraggio delle sonde.....	45
4.1.1	Sonde resistive d'onda .....	45

4.1.2	Sonde di posizione .....	46
4.2	Cella di carico .....	47
4.3	Filtraggio dei segnali input .....	48
4.3.1	Ricerca coefficienti PID .....	49
4.4	Test preliminare .....	49
4.4.1	Metodo "Guess and check" e metodo Ziegler Nichols .....	50
4.5	Tuning effettivo ad acqua ferma.....	52
4.6	Condizioni al contorno .....	53
4.7	Tuning PID sonda di forza con test d'onda .....	55
4.7.1	Sistema di forza compensativo .....	55
4.8	Controllo tramite posizione .....	62
4.8.1	Galleggiante controllato al blocco orizzontale .....	62
4.8.2	Galleggiante con movimento sinusoidale imposto ad acqua ferma.....	63
4.8.3	Analisi dei dati sui test di riferimento .....	64
5	Strategie di controllo.....	68
5.1	Introduzione.....	68
5.2	Metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione .....	69
5.2.1	Descrizione del modello e implementazione.....	69
5.2.2	Test e analisi dati.....	73
5.3	Metodo di inversione di marcia del motore .....	77
5.3.1	Descrizione e implementazione del modello.....	77
5.3.2	Test eseguiti e analisi dei dati .....	79
5.4	Metodo di controllo tramite posizione precedente .....	80
5.4.1	Descrizione e implementazione del modello.....	80
5.4.2	Test eseguiti e analisi dei dati .....	82
5.5	Confronto dei dati.....	85
	Conclusioni .....	90
	Bibliografia .....	92
	Appendice A.....	94
	Basi teoriche del PID .....	94
	Sistema a circuito chiuso.....	94
	Risposta proporzionale .....	95

Risposta integrale.....	95
Risposta derivata.....	95
Appendice B.....	96
Appendice C.....	98

## LISTA DELLE FIGURE

Figura 1.1 - Schema e realizzazione del frangiflutti galleggiante e WEC, nel canale ad onde del Laboratorio marittimo dell'Università di Padova. ....	11
Figura 2.1 - Onda stazionaria (a) e onda progressiva (b) [2] .....	13
Figura 2.2 -Boa galleggiante di Yoshio Masuda basata sul principio OWC [7].....	14
Figura 2.3 - Livelli medi di energia delle onde a livello globale (kW/m) [2].....	15
Figura 2.4 - Livelli medi di energia delle onde sulle coste italiane [2].....	16
Figura 2.5 - Tipologie di dispositivi WEC: attenuatori ( a ), point absorber ( b ) e colonna d'acqua oscillante ( c ) [8].....	18
Figura 2.6 - Attenuatore Pelamis, schema di funzionamento e componenti [9] .....	19
Figura 2.7 - Sistema di controllo dell'attenuatore Pelamis [9].....	19
Figura 2.8 - Schema di funzionamento del PADA .....	20
Figura 2.9 - Modello simulink per l'algoritmo MPPT [10].....	21
Figura 2.10 - Risultati dei test eseguiti tramite controllo MPPT in termini di potenza media [W]: in funzione del parametro D (a) e in funzione della costante di tempo MPPT e per D vari (b).....	22
Figura 2.11 - Schema di funzionamento del OWC di Mutriku [11] .....	23
Figura 2.12 - Diagramma a blocchi del funzionamento del ciclo aperto (a) e ciclo chiuso (b) [12] .....	24
Figura 2.13 - Risposta di un tipico sistema a circuito chiuso PID [13] .....	25
Figura 2.14 - Risposta di un tipico sistema a circuito chiuso PID con tempo morto [13] .....	26
Figura 2.15 - Diagramma a blocchi di un tipico algoritmo PID [9].....	27
Figura 3.1 - Schema di funzionamento e interazione tra elementi coinvolti in qualsiasi strategia di controllo per il galleggiante.....	28
Figura 3.2 - Motore asincrono (a) e inverter UNIDRIVE 1405 (b) utilizzati.....	30
Figura 3.3 - Istruzioni per il cablaggio dell'inverter Unidrive 1405 [15].....	31
Figura 3.4 - CompactRio-9066 alimentato dal Power supply in cui sono inseriti i vari moduli I/O .....	33
Figura 3.5 - Morsettiera segnali inverter (a) e relativo schema di funzionamento (b) .....	34
Figura 3.6 - Schema di cablaggio nel collegamento tra inverter digitale e il modulo NI 9472 .....	35

Figura 3.7 - Pannello principale "Main" del software LabView con relativa suddivisione in tre parti.....	36
Figura 3.8 - Initialization Task di Labview.....	37
Figura 3.9- Controllo principale del software LabView .....	37
Figura 3.10 - Riepilogo di tutto il codice del modulo, tipo di input e connessione con la struttura.....	38
Figura 3.11 - Zoom della parte dedicata al Data Logging .....	39
Figura 3.12 - Interfaccia grafica dell'host LabView .....	39
Figura 3.13 - Canale ad onde presente in laboratorio .....	40
Figura 3.14 - Schema del canale ad onde e relativa posizione delle sonde resistive .	40
Figura 3.15 - Rappresentazione 3D del galleggiante e relative dimensioni.....	41
Figura 3.16 - Attuatore lineare a cinghia; modello utilizzato (a) assemblaggio con motore e riduttore (b) .....	42
Figura 3.17 - Schema di funzionamento del sistema sotto studio.....	43
Figura 3.18 - Assemblaggio completo della struttura con relativi riferimenti alle diverse parti.....	44
Figura 4.1 - Set di sonde resistive .....	45
Figura 4.2 - Schermata del software addetto alla calibrazione delle sonde resistive necessarie per stimare il livello dell'acqua, si possono qui notare i vari passaggi.....	46
Figura 4.3 - Linea di tendenza delle due sonde di posizione .....	47
Figura 4.4 - Linea di tendenza della cella di forza.....	47
Figura 4.5 - Filtro Passa basso ideale.....	48
Figura 4.6 - Filtro Butterworth passa basso sviluppato nel software LabView .....	49
Figura 4.7 - Front panel LabView nel test preliminare con catena.....	50
Figura 4.8 - Test preliminare con catena.....	50
Figura 4.9 - Esempio di oscillazione permanente .....	51
Figura 4.10 - Test con galleggiante completamente libero .....	53
Figura 4.11 - Test con galleggiante parzialmente bloccato.....	54
Figura 4.12 - Test con galleggiante completamente bloccato.....	54
Figura 4.13 - Variazione teorica di posizione del galleggiante e forza nel tempo nel test di sistema di forza compensativo.....	56
Figura 4.14 - Rappresentazione della variazione del rapporto tra spostamento reale e di riferimento con valori crescenti di $K_P$ . (a) $H_{si}=5$ cm $T_p=1$ s; (b) $H_{si}=5$ cm $T_p=2$ s; (c) $H_{si}=8$ cm $T_p=2$ s. ....	58
Figura 4.15 - Rappresentazione della variazione di SNR con valori crescenti di $K_P$ . (a) $H_{si}=5$ cm $T_p=1$ s; (b) $H_{si}=5$ cm $T_p=2$ s; (c) $H_{si}=8$ cm $T_p=2$ s.....	59
Figura 4.16 - Variazione del rapporto tra spostamento effettivo e il riferimento SNR, con un valore crescente del coefficiente derivato $K_D$ . (a) Test 036 con $K_P=2,5$ ; (b) Test 036 con $K_P=3,0$ ; (c) Test 038 con $K_P=2,0$ ; (d) Test 038 con $K_P=2,5$ .....	60
Figura 4.17 - Variazione del rapporto tra spostamento reale e il riferimento SNR, con tutti i valori considerati dei coefficienti PID impostati .....	61

Figura 4.18 - Posizione del galleggiante impostata e forza teorica attesa .....	62
Figura 4.19 - Finestra di controllo della sinusoide nel front panel e nel diagramma a blocchi del software Labview .....	63
Figura 4.20 - Variazione di $F_{rms}/H_i$ per valori crescenti di $T_p$ , con POS 8 - 9 - 10 ..	65
Figura 4.21 - Variazione di RAO per valori crescenti di $T_p$ , con le quattro configurazioni in analisi.....	66
Figura 4.22 - Variazione di $k_t$ per valori crescenti di $T_p$ , con le quattro tipologie sotto analisi .....	67
Figura 5.1 - Schermata LabView dello switch "Controllo attivo", nel pannello host (a) e nell'interfaccia grafica (b). .....	69
Figura 5.2 - Differenza tra onda incidente e onda trasmessa .....	70
Figura 5.3 - Schema che rappresenta un'onda incidente e le zone in cui la massima forza applicata FM si oppone al movimento del corpo, rappresentato dalla regione scura; e zona in cui viene applicata una forza più piccola e proporzionale, rappresentata da una regione chiara .....	70
Figura 5.4 - Schema di funzionamento generale della forza nel controllo di attenuazione dell'oscillazione.....	71
Figura 5.5 - Schema a blocchi del pannello Host del programma Labview sul controllo di attenuazione dell'oscillazione .....	72
Figura 5.6 - Dettaglio dello schema a blocchi specifico per il controllo di attenuazione dell'oscillazione.....	72
Figura 5.7 - Cattura dell'interfaccia grafica dell'host LabView riguardo il Test 091 (a) e il Test 094 (b) .....	74
Figura 5.8 - Analisi dell'energia media per i tre periodi d'onda al variare della forza	76
Figura 5.9 - Analisi del coefficiente di trasmissione per i tre periodi d'onda al variare della forza.....	76
Figura 5.10 - Variazione della posizione del galleggiante $\eta$ e forza applicata $F$ durante l'inversione di marcia del motore; la linea tratteggiata rossa rappresenta una posizione del galleggiante non controllata, la posizione controllata effettiva della linea continua rossa, le linee tratteggiate blu rappresentano la forza massima applicata $F_M$ e la forza applicata effettiva della linea continua blu.....	77
Figura 5.11 - Schema a blocchi del pannello Host del programma Labview sul controllo di inversione di marcia del motore .....	78
Figura 5.12 - Dettaglio dello schema a blocchi specifico per il controllo di inversione di marcia del motore.....	79
Figura 5.13 - Grafici del Front Panel del software LabView del Test 102. Il set-point del galleggiante (linea blu) risulta fortemente disturbato e non regolare; (b) l'andamento della posizione (linea celeste) non regolare .....	80
Figura 5.14 - Schema di funzionamento teorico del controllo tramite posizione precedente .....	81

Figura 5.15 - Dettaglio dello schema a blocchi specifico per il controllo tramite posizione precedente .....	82
Figura 5.16 - Analisi del coefficiente di trasmissione al variare di periodo d'onda, posizione precedente e forza immessa .....	84
Figura 5.17 - Analisi dell'energia media prodotta al variare di periodo d'onda, posizione precedente e forza immessa .....	84
Figura 5.18 - Potenza media (W) ottenuta in tutti i test eseguiti, con vari metodo di controllo e caratteristiche di controllo. I valori di lunghezza d'onda sono $T_p=2,00$ in blu, $T_p=1,75$ in rosso e $T_p=1,50$ in verde .....	85
Figura 5.19 - Produzione di potenza media in W (a) e coefficiente di trasmissione, kt, (b) registrati con $T_p=2.0$ s e quattro metodologie di controllo rappresentate come: in blu Controllo di attenuazione dell'oscillazione, in rosso Inversione di marcia del motore, in verde controllo tramite posizione precedente .....	87
Figura 5.20 - Produzione di potenza media in W (a) e coefficiente di trasmissione, kt, (b) registrati con $T_p=1.75$ s e due metodologie di controllo rappresentate come: in blu Controllo di attenuazione dell'oscillazione e in verde controllo tramite posizione precedente .....	88
Figura 5.21 - Produzione di potenza media in W (a) e coefficiente di trasmissione, kt, (b) registrati con $T_p=1.50$ s e due metodologie di controllo rappresentate come: in blu Controllo di attenuazione dell'oscillazione e in verde controllo tramite posizione precedente .....	89
Figura A.1 - Diagramma a blocchi di un tipico sistema a ciclo chiuso [13].....	95

## LISTA DELLE TABELLE

Tabella 3.1 - Dati di targa motore asincrono [14].....	29
Tabella 3.2 - Riepilogo dei codici dei moduli presenti, tipo di input e connessione con la struttura.....	33
Tabella 4.1 - Dati utilizzati per la calibrazione del trasduttore di posizione e del LVDT .....	47
Tabella 4.2 - Metodo di ricerca dei coefficienti PID tramite metodo Ziegler-Nichols [18] .....	52
Tabella 4.3 - Coefficienti PID trovati dalla calibrazione tramite metodo Ziegler-Nichols .....	53
Tabella 5.1 - Test eseguiti per il metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione, sviluppati con $T_p=2,00$ e diversi range di forza.....	75
Tabella 5.2 - Test eseguiti per il metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione, sviluppati con periodi d'onda vari e diversi range di forza .....	75
Tabella 5.3 - Test eseguiti per il metodo di controllo di inversione di marcia del motore, sviluppati con $T_p=2,00$ e diversi range di forza .....	79



Tabella 5.4 - Dati relativi ai test eseguiti con controllo tramite posizione precedente .....	83
Tabella B.1 - raccoglie i risultati utilizzati per l'analisi dei dati di test di riferimento ottenuti da sonde d'onda e sonde di carico e posizione.....	97
Tabella C.1 - caratteristiche delle onde in arrivo e i risultati ottenuti dalle sonde di onde resistive e dalla cella di carico.....	99
Tabella C.2 - Potenza generata all'interno di ciascun test di strategia di controllo eseguito .....	100

# 1 Introduzione

Scopo di questo lavoro è la progettazione di un sistema di controllo ottimale di un frangiflutti galleggiante abbinato a un convertitore di energia ondosa. Lo scopo principale è quello di verificare l'efficienza dal punto di vista della riduzione dell'altezza d'onda incidente e la contemporanea produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile. Per fare ciò è stata sviluppata una strategia di controllo in grado di sfruttare la posizione istantanea del frangiflutti e la forza registrata dalle sonde per imporre all'apparato un determinato comportamento.

Il frangiflutti potrebbe essere utilizzato in porti turistici e piccoli porti, infatti è particolarmente adatto per acque relativamente profonde e in presenza di significative escursioni di marea, dunque funziona meglio con la lunghezza d'onda definita.

I convertitori di energia delle onde (WEC: Wave Energy Converter) sono dispositivi che convertono l'energia cinetica e potenziale associata a un'onda in movimento in energia elettrica utile; il vantaggio principale è la grande disponibilità di energia che può essere estratta dall'oceano e dalle onde, ma alla fine il suo costo complessivo è ancora troppo elevato per essere competitivo con altre fonti.

Per questo motivo, l'unificazione di queste due strutture potrebbe portare diversi vantaggi: la costruzione di una struttura necessaria come un frangiflutti galleggiante prima di tutto e, successivamente, il recupero dei costi con la costruzione del WEC e la conseguente vendita di energia.

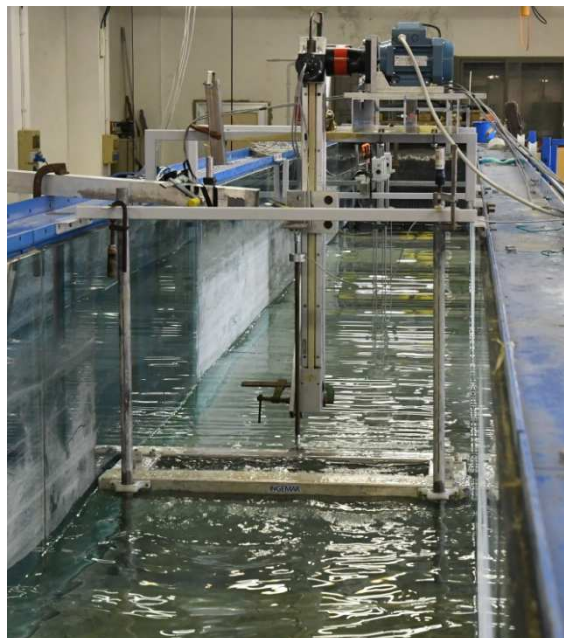
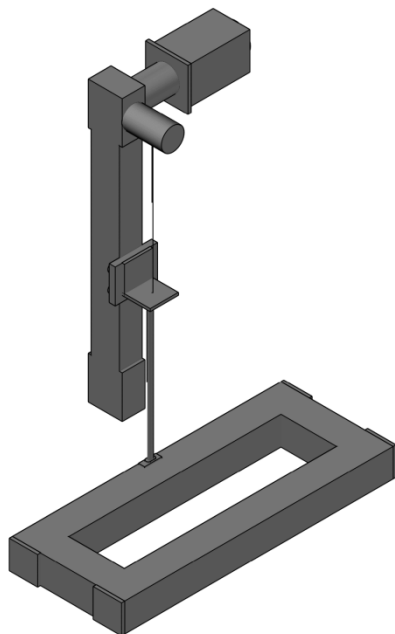
L'esempio di convertitore di energia d'onda più famoso è quello del galleggiante PTO (Power Take Off): il suo equilibrio energetico è caratterizzato dall'aggiunta di forza dovuta all'onda in entrata e dalle perdite dovute a galleggiamento e radiazione; è possibile frenare il suo movimento naturale per assorbire energia grazie al PTO accoppiato ad un generatore elettrico. Per massimizzare l'energia d'assorbimento, è possibile controllare questo dispositivo, raggiungendo una condizione di risonanza e definendo un termine di energia assorbita uguale a quella irradiata. In questo modo il dispositivo, ottiene altri due vantaggi in presenza di un controllo attivo: miglioramento dell'efficienza del frangiflutti galleggiante e aumento della produzione di energia.

Alla luce di queste considerazioni, l'obiettivo principale di questo elaborato è la definizione di un sistema in grado di migliorare sia le prestazioni di galleggiamento del frangiflutti sia l'estrazione dell'energia delle onde.

Per raggiungere questi obiettivi, descritti in questo elaborato, si è progettato un frangiflutti galleggiante in scala progettato presso il Laboratorio Marittimo dell'Università di Padova e si è collegato quest'ultimo a una macchina elettrica, al fine di simulare l'azione di un sistema di generazione di energia. Si è sviluppato il tutto su un canale ondoso 2D, misurando le influenze sulle onde trasmesse e sulla produzione di energia che si verificano grazie alla presenza di galleggiante controllato.

Innanzitutto era necessario costruire un modello fisico in grado di simulare correttamente i componenti meccanici ed elettrici del sistema integrato. Il sistema considerato è riportato nella Figura 1.1 ed è definito principalmente dal galleggiante, dal carrello e dai componenti del motore; è controllato grazie a due parametri

principali: la posizione, rilevata da un trasduttore di posizione, e la forza dell'onda, misurata da una cella di carico utilizzata anche come giunzione tra il galleggiante e la struttura della PTO.



**Figura 1.1 - Schema e realizzazione del frangiflutti galleggiante e WEC, nel canale ad onde del Laboratorio marittimo dell'Università di Padova.**

Il secondo passo importante è la messa a punto dell'hardware e del software di controllo che tiene costantemente sotto controllo le misurazioni e invia il segnale corrispondente all'inverter e al motore per ottenere il comportamento del galleggiante richiesto dall'utente.

Una volta definiti sia il modello fisico che il software di controllo, vengono eseguiti diversi test preliminari, al fine di: calibrare sonde e coefficienti PID, validare il modello e verificare la capacità del software di controllare il galleggiante; si sono eseguite dei test di condizioni al contorno come la simulazione di "galleggiante completamente libero" e condizioni di posizione fissa. Infine, nel software LabView sono stati progettati tre esempi di diverse strategie di controllo, definite considerando diversi input di controllo, come la direzione di marcia del motore e le condizioni di posizione, al fine di simulare il funzionamento della PTO. I risultati vengono successivamente analizzati al fine di individuare la migliore strategia di controllo in grado di massimizzare l'estrazione di energia e l'efficienza del galleggiante.

## 2 Conversione di energia da moto ondoso

Questo progetto nasce con la duplice idea di creare un sistema che riesca ad attenuare le onde incidenti sulla costa al fine di svolgere una funzione di protezione dalle mareggiate e, al tempo stesso, recuperare energia da questo processo.

Negli ultimi anni, l'energia delle onde del mare ha aumentato la sua rilevanza, diventando una delle risorse energetiche rinnovabili più promettenti. Nel presente capitolo vengono trattati diversi argomenti di natura teorica: in primo luogo, una breve descrizione dell'idrodinamica delle onde a cui segue una caratterizzazione della disponibilità di energia delle onde a livello globale e sulle coste italiane; successivamente viene riportata un'introduzione e un background storico sulle tecnologie di estrazione dell'energia delle onde WEC, insieme ad alcuni criteri per definire la strategia di controllo.

### 2.1 Caratteristiche del moto ondoso

I movimenti oscillatori della superficie libera del mare si chiamano onde marine [1]. A seconda della causa che provoca le onde queste assumono proprietà differenti: la principale riguarda il periodo che è piccolo per le onde superficiali generate dal vento, mentre è assai maggiore per altri tipi di onda (le cosiddette onde lunghe) le più caratteristiche delle quali sono le onde di marea e le onde di maremoto ("tsunami").

Si definiscono i principali parametri caratteristici di un'onda:

- Cresta: luogo dei punti nel quale si ha il massimo innalzamento della superficie marina rispetto al livello della superficie libera.
- Cavo: luogo dei punti nel quale si ha il massimo abbassamento della superficie marina rispetto al livello della superficie libera.
- Periodo di picco,  $T_p$ : tempo intercorrente tra un innalzamento e l'innalzamento successivo della superficie (oppure tra un abbassamento e l'abbassamento successivo) nella direzione di propagazione del moto ondoso.
- Lunghezza d'onda  $\lambda$  : distanza tra due creste o due cavi successivi (nella direzione di propagazione del moto ondoso).
- Altezza,  $H$ : differenza di livello tra una cresta ed il cavo successivo.

Le onde si formano per effetto del vento sulla superficie dell'acqua e si propagano anche per migliaia di chilometri. Dal punto di vista teorico le onde si definiscono stazionarie o progressive: nel primo caso la cresta oscilla verticalmente, ma rimane ferma orizzontalmente, nel secondo caso si sposta anche in direzione orizzontale, come si può osservare dalla Figura 2.1.

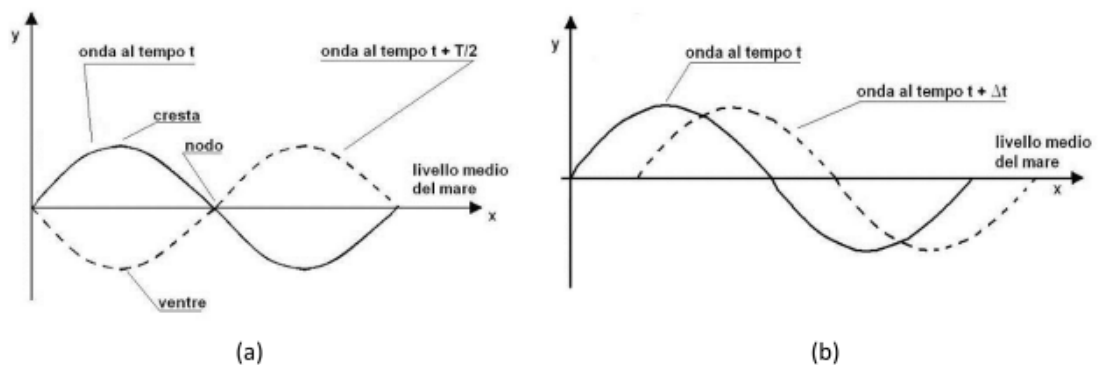


Figura 2.1 - Onda stazionaria (a) e onda progressiva (b) [2]

Le onde reali hanno caratteristiche di frequenza e ampiezza che variano nel tempo e nei diversi punti del campo e si descrivono mediante parametri equivalenti come il periodo di picco e  $H_s$ : definita tradizionalmente come l'altezza media dell'onde (dal cavo alla cresta) considerando il terzo delle onde più alte in un dato periodo.

L'energia teorica associata al moto ondoso, espressa in termini di potenza per unità di larghezza del fronte d'onda, può essere stimata nel campo della teoria lineare dalla seguente relazione [2]:

$$P = \frac{H_s^2 \cdot \rho \cdot g^2 \cdot T_p}{64 \cdot \pi}; \left[ \frac{kW}{m} \right] \quad (2.1)$$

Dove  $\rho$  è la densità dell'acqua del mare pari  $1025 \text{ kg/m}^3$  e  $g$  l'accelerazione di gravità.

## 2.2 Panoramica sull'energia dalle onde

La crisi generata dalla riduzione dei carboni fossili ha messo in luce la vulnerabilità del modello di utilizzo dell'energia nel mondo e l'interesse per le risorse rinnovabili è cresciuto esponenzialmente, anche il numero di progetti di ricerca e sviluppo nel settore dell'energia oceanica è aumentato considerevolmente nel XXI secolo [3].

L'intensità energetica media delle onde oceaniche è superiore a quella dell'energia solare ed eolica [4] e con un potenziale mondiale della stessa misura del consumo totale di elettricità nel mondo [5] l'energia delle onde ha il potenziale di essere un contributo significativo per raggiungere la domanda energetica mondiale. Gli oceani coprono il 70% della superficie terrestre e rappresentano un'enorme fonte di energia: da marea, corrente marina, gradiente termico e onde.

L'energia delle onde, infatti, rappresenta una concentrazione spaziale di energia solare ed eolica: è possibile vedere che il sole definisce un'intensità di  $0,1 - 0,3 \text{ kW/m}^2$  su una superficie orizzontale della Terra, mentre il vento ha  $0,5 \text{ kW/m}^2$  di intensità nell'area prevista perpendicolare alla direzione del vento; dal vento alle onde, l'energia è ancora più concentrata con un valore di  $2-3 \text{ kW/m}^2$  lungo la superficie perpendicolare alla direzione di propagazione delle onde.

In conclusione, le onde sono più persistenti rispetto al vento e questo rende l'estrazione dell'energia delle onde più rilevante nella ricerca sulle energie rinnovabili. [6]

Le onde sono generate dall'azione del vento, e questo rende l'energia delle onde una manifestazione di energia solare. Da questa considerazione è possibile notare che

l'energia dell'oceano può essere divisa in due categorie principali: termica e meccanica, entrambe legate al sole.

La rotazione terrestre influenza insieme al sole la generazione del vento, che provoca onde sulla superficie del mare; mentre l'attrazione gravitazionale della luna definisce maree e correnti. D'altra parte, il sole agisce anche sulla superficie del mare, inducendo un aumento della temperatura sulla parte superiore dello specchio d'acqua, rimanendo fredda in profondità. Questo induce un gradiente di temperatura, che può anche essere usato per ottenere energia elettrica.

Ormai da decenni vengono sviluppate diverse tecnologie che mirano allo sfruttamento dell'energia dei mari. Cronologicamente la prima stazione per lo sfruttamento di energia da marea è stata costruita nel 1966 a La Rance, in Francia, funziona ancora oggi, producendo circa 240 MWh.

Parlando invece di sistemi galleggianti: Yoshio Masuda fu il primo a sviluppare boe di navigazione alimentate dall'energia delle onde. Il dispositivo è sostanzialmente un galleggiante innestato su un tubo verticale, vedi Fig. 2.2.

La parte superiore, sopra la linea di galleggiamento, forma una camera d'aria aperta sull'atmosfera attraverso un condotto in cui è installata una turbina ad aria. L'azione dell'onda comprime e decomprime alternativamente l'aria intrappolata che forza l'aria a fluire attraverso la turbina. I sistemi Masuda furono in seguito conosciuti come dispositivi galleggianti a colonna d'acqua oscillante (OWC) [7]. Per la loro intrinseca semplicità e affidabilità, oltre un migliaio di queste boe di navigazione sono state impiegate in Giappone, Cina e Stati Uniti nel corso degli anni.

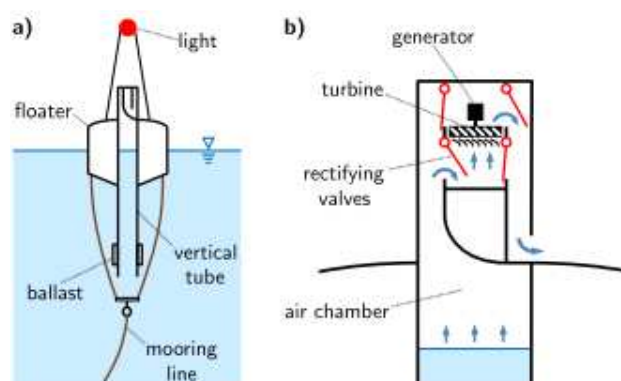


Figura 2.2 -Boa galleggiante di Yoshio Masuda basata sul principio OWC [7]

Dalla crisi del petrolio del '73 in poi verranno condotte molte importanti ricerche e programmi sull'energia delle onde, ma pochi di essi sono stati effettivamente trasformati dalla considerazione teorica a quella pratica. Questo probabilmente a causa di tre problemi principali:

- i processi di assorbimento dell'energia delle onde pongono considerazioni teoriche idrodinamiche difficili, in cui sono presenti complessi processi di radiazione e diffrazione; per questo motivo, la soluzione di questa complessità riguarda molti degli studi condotti alla fine degli anni '70.
- Un'altra complessità è definita dalla variabilità del flusso di energia, sia in scala spaziale che temporale. Guardando ad esempio le scale temporali, è possibile notare che le variazioni possono verificarsi con un ordine di secondi (onde), di ore o giorni (stato del mare, marea) e anche a livello stagionale.

- È importante considerare i problemi riguardanti la vulnerabilità alle condizioni estreme: queste infatti possono agire sul dispositivo con maggiore forza rispetto a quello che si verifica con un altro tipo di energia rinnovabile.

Nel 1991, un altro importante evento determina il percorso di sviluppo del convertitore di energia delle onde: la Commissione europea include l'energia delle onde nel loro programma di ricerca e sviluppo sulle energie rinnovabili e da questo momento in poi molti altri progetti e ricerche sono stati sviluppati.

### 2.2.1 Stima della risorsa energetica delle onde

Nella sezione precedente è stato introdotto il problema relativo alla variabilità dello stato del mare e, in particolare, della potenza delle onde; la natura casuale dell'onda può essere vista in diverse scale temporali, anche se è possibile riconoscere un andamento stagionale. Per questo motivo, quando esiste la volontà di lavorare con l'estrazione della potenza dell'onda, è molto importante caratterizzare la natura e l'entità della risorsa energetica nel modo più preciso. In passato queste caratterizzazioni sono state eseguite per usi diversi, come per la navigazione o la protezione delle coste, e perciò non sono completamente sufficienti per la valutazione della disponibilità di energia nella produzione di energia.

A livello globale le zone con moto ondoso di maggiore contenuto energetico sono quelle esposte alle direzioni principali dei venti oceanici. I valori tipici medi annuali di energia del moto ondoso in mare aperto, nelle zone più favorevoli, variano tra 20 e 70 kW/m con punte anche di 100 kW/m.

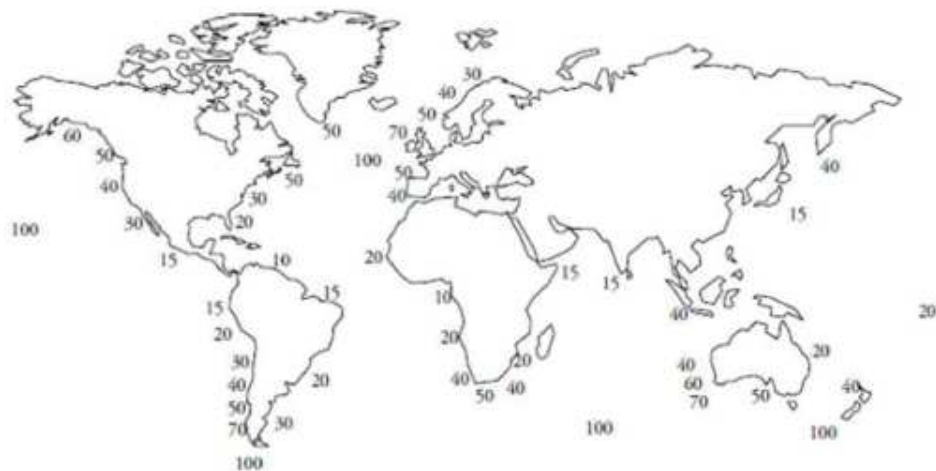


Figura 2.3 - Livelli medi di energia delle onde a livello globale (kW/m) [2]

Sulle coste italiane il mar Adriatico presenta un valore medio di energia delle onde di circa 2 kW/m, il mar Jonio e il Tirreno medio hanno valori medi di circa 3 kW/m e il Tirreno inferiore di circa 4 kW/m. Sulla costa nord occidentale della Sardegna si raggiungono circa 9 kW/m. In Figura 2.3 sono rappresentati a titolo di esempio i valori medi indicativi sulle coste italiane. [2]



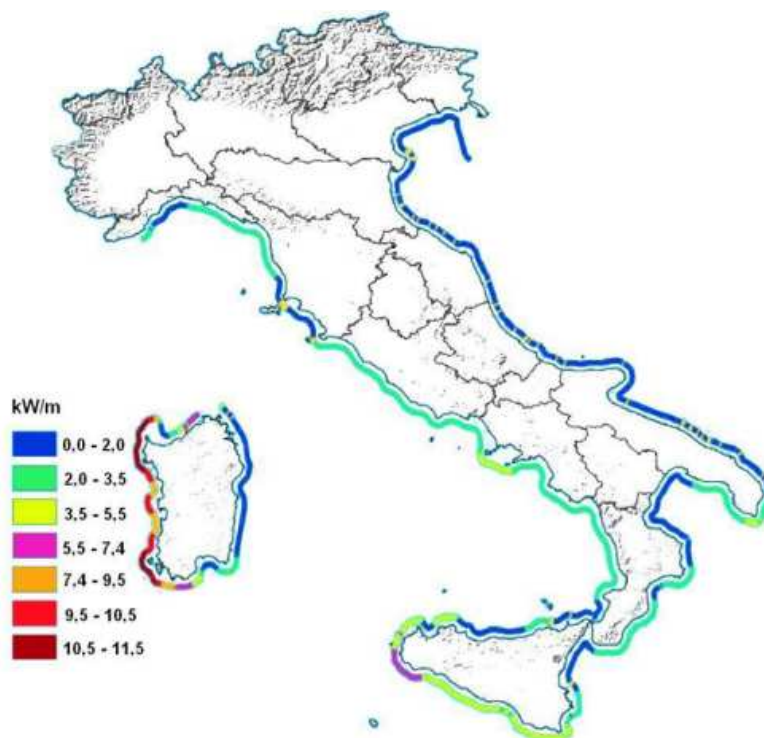


Figura 2.4 - Livelli medi di energia delle onde sulle coste italiane [2]

Da queste considerazioni è chiaro quanto sia difficile ma, d'altra parte, quanto sia rilevante una corretta valutazione della risorsa energetica delle onde. Una valutazione globale precisa sarebbe utile per capire l'effettiva possibilità legata all'assorbimento di energia delle onde, inoltre sono necessari studi adeguati sulle caratteristiche energetiche locali nella procedura di progettazione degli impianti WEC.

L'energia del moto ondoso presenta diversi vantaggi rispetto ad altre fonti rinnovabili:

- maggiore diffusione e densità di energia;
- minore variabilità oraria e giornaliera;
- maggiore continuità del fenomeno.

A fronte di questi vantaggi, l'energia del moto ondoso presenta delle limitazioni nel suo utilizzo, in particolare:

- irregolarità dell'ampiezza, della fase e della direzione del moto;
- elevato carico strutturale in caso di condizioni meteorologiche estreme.

Aspetti, questi ultimi, che rendono veramente complessa la progettazione di strutture per lo sfruttamento di questa fonte di energia. Infatti il principale problema del recupero di energia da moto ondoso risulta essere proprio il mare stesso, in quanto la differenza tra le sollecitazioni medie e quelle più alte che il dispositivo dovrebbe sostenere è troppo grande ed è difficile prevedere accuratamente l'energia che sarà disponibile nel lungo periodo a causa dei pochi dati in possesso.



## 2.3 Estrazione di energia dalle onde

Tra i vari progetti studiati e realizzati nel corso di questi anni vi sono anche quelli riguardanti l'ambito marittimo. In particolare si parla di convertitori di energia ondosa.

Sono stati ideati molti dispositivi WEC, di cui diversi sperimentati in scala ridotta e alcuni anche in piena scala in mare. Generalmente vengono classificati in base alla posizione rispetto alla costa in cui sono installati; una seconda classificazione si basa sul loro principio di funzionamento.

In base alla posizione rispetto alla costa, i dispositivi WEC si distinguono in:

- shore-line, installati sulla linea di costa;
- near-shore, in acque poco profonde in prossimità della costa;
- off-shore, in mare aperto.

I dispositivi shore-line, possono essere installati sulla costa, sul fondale marino in acque basse oppure integrati in strutture frangiflutti portuali. Data la loro semplicità, sono tra i primi WEC progettati, per questo vengono anche chiamati di prima generazione. Solitamente lavorano con onde di minore potenza media rispetto ai WEC che sfruttano le maree al largo, ma grazie alla giusta conformazione del fondale marino legata al particolare flusso di acque basse, si può favorire una notevole concentrazione di energia ondosa.

I dispositivi near-shore, o di seconda generazione, che possono sfruttare la maggiore ampiezza delle onde, sono installati in una fascia di transizione tra qualche centinaio di metri fino a qualche chilometro dalla riva. Sono pensati per funzionare a diverse profondità tra i 10 e i 30 metri, garantendo una captazione maggiormente efficace, al contrario dei dispositivi galleggianti che generalmente presentano anche un maggiore impatto visivo e ambientale.

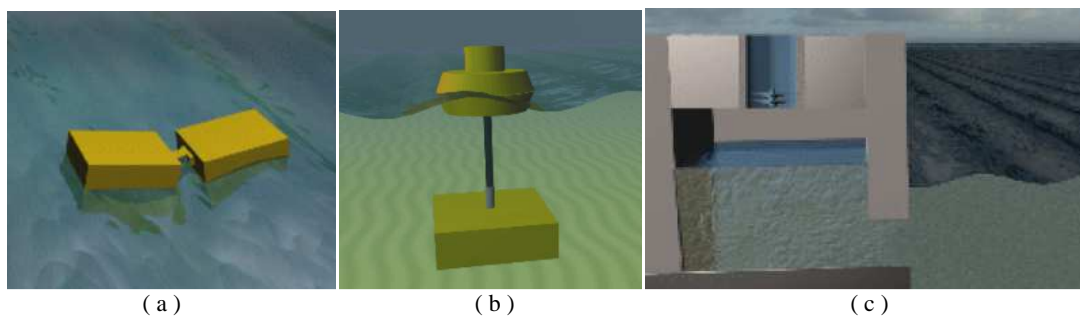
Gli off-shore sono sicuramente i dispositivi che danno risultati migliori e promettenti in termini di efficienza di recupero di energia e anche di impatto ambientale.

Vengono collocati a oltre 40 metri dalla costa e possono sfruttare la maggior energia delle onde in mare aperto. Possono essere dispositivi galleggianti o sommersi, motivo per cui risultano meno impattanti per l'ambiente e l'ecosistema marino.

Di contro, in mare aperto risultano esserci condizioni ambientali più difficili e la connessione elettrica tramite cavo sottomarino può risentire di parecchie perdite, perciò si cerca di realizzare impianti che producano grosse quantità di energia dell'ordine dei MW per molte unità dislocate a schiera.

In base al loro principio di funzionamento, si presentano di seguito i dispositivi WEC più comuni, osservandoli in Figura 2.5:

- a) Attenuatori;
- b) Point absorber;
- c) Colonna d'acqua oscillante (OWC - Oscillating Water Column).



**Figura 2.5 - Tipologie di dispositivi WEC: attenuatori ( a ), point absorber ( b ) e colonna d'acqua oscillante ( c ) [8]**

Un attenuatore (Figura 2.5 a) è un dispositivo galleggiante che opera parallelamente alla direzione dell'onda e le cavalca efficacemente. Questi dispositivi sono composti da più segmenti collegati tra loro per una lunghezza complessiva maggiore o uguale alla lunghezza d'onda. Questi dispositivi catturano energia dal moto relativo dei due bracci mentre l'onda li attraversa, andando ad attivare delle pompe. Quest'ultime riforniscono degli accumulatori e da qui un fluido pressurizzato aziona dei generatori per la produzione di energia elettrica.

Il Point absorber (Figura 2.5 b) è un dispositivo relativamente piccolo rispetto ad altri tipi di WEC. Esso è formato da una struttura galleggiante che assorbe energia da tutte le direzioni attraverso i suoi movimenti sulla superficie dell'acqua.

Converte il movimento della parte superiore galleggiante rispetto alla base, in energia elettrica. Sono in genere di forma cilindrica per avere un grado di movimento maggiore, perpendicolare alla superficie dell'acqua. Generalmente hanno un diametro significativamente più piccolo di una lunghezza d'onda.

Gli OWC o dispositivi a colonna d'acqua oscillante (Figura 2.5 c) si basano sull'azione di una colonna d'acqua oscillante all'interno di una camera chiusa nella parte superiore e in collegamento con il mare in quella inferiore. Per azione del moto ondoso la colonna d'acqua oscilla verticalmente, comprimendo ciclicamente il cuscinetto d'aria sovrastante, e convogliando il flusso d'aria pulsante attraverso un condotto. Il moto pulsante dell'aria nel condotto può azionare una turbina e generare energia elettrica. [2]

## 2.4 Panoramica sui WEC

Vengono riportati di seguito tre esempi di WEC diversi per tipologia e punto di utilizzo. Per alcuni di essi si approfondiranno meglio le modalità di funzionamento per altri quelle di controllo.

### 2.4.1 Attenuatore Pelamis

Il Pelamis, appartenente alla tipologia degli attenuatori, è uno dei WEC più evoluti ed innovativi, è una struttura off-shore, installata tipicamente tra i 2 e i 10 Km dalla costa, opera con profondità maggiori di 50 m e produce una potenza nominale pari a 750kW.

La struttura del Pelamis (Figura 2.6) ricorda quella di un serpente marino, da cui prende il nome, esso è composto da quattro corpi principali e tre articolazioni.

I giunti sono i componenti principali in cui viene generato il lavoro meccanico. Al picco dell'onda, due corpi saranno ad angoli diversi. Mentre l'onda continua a muoversi, l'angolo continua a cambiare. Le connessioni tra i corpi sui giunti, che sono i componenti di un sistema idraulico, mettono in movimento un sistema PTO di pistoni idraulici, che si oppongono al moto ondoso e pompano il fluido in accumulatori ad alta pressione, permettendo una generazione omogenea e continua. Di solito, ci sono 4 pistoni su ciascun giunto, due sul lato superiore e due sul fondo. Questi pistoni sono collegati a un generatore che produce l'energia elettrica desiderata.

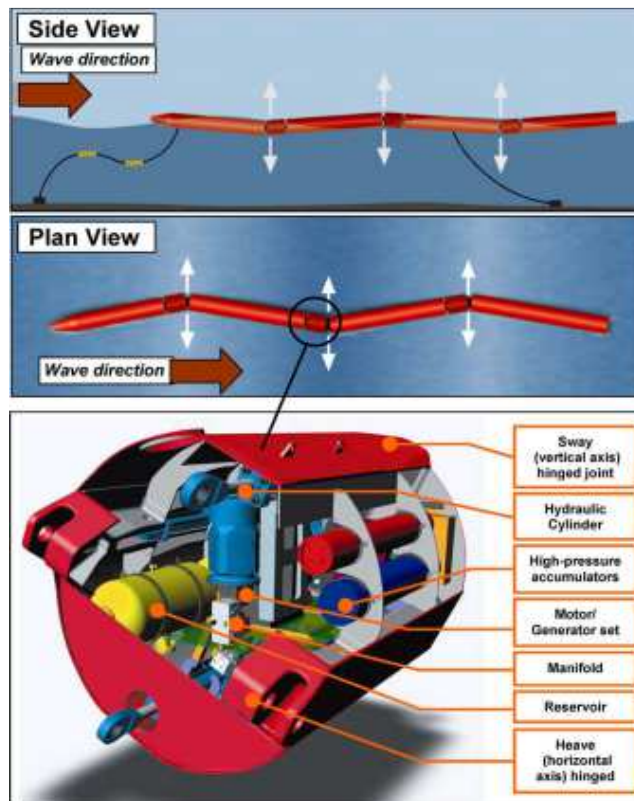


Figura 2.6 - Attenuatore Pelamis, schema di funzionamento e componenti [9]

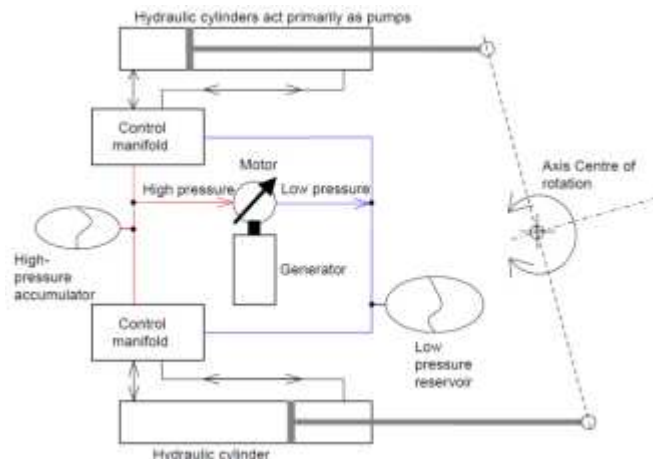


Figura 2.7 - Sistema di controllo dell'attenuatore Pelamis [9]

La Figura 2.7 mostra il sistema di controllo di un convertitore di energia Pelamis. Come per il movimento delle onde, la pressione aumenta da un lato mentre diminuisce dall'altro.

Il primo prototipo Pelamis funzionante è stato installato nel 2004 presso l'European Marine Energy Center (EMEC) in Scozia. E' stato il primo dispositivo Off Shore al mondo ad immettere elettricità in una rete nazionale.

## 2.4.2 Point absorber con controllo MPPT

Si vuole studiare il controllo di un point absorber controllato tramite inseguimento del punto di massima potenza (MPPT: Maximum Power Point Tracking).

Questa strategia può essere applicata alla generazione da onde marine, anche se viene utilizzata soprattutto nell'industria del fotovoltaico e dell'eolico, ma si stanno avendo risultati promettenti anche nel campo dei WEC.

Nel settembre del 2008, la Oregon State University (OSU) ha testato un convertitore di tipo point absorber nell'oceano. È stato sviluppato un sistema PADA (Power Analysis and Data Acquisition), come si può osservare in Figura 2. 8 esso è basato principalmente su due componenti di elettronica di potenza: un front-end di raddrizzatore trifase attivo e un convertitore buck di uscita. Il raddrizzatore trifase è collegato al dispositivo in prova trasferendo la potenza al DC link, dove è collegato il convertitore buck. Quest'ultimo controlla l'alimentazione di un carico resistivo fisso. Il comando degli interruttori del convertitore buck e del front-end del raddrizzatore attivo è fornito da un sistema di controllo rapido Opal-RT PC / 104, che gestisce anche tutta la registrazione dei dati. [10]

Il convertitore buck o convertitore step-down produce una tensione di uscita media inferiore rispetto alla tensione di ingresso continua  $V_d$ . Avendo  $V_0$  come tensione di uscita, il rapporto di funzionamento del convertitore buck  $D$  è pari a:

$$D = \frac{V_0}{V_d}; \quad (2.2)$$

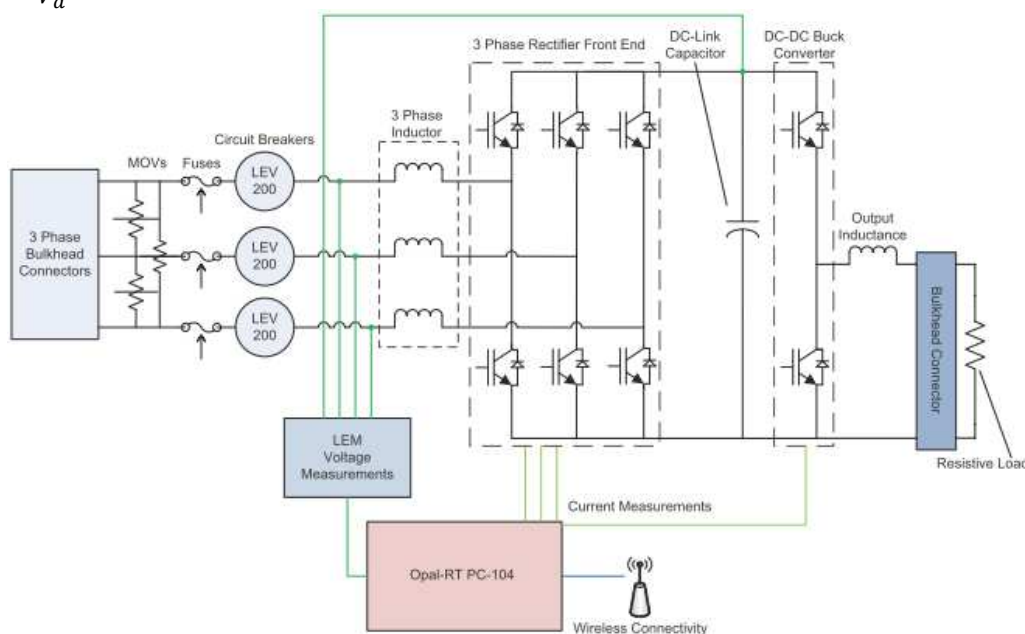


Figura 2.8 - Schema di funzionamento del PADA

Un diagramma Matlab / Simulink dell'algorithmo MPPT è mostrato in Figura 2. 9. In ingresso al sistema di controllo si trova la potenza di ingresso media, avviene subito il filtraggio utilizzando un filtro Butterworth del secondo ordine con la frequenza di taglio impostata sulla frequenza della costante di tempo MPPT. Il "rate transition" (blocco di transizione) della frequenza campiona quindi questa potenza di ingresso media nell'intervallo di tempo della costante di tempo MPPT e viene confrontato con il valore della fase precedente dal blocco di ritardo dell'unità. L'algorithmo confronta la potenza di ingresso media corrente con  $P_{ADA}$  (ovvero, potenza di uscita del WEC),  $w_{Cur}$ , con la potenza di ingresso media dell'intervallo di tempo precedente,  $w_{Old}$ . Il controllo è basato sul fatto che la potenza media in ingresso può:

- aumentare, quindi  $pDir$  sarà positiva
- diminuire, di conseguenza  $pDir$  sarà negativa

Di conseguenza, nel primo caso è chiaro che il rapporto  $D$  stia permettendo un aumento della produzione di energia, quindi  $dDir$  rimane invariata. Nel caso contrario  $dDir$  cambierà segno per permettere una produzione di potenza maggiore. Il prodotto dell'attuale  $pDir$  e del precedente  $dDir$  produce la direzione di cambiamento nel rapporto di funzionamento del convertitore buck. Il rapporto di lavoro in uscita viene quindi aumentato o diminuito di conseguenza di un valore predeterminato, tramite il  $ControlStep$  che regola il rapporto di funzionamento  $D$  del convertitore buck e in questo modo fornisce un feedback al controllo.

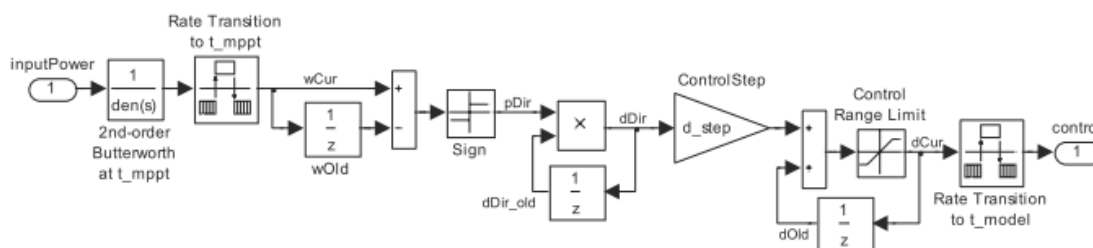


Figura 2.9 - Modello simulink per l'algorithmo MPPT [10]

La tecnica descritta è da ritenere un metodo P&O (Perturbation and observation) largamente usato nell'approccio all'MPPT. In questo metodo il controller regola la tensione di una piccola quantità dall'ingresso dati e misura la potenza; se la potenza aumenta, vengono provate ulteriori regolazioni in quella direzione fino a quando la potenza non aumenta più. Questo è chiamato il metodo perturbare e osservare ed è il più comune, sebbene questo metodo possa provocare oscillazioni della potenza erogata.

Osservando i dati delle prove descritte, dimostrano che le costanti di tempo devono essere dello stesso ordine di grandezza o più grande del periodo d'onda medio al fine di ottenere risultati ottimali. Questi hanno anche mostrato la versatilità dell'algorithmo MPPT per essere in grado di integrarsi con varie variabili di controllo.

La logica osservata nella tecnica appena esposta potrebbe essere testata nel nostro sistema. Si potrebbe valutare come varia la velocità, e quindi, la potenza in due istanti successivi:

- se la potenza cresce si controlla la forza come fatto nell'intervallo precedente;
- in caso contrario si fa una variazione nell'istante precedente.

Qualora si riuscisse a implementare un controllo del genere probabilmente si otterrebbero risultati soddisfacenti dal punto di vista energetico, ma è difficile stimare altrettanto in termini di attenuazione dell'onda. Anche perché i test appena citati si sono svolti col solo fine energetico e senza poter stimare l'onda trasmessa. In Figura 2.10 si mostrano i risultati di potenza generata dell'esperienza descritta, in funzione del parametro D.

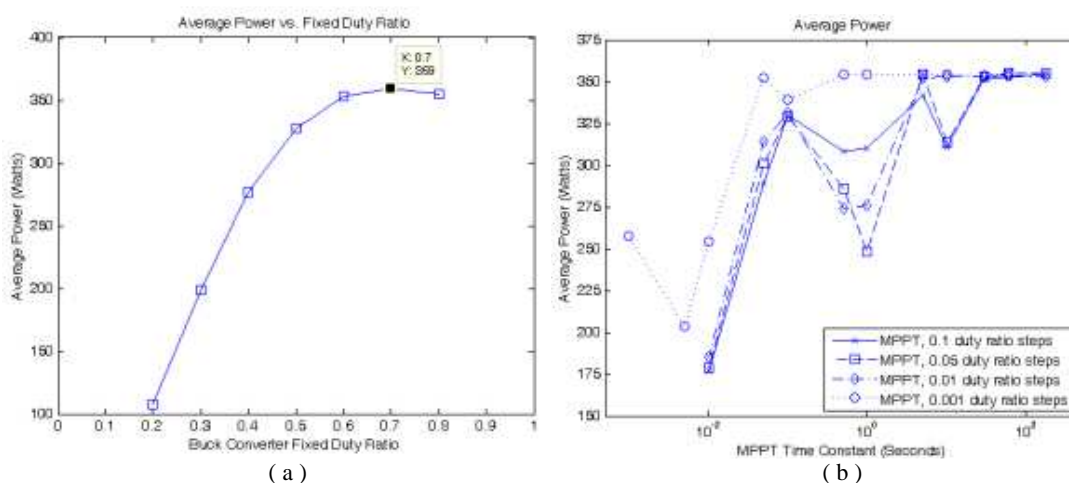


Figura 2.10 - Risultati dei test eseguiti tramite controllo MPPT in termini di potenza media [W]: in funzione del parametro D (a) e in funzione della costante di tempo MPPT e per D vari (b)

### 2.4.3 OWC

I dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC, sono stati ampiamente sperimentati in condizioni reali di funzionamento e si può ritenere che non siano lontani dalla maturità nel mercato, anche se restano ancora da risolvere diversi problemi di carattere tecnico e da approfondire diversi aspetti scientifici.

In particolare, sono stati compiuti grandi sforzi in Spagna attraverso il progetto Nereida MOWC. Lo scopo di questo progetto, promosso dall'Agenzia energetica basca (EVE), è dimostrare la fattibilità della tecnologia OWC con l'avvio della potenza della turbina Wells in un frangiflutti di nuova costruzione a Mutriku, sulla costa settentrionale della Spagna. È costituito da 16 turbine da 18,5 kW che forniscono una potenza totale di 296 kW, con una capacità di produzione stimata di 600.000 kWh all'anno. [11]



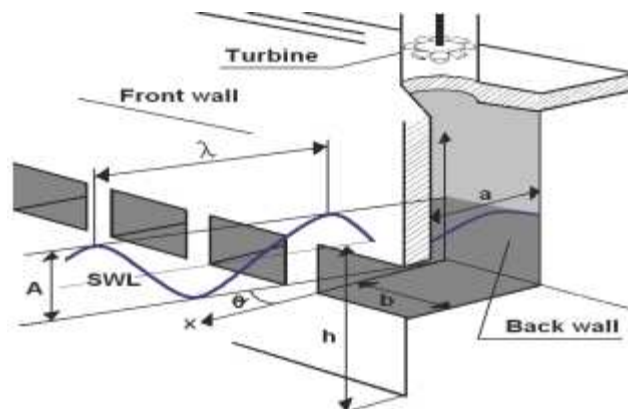


Figura 2.11 - Schema di funzionamento del OWC di Mutriku [11]

In Figura 2.11 si può osservare come venga convertita l'energia meccanica delle onde in energia elettrica mediante una camera di cattura e un modulo turbo-generatore. Questa camera di cattura è costituita da una struttura fissa la cui parte inferiore è aperta verso l'acqua e rimane sempre al di sotto del livello del mare. Sono generalmente realizzati in cemento o acciaio, per resistere alla forza distruttiva del mare; la struttura a causa delle onde in arrivo, applica una forza comprimendo ciclicamente il cuscino d'aria sovrastante, e convogliando il flusso d'aria pulsante attraverso un condotto. Ciò crea una differenza di pressione tra i due lati della turbina che la mette in moto. Il modulo turbogeneratore compone il sistema di presa di forza (PTO) ed è costituito dalla turbina e da un generatore a induzione (solitamente DFIG). La sua funzione è quella di trasformare la caduta di pressione oscillatoria in energia elettrica. A tal fine, possono essere applicate diverse strategie di controllo. Al contrario degli altri esempi si tratta di una struttura fissa shore-line: i vantaggi di questa soluzione si basano sui facili processi di installazione e manutenzione, che non richiedono ormeggi profondi e lunghi cavi sottomarini; d'altra parte, l'energia delle onde vicino alla costa risulta più bassa.

## 2.5 Sistema di controllo

L'idea principale della procedura di controllo si basa sull'imposizione di un determinato comportamento nel sistema che, diversamente dalle maggior parte delle applicazioni industriali, deve adattarsi alle mutevoli condizioni ambientali per ottimizzare l'efficienza di conversione. Deve inoltre rimanere immune da fonti di disturbo interno o esterno di varia natura.

Questo controllo può essere effettuato in diversi modi e con molteplici scopi; per esempio, una soluzione potrebbe essere quella di forzare il corpo oscillante ad abbinare la propria frequenza in risonanza con la frequenza dell'onda incidente, coprendo in questo modo un intervallo più ampio di frequenza di risonanza, migliorando così la conversione di energia.

In generale, per progettare al meglio una strategia di controllo si applica una forza di controllo al dispositivo. Il dispositivo che impone una forza di controllo è definito "attuatore" e il corpo, oggetto di questo controllo, è definito "impianto" (plant). Per definire la quantità corretta di forza da applicare all'impianto, è necessario raccogliere alcune misurazioni, ad esempio la misurazione in tempo reale della posizione o della forza di eccitazione. Questi dati raccolti servono come "feedback" e

il calcolo dell'errore tra la misura effettiva e quella assunta come riferimento fornisce un'indicazione all'attuatore sulla corretta forza di controllo da applicare.

Altrimenti, se non viene considerato alcun feedback, la procedura di controllo non può seguire la condizione attuale, agendo come conseguenza di ciò, ma può essere implementata solo assumendo un modello matematico o altre forme di conoscenza precedente. Questo particolare approccio è definito "sistema a circuito aperto" e una schematizzazione di quanto appena descritto è riportata nella Figura 2.12 (a).

D'altra parte, se i feedback vengono utilizzati per tenere conto delle condizioni attuali e per far funzionare un controllo, di conseguenza si parla di "sistema a circuito chiuso".

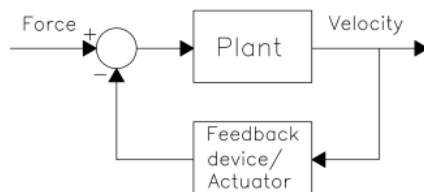
Lo scopo principale di un sistema a circuito chiuso è di minimizzare l'errore tra la misura di riferimento e quella effettiva, e ciò può essere visto nella somma e nella differenza presenti nel circuito dello schema della Figura 2.12 (b). In questo schema la sottrazione rappresenta la differenza tra la misura desiderata ed effettiva e la somma viene fatta tra la forza esterna e quella di input.

Nella Figura 2.12 sono descritti questi due tipi di processo considerando un diagramma di flusso a blocchi; in particolare ogni blocco rappresenta un elemento funzionale, mentre ogni scambio di forza o informazione è rappresentato da una freccia. In questo caso specifico l'informazione data è una forza, imposta al sistema per ottenere la velocità desiderata.

In generale è possibile riconoscere due tipi di sistemi che si verificano all'interno dell'entità blocco: un "sistema statico" e uno "dinamico". Quando si verifica un blocco di sistema statico, è possibile effettuare una proporzione semplice moltiplicando l'ingresso con un valore costante, avendo in questo modo un'uscita proporzionale e in fase. D'altra parte nella realtà, dove i sistemi dinamici sono quelli di interesse, non è possibile semplicemente moltiplicarlo per una costante e l'azione di blocco deve essere rappresentata da una quantità complessa che è funzione della frequenza. In particolare, quando il sistema può essere assunto come lineare (per un sistema molla-smorzatore: la velocità della molla, lo smorzamento e la massa sono assunti come costanti e quando la forza esterna non è influenzata dalla deviazione, dalla velocità e dall'accelerazione) e assumendo la condizione iniziale di deviazione e velocità pari a zero, è possibile sfruttare la tecnica di trasformazione di Laplace.



(a)



(b)

Figura 2.12 - Diagramma a blocchi del funzionamento del ciclo aperto (a) e ciclo chiuso (b) [12]



## 2.5.1 Definizioni e terminologia di controllo PID

Il processo di progettazione del controllo inizia con la definizione dei requisiti di prestazione. Le prestazioni del sistema di controllo vengono spesso misurate applicando una funzione di passo come variabile di comando del set point e quindi misurando la risposta della variabile di processo. Comunemente, la risposta viene quantificata misurando le caratteristiche della forma d'onda definite.

- **"Rise Time"** è il tempo impiegato dal sistema per passare dal 10% al 90% del valore di stato stazionario o finale.
- **"Percent Overshoot"** è la quantità che la variabile di processo ha superato il valore finale, espressa come percentuale del valore finale.
- Il **tempo di assestamento** ("settling time") è il tempo necessario affinché la variabile di processo si stabilisca entro una certa percentuale (comunemente il 5%) del valore finale.
- **Errore di stato stazionario** ("Steady-State Error") è la differenza finale tra la variabile di processo e il set point.

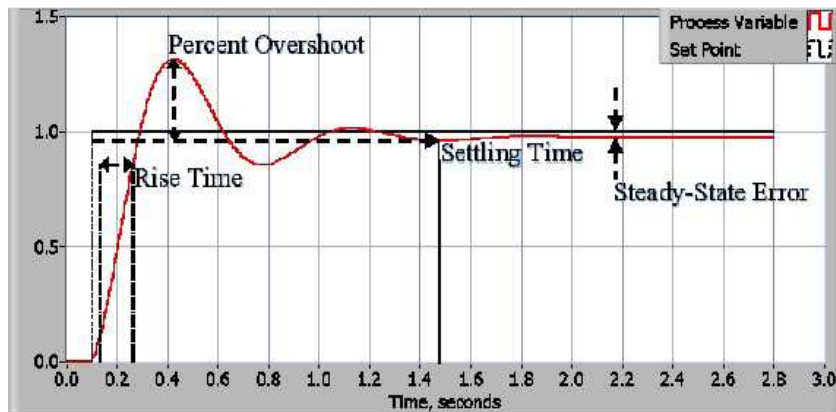


Figura 2.13 - Risposta di un tipico sistema a circuito chiuso PID [13]

Dopo aver utilizzato una o tutte queste quantità per definire i requisiti di prestazione per un sistema di controllo, è utile definire le condizioni peggiori in cui ci si aspetta che il sistema di controllo soddisfi questi requisiti di progettazione. Spesso, c'è un disturbo nel sistema che influenza la variabile di processo o la misurazione della variabile di processo. È importante progettare un sistema di controllo che funzioni in modo soddisfacente nelle peggiori condizioni. La misura di quanto il sistema di controllo sia in grado di superare gli effetti delle interferenze è indicato come rifiuto del disturbo del sistema di controllo.

In alcuni casi, la risposta del sistema a un dato output di controllo può cambiare nel tempo o in relazione ad alcune variabili. Un sistema non lineare è un sistema in cui i parametri di controllo che producono una risposta desiderata in un punto operativo potrebbero non produrre una risposta soddisfacente in un altro punto operativo. Ad esempio, una camera parzialmente riempita di fluido mostrerà una risposta molto più rapida all'uscita del riscaldatore quando è quasi vuota rispetto a quando sarà quasi piena di fluido. La misura di quanto bene il sistema di controllo tollererà i disturbi e le non linearità è indicata come la robustezza del sistema di controllo.

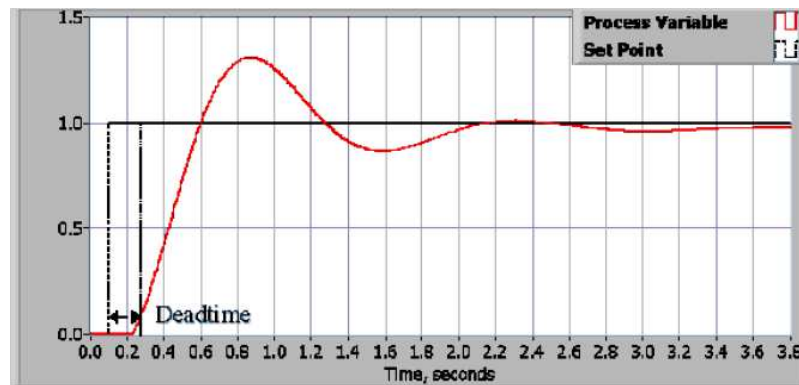


Figura 2.14 - Risposta di un tipico sistema a circuito chiuso PID con tempo morto [13]

- Alcuni sistemi mostrano un comportamento indesiderato chiamato **tempo morto**. Il "Deadtime" è un ritardo tra quando una variabile di processo cambia e quando tale modifica può essere osservata. Ad esempio, se un sensore di temperatura è posizionato lontano da una valvola di ingresso del fluido dell'acqua fredda, non misurerà immediatamente un cambiamento di temperatura se la valvola viene aperta o chiusa. Il tempo morto può anche essere causato da un attuatore di sistema o di uscita che è lento a rispondere al comando di controllo, ad esempio una valvola che è lenta da aprire o chiudere. Una fonte comune di tempo morto negli impianti chimici è il ritardo causato dal flusso di fluido attraverso i tubi.
- Il **ciclo del "loop"** è anche un parametro importante di un sistema a circuito chiuso.
- L'intervallo di tempo tra le chiamate a un algoritmo di controllo è il **tempo di ciclo del "loop"**. I sistemi che cambiano rapidamente o hanno un comportamento complesso richiedono velocità di loop di controllo più veloci.

Una volta specificati i requisiti di prestazione, è il momento di esaminare il sistema e selezionare uno schema di controllo appropriato. Nella stragrande maggioranza delle applicazioni, un controllo PID fornirà i risultati richiesti.

### 2.5.2 Risposta proporzionale, integrativa e derivativa

La componente proporzionale dipende solo dalla differenza tra il set point e la variabile di processo. Questa differenza viene definita come il termine Errore. Il guadagno proporzionale ( $K_c$ ) determina il rapporto tra la risposta in uscita e il segnale di errore. Se il guadagno proporzionale è troppo grande, la variabile di processo inizierà a oscillare. Se  $K_c$  viene ulteriormente aumentato, le oscillazioni diventeranno più grandi e il sistema diventerà instabile e potrebbe persino oscillare senza controllo. La componente integrale  $K_I$  somma il termine dell'errore nel tempo. Il risultato è che anche un piccolo errore causerà un aumento lento del componente integrale. Mentre la componente derivativa  $K_D$  fa diminuire l'uscita se la variabile di processo aumenta rapidamente. La risposta derivata è proporzionale alla velocità di variazione della variabile di processo. Per approfondimenti sull'argomento consultare l'appendice A.

Preso una generica funzione di trasferimento  $u(t)$  la legge di controllo del PID si può così scrivere:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}; \quad (2.3)$$

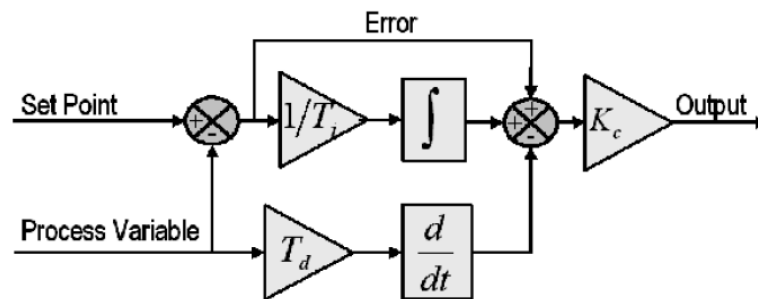


Figura 2.15 - Diagramma a blocchi di un tipico algoritmo PID [9]

## 3 Strumentazione utilizzata e relativa installazione

Nel presente capitolo viene presentata una descrizione della procedura di installazione e costruzione di tutti i dispositivi utilizzati. Nella prima parte si descriverà l'apparato elettrico/elettronico e la relativa installazione, in particolare: motore, inverter, CompactRio e apparato elettronico, software LabView utilizzato per controllare il sistema.

A seguire si parlerà del modello fisico: corpo oscillante; canale d'onda e suoi componenti, e infine, una descrizione di come questi componenti comunichino tra loro. L'implementazione del modello fisico e i test eseguiti sul corpo oscillante sono stati sviluppati nel Laboratorio marittimo dell'Università degli Studi di Padova.

### 3.1 Introduzione alla logica di controllo

Prima di approcciarci alla spiegazione dei vari componenti, è utile dare una breve spiegazione della logica di controllo, il tutto verrà approfondito durante il capitolo.

È possibile schematizzare, con un diagramma di flusso, la relazione esistente tra gli elementi del sistema, come riportato nella Figura 3.1.

Le onde indurranno movimenti sul galleggiante, che vengono rilevati dalle sonde utilizzate che daranno vita a dei segnali input di forza e posizione; queste verranno inviate al software LabView. Il software tiene conto del valore registrato dalla sonda di posizione o dalla cella di carico e lo confronta con il valore di riferimento definito come set point, imposto dall'utente come input, secondo la procedura di controllo progettata.

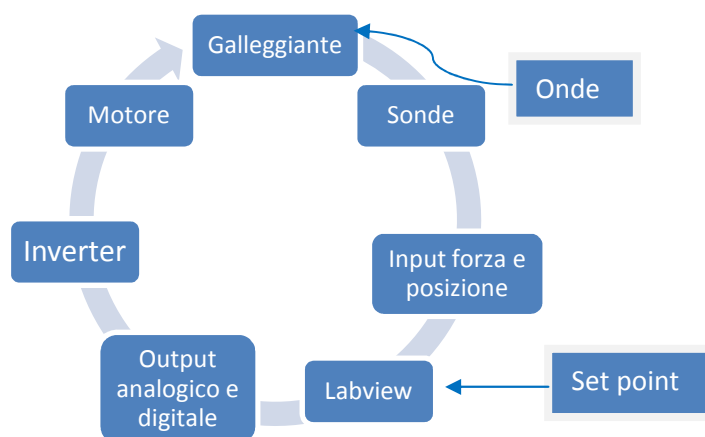


Figura 3.1 - Schema di funzionamento e interazione tra elementi coinvolti in qualsiasi strategia di controllo per il galleggiante.

Effettuato il controllo dal software, esso invia all'inverter due tipi di segnali:

- Un output analogico in volt che corrisponde ad un comando di modulo della velocità.
- Un output digitale che segnala il verso di marcia del motore.

Elabora questi segnali fornendo all'azionamento la forza adeguata che deve essere data dal motore al galleggiante per raggiungere un determinato set point. A questo punto il corpo fluttuante si muove, o mantiene la posizione, secondo queste informazioni. Il ciclo poi può ripetersi, con una nuova misurazione delle condizioni del galleggiante.

## 3.2 Strumentazione elettrica ed elettronica

Si presenta la strumentazione elettrica ed elettronica utilizzata e il relativo assemblaggio hardware con prova a vuoto e descrizione del cablaggio tra le varie attrezzature utilizzate.

### 3.2.1 Motore asincrono e inverter

Per questa esperienza si è scelto di utilizzare un motore asincrono trifase a gabbia di scoiattolo. Questo motore è stato scelto per la sua economicità, robustezza e semplicità di controllo. In particolare è stato scelto da catalogo con caratteristiche adeguate per il pilotaggio tramite un inverter già a disposizione del laboratorio di Macchine Elettriche. Si presentano in Tabella 3.1 i valori di targa del motore asincrono trifase "ABB" del tipo M3AA-71B-4 come da catalogo. Si può osservare il motore in Figura 3.2 a.

Conn	Freq	Voltage	Power	Speed	Current	Power Factor	Efficiency	Torque
Y	50 Hz	400 V	0.37 kW	1375 r/min	0.96 A	0.790	69.70 %	2.50 N·m

Tabella 3.1 - Dati di targa motore asincrono [14]

Un inverter è un apparato elettronico che ha la funzione di trasformare una corrente continua (DC), in corrente alternata (AC) a una determinata tensione e frequenza. È di fondamentale importanza per controllare al meglio la velocità del motore, nello specifico: l'inverter in dotazione è un prodotto "Control techniques" UNIDRIVE 1405 da 4 kW. Esso può essere configurato per varie applicazioni a ciclo aperto o chiuso, mette a disposizione cinque diverse macro di programmazione e la possibilità di comandare il tutto direttamente da tastiera sul pannello anteriore dell'azionamento (come si può vedere dalla Figura 3.2 b) oppure tramite la modalità terminale, ovvero l'invio di segnali dai contatti elettrici, dal controllore di un sistema agli ingressi digitali e analogici dell'azionamento. Da tastiera è possibile variare cinquanta parametri riguardanti informazioni del motore collegato, tipologia di controllo desiderata e visualizzazione di informazioni.



(a)



(b)

Figura 3.2 - Motore asincrono (a) e inverter UNIDRIVE 1405 (b) utilizzati

### 3.2.2 Assemblaggio motore/inverter con prova a vuoto

Il cablaggio tra motore ed inverter è stato effettuato seguendo la guida di installazione attraverso lo schema fornito in Figura 3.3. Le principali caratteristiche del cablaggio sono:

- 1-2 → Alimentazione in corrente alternata a 400 V con massa;
- 3 → tre fusibili da 16 Ampere per proteggere la strumentazione dalle sovracorrenti e interruttore magnetostatico per la possibilità di chiudere collegamento tra inverter e motore;
- 4 → cavi in PVC di almeno  $2,5 \text{ mm}^2$  di sezione;
- 5 → Per il collegamento tra azionamento e motore si utilizza un cavo a quattro conduttori. Il conduttore di massa nel cavo del motore deve essere unicamente collegato ai terminali di messa a terra dell'azionamento e del motore stesso;
- 6 → Collegamento a massa del telaio del motore.

Grazie a questo settaggio si è potuti procedere all'avvio del motore, in prova a vuoto, per verificare l'effettivo funzionamento. Immettendo i dati di targa richiesti del motore e selezionando la modalità "open loop", "controllo f/V" e disabilitando gli allarmi utilizzando semplicemente la "modalità tastiera".

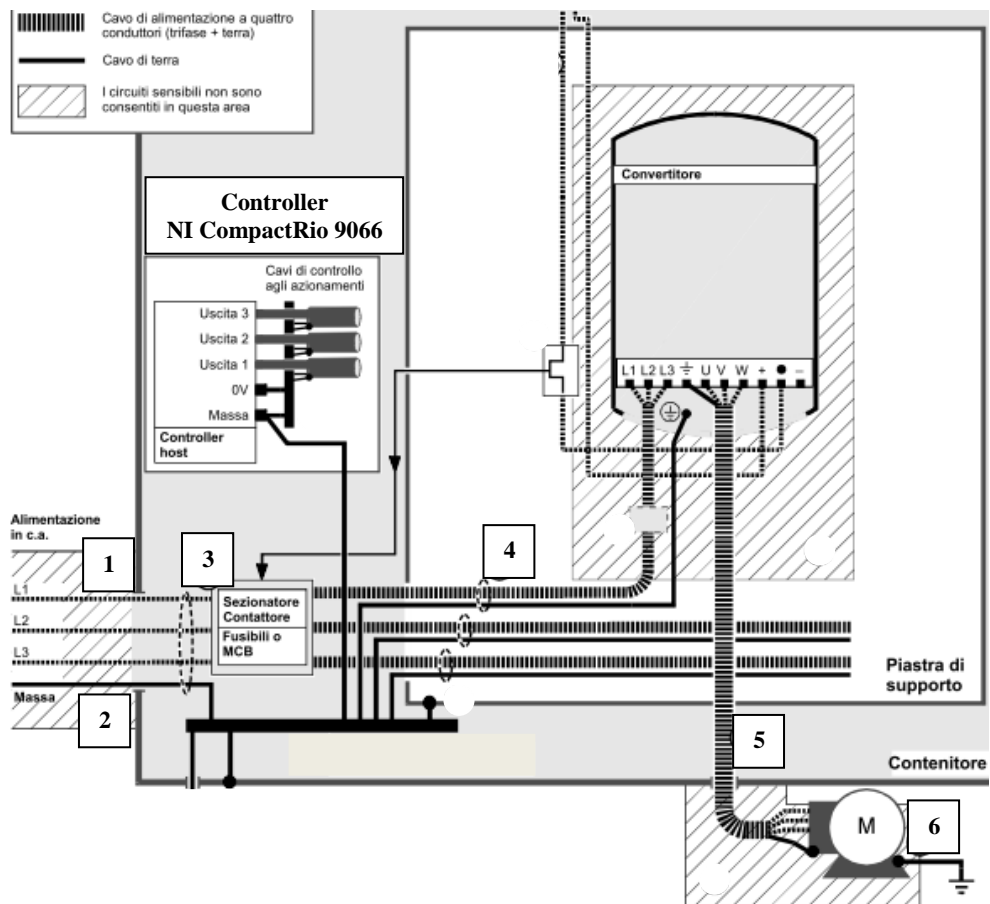


Figura 3.3 - Istruzioni per il cablaggio dell'inverter Unidrive 1405 [15]

### 3.2.3 Controller NI CompactRio e moduli I/O

Per poter meglio controllare l'inverter e quindi il motore si necessita di un controller che metta in comunicazione l'inverter con il software LabView, che si osserverà successivamente.

Si utilizza un controller National Instrument CompactRIO-9066 a 8 slot, 667 MHz di CPU dual-core, 256 MB di DRAM, 512 MB di memoria è un controller embedded ideale per applicazioni di controllo e monitoraggio [16]. Il controller software-designed include un processore real-time offre ampie opzioni di connettività, una porta Ethernet, una USB host, una USB device e una seriale. Per l'alimentazione si è usato NI PS-15 Power Supply, con 24V di alimentazione perfettamente abbinabile al CompactRIO. Ideale per questo lavoro in quanto immune da interferenze elettromagnetiche.

Agli 8 slot si possono connettere moduli I/O (Ingresso/Uscita) che daranno la possibilità di trattare i segnali analogici/digitali al meglio. I moduli sono stati scelti per le loro particolari funzionalità. I moduli di ingresso possono essere analogici o digitali (AI o DI) servono a leggere i segnali provenienti dalle sonde. Successivamente all'elaborazione software i moduli di uscita (AO o DO) chiudono il controllo comandando l'inverter per modificare l'azione del motore. I moduli utilizzati in questo lavoro sono qui di seguito elencati e descritti brevemente:

1. NI 9421 - Modulo DI serie C con 8 canali (affondamento di ingresso), 24 V, 100  $\mu$ s. Questo modulo non è utilizzato durante i test principali, ma essendo

una scheda di ingresso digitale è stata usata per testare la scheda di output digitale NI9472. Ogni canale è compatibile con il livello logico a 24 V e include un LED che indica lo stato del canale; fornisce inoltre un isolamento tra il canale di ingresso e la messa a terra elettrica;

2. NI 9263 - Modulo AO, serie C a 4 canali, 100 kS / s / canale,  $\pm 10$  V. È un modulo di uscita analogica con aggiornamento real time. La scheda viene utilizzata per inviare dei segnali analogici in volt all'inverter, lavora da 0 a 10 V, che risultano proporzionali alla velocità del motore. Essa include anche una barriera, per avere doppio isolamento con messa a terra elettrica, consentendo una maggiore sicurezza e isolamento acustico;
3. NI 9237 - Modulo AI Strain / Bridge serie C con 4 canali, ingresso bridge analogico, 50 kS / s / canale. Include il condizionamento del segnale necessario per alimentare e misurare simultaneamente fino a quattro sensori a quarto di ponte. Il modulo fornisce misure di carico o di sforzo con ritardo di fase nullo fra i canali. È utilizzato per tenere conto delle misurazioni della cella di carico per le sue particolari caratteristiche: è in grado di fornire senza ritardi di carico e misure di sollecitazione, grazie al suo isolamento a 60 V è in grado di eliminare l'elevata presenza di rumore;
4. NI 9234 - Modulo AI della serie C di suoni e vibrazioni con 4 canali, 51,2 kS / s / canale,  $\pm 5$  V. È in grado di misurare il segnale delle sonde IEPE (Integrated Electronic Piezoelectric), come l'accelerometro e le sonde di posizione. Per il test questo modulo viene utilizzato per ottenere i dati di posizione dalla sonda LVDT.
5. NI 9205 - Modulo AI serie C con 32 canali,  $\pm 10$  V, 250 kS / s, 16 bit. Dotato di ingresso analogico a terminazione differenziale o singola, con intervallo di quattro ingressi. Garantisce una protezione da sovratensioni fino a 60 V tra il canale di ingresso e COM. Durante il test, questo modulo viene utilizzato per ottenere informazioni sulla posizione derivanti dal trasduttore di posizione.
6. NI 9472 - Modulo DO serie C con 8 canali (sorgente di uscita), 24 V, 100  $\mu$ s. Funziona con una grande varietà di interruttori, trasduttori e altri dispositivi industriali. Ogni canale è compatibile con segnali da 6 V a 30 V. Esso è utilizzato per controllare la parte digitale dell'inverter ed è essenziale per invertire la marcia del motore e per i sistemi di allarme.

Nella Figura 3.4 è riportata una foto dei moduli appena descritti inseriti all'interno del CompactRio con annessa Power supply. I moduli sono definiti dal numero dell'elenco numerato precedente, poiché sono implementati nel test eseguito e nel dispositivo di alimentazione. È possibile riassumere la funzione di questi moduli CompactRIO e le loro caratteristiche principali nella Tabella 3.2.





Figura 3.4 - CompactRio-9066 alimentato dal Power supply in cui sono inseriti i vari moduli I/O

Modulo	Tipologia	Connessione
NI 9421	DI	-
NI 9263	AO	Ingresso inverter analogico
NI 9237	AI	Cella di carico
NI 9234	AI	LVDT
NI 9205	AI	Trasduttore di posizione
NI 9472	DO	Ingresso inverter digitale

Tabella 3.2 - Riepilogo dei codici dei moduli presenti, tipo di input e connessione con la struttura

### 3.2.4 Collegamenti dei segnali di controllo

Per controllare l'inverter in modalità terminale è necessario il cablaggio con un controller, nel caso studiato il CompactRio con i moduli necessari. Si seleziona nell'inverter la Macro 0: la configurazione di default che permette controllo analogico della frequenza/velocità per applicazioni di uso generico. Può essere impiegata per il funzionamento in anello aperto o chiuso e nel Modo tastiera o terminale.

Si procede adesso al collegamento dei segnali di controllo tra inverter e moduli I/O. In Figura 3.5-a si possono osservare le morsettiere arancioni dell'inverter: quella inferiore è dedicata al cablaggio elettrico analizzato prima; la morsettiere superiore, più piccola, è dedicata ai segnali di controllo ed è dotata di 22 pin.

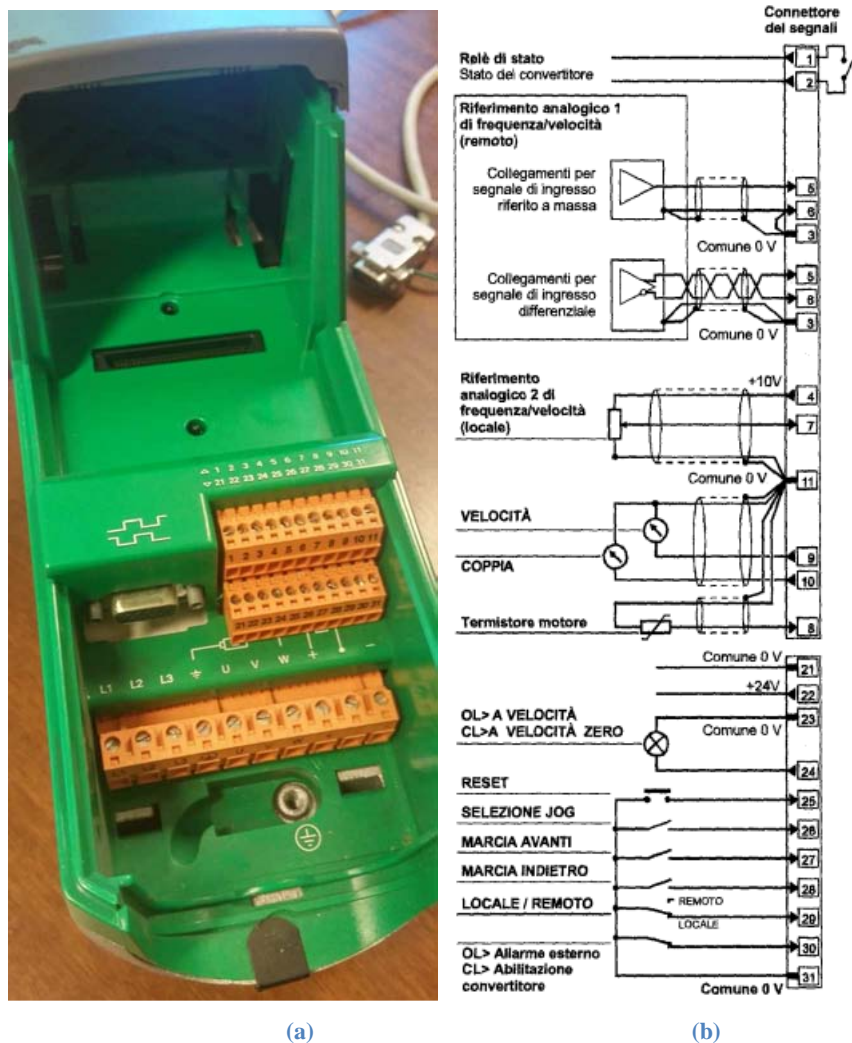


Figura 3.5 - Morsettiera segnali inverter (a) e relativo schema di funzionamento (b)

Questi 22 pin sono visualizzabili nello schema di funzionamento della figura 3.5-b:

- I pin da 1 a 11 sono dedicati alla parte analogica di controllo dell'inverter. Particolarmente importante è il pin 7 di input analogico che si collega al modulo NI 9263 (canale 1) per il controllo della velocità del motore, in parallelo si collegano le rispettive masse (pin 11 inverter con canale massa del modulo). È importante disabilitare il pin di allarme 8 collegandolo alla massa 11 per mantenere in funzione l'inverter.
- I pin da 21 a 31 sono dedicati alla parte digitale di controllo dell'inverter. Questa parte di inverter viene cablata completamente con il modulo NI 9472, che controllerà la marcia del motore nella logica del software utilizzato. I pin 25 e 30 sono di fondamentale importanza per resettare e bloccare il sistema.

In quest'ultima parte di lavoro si sono riscontrate problematiche di comunicazione tra le due parti a causa dell'elevata impedenza interna dell'inverter che provoca dei falsi positivi nella logica negativa posseduta dall'inverter. Pertanto si è dovuti ricorrere ad una compensazione tramite resistenze in parallelo così come mostrato in Figura 3.6.

Si è calcolato che il valore delle resistenze dovesse essere di 1.5 kΩ. A questo punto si è riusciti a controllare marcia avanti e marcia indietro e reset a piacimento con il software.

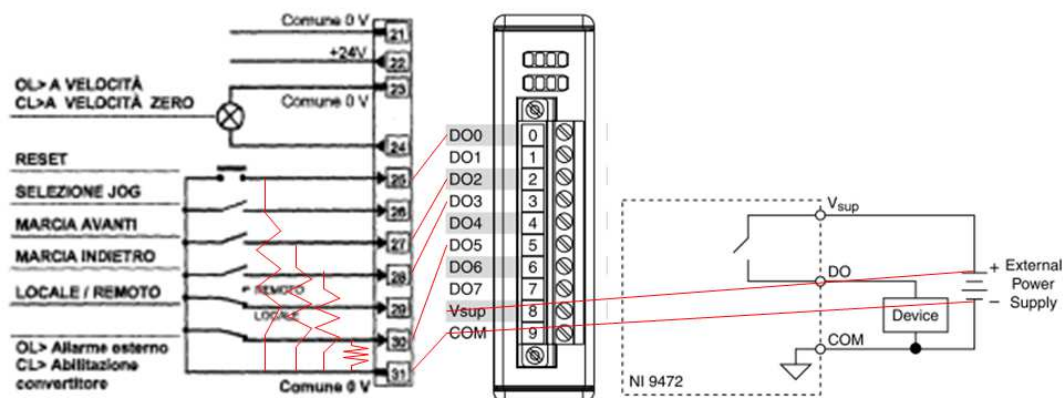


Figura 3.6 - Schema di cablaggio nel collegamento tra inverter digitale e il modulo NI 9472

### 3.2.5 Descrizione sonde

Nella sottosezione precedente sono state introdotte la struttura CompactRIO e le funzionalità del modulo, in questo sono descritte tutte le sonde ad esse collegate. Una delle procedure di controllo che è stata sviluppata si basa sulla misurazione delle forze applicate al galleggiante. Queste misurazioni vengono eseguite utilizzando una cella di carico: uno strumento in grado di misurare la forza applicata attraverso un segnale elettrico, che varia grazie alla deformazione che tale forza applica sul componente stesso. Per molti test eseguiti, le misure di compressione e trazione applicate alla cella indicano il segnale di ingresso, il software fornisce un'indicazione di uscita al motore, secondo il progetto di controllo assunto dal software.

Le prime stime della posizione del galleggiante vengono eseguite utilizzando il trasduttore di posizione HX-P420, fornito da UniMeasure. È collegato al modulo NI 9205 ed è un trasduttore ad estensione di cavo per la misurazione della posizione lineare o della velocità lineare. I modelli HX sono appropriati per ambienti ostili in cui si ha esposizione alla pioggia o all'immersione, caratteristiche facilmente riscontrabili durante questa sessione di lavoro. Il trasduttore di posizione HX-P420 fornisce un segnale di uscita da 4 a 20 mA con un sensore potenziometrico. Questa sonda è particolarmente vantaggiosa in ambienti elettricamente rumorosi, e in particolare per queste condizioni di lavoro caratterizzate dal rumore generato dall'inverter, il trasduttore di posizione è l'unica sonda con disturbo del rumore minimo e garantisce buone prestazioni di controllo. [17]

Un altro strumento viene utilizzato per eseguire misurazioni di posizione e velocità: un trasformatore differenziale variabile lineare (Linear Variable Differential Transformer - LVDT), che è un trasformatore elettrico utilizzato per misurare lo spostamento lineare. È composto da un alimentatore e una piccola barra mobile, che si muove all'interno di un tubo in cui sono presenti tre avvolgimenti: quello centrale è collegato al generatore CA e l'altro misura la tensione di uscita. Per questi test l'LVDT utilizzato è fornito dall'alimentatore Schaevitz Sensors, modello: LDM-1000 LVDT Control Module; massima corrente di alimentazione 65 mA. Si sono volute

testare entrambe le sonde in dotazione al laboratorio, tra le due si è preferito l'utilizzo del traduttore HX-P420 poiché molto meno soggetto a disturbi legati al rumore del segnale.

### 3.3 Progettazione software LabView

Scopo principale del lavoro è stata la progettazione tramite software National Instrument LabView del sistema di controllo tramite PID. Si esporrà velocemente la dinamica di funzionamento del progetto, senza soffermarsi sui particolari, al fine di comprendere i successivi esperimenti.

LabView è un software per la progettazione di sistemi, pensato appositamente per lo sviluppo di applicazioni di test, misura e controllo, caratterizzato da un rapido accesso all'hardware e ai risultati. Questo software offre un approccio grafico alla procedura di programmazione, in grado di visualizzare qualsiasi aspetto dell'apparecchio, dalla configurazione hardware alla misurazione dei dati. La grafica semplice, facilita l'integrazione con qualsiasi hardware di misurazione dei dati e consente una semplificazione, attraverso la semplicità della rappresentazione, dei processi logici e dell'algoritmo per qualsiasi uso personalizzato.

Il primo passo per lo sviluppo del software di controllo richiesto è stata l'installazione dei software LabView e dei sistemi in dotazione con un collegamento al PC tramite USB in primo luogo e tramite cavo Ethernet in secondo luogo.

A questo punto è stato possibile procedere con la progettazione effettiva del software LabView. Questo processo inizia con uno schema di riferimento che garantisce un controllo in tempo reale e un'indispensabile sequenzialità, chiamato infatti "Main", in tre diversi componenti e sono state definite variabili di processo per rendere la comunicazione dei dati più semplice, più facile e più veloce. Il Main si presenta come segue in Figura 3.7.

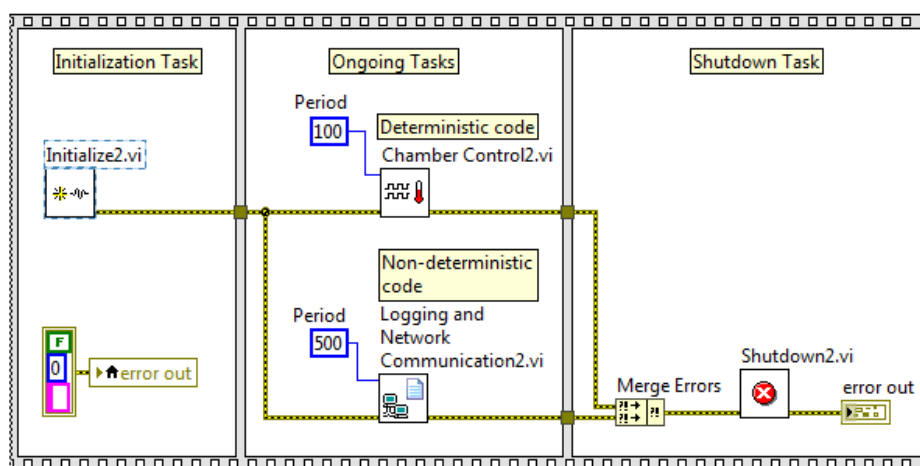


Figura 3.7 - Pannello principale "Main" del software LabView con relativa suddivisione in tre parti

Le tre parti che compongono il pannello principale sono:

1. Initialization Task: qui vengono avviate e nominate tutte le variabili in gioco attraverso un ciclo while. Tramite la connessione degli errori viene definito l'ordine computazionale prescritto, per evitare qualsiasi errore relativo alle

variabili iniziali. Infine, viene inizializzata la stringa "target data network", questo componente è fondamentale per la comunicazione e per chiudere il ciclo. Un primo esempio di questa implementazione è riportato in Figura 3.8.

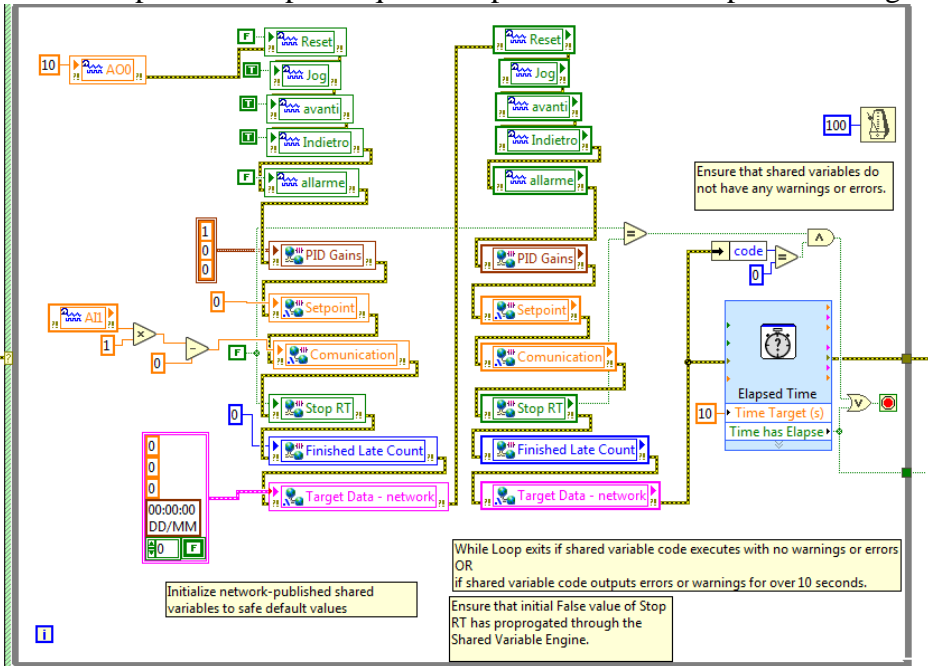


Figura 3.8 - Initialization Task di Labview

2. Controllo principale: qui sono presenti i due principali elementi del processo software. Questo pannello è la parte più rilevante di VI, qui sono presenti diversi importanti elementi software. Innanzitutto, l'operatore PID, che controlla l'uscita analogica AO deputata alla comunicazione con l'inverter e successivamente anche il "Target Data Network", fondamentale per chiudere il ciclo di comunicazione. In secondo luogo, in questo ambiente avviene il filtraggio delle sonde, collegate al controller PID. Si può notare la parte inerente al controllo digitale (caselle verdi "avanti","Indietro") che varierà in base al controllo del PID. Si può osservare il tutto in Figura 3.9.

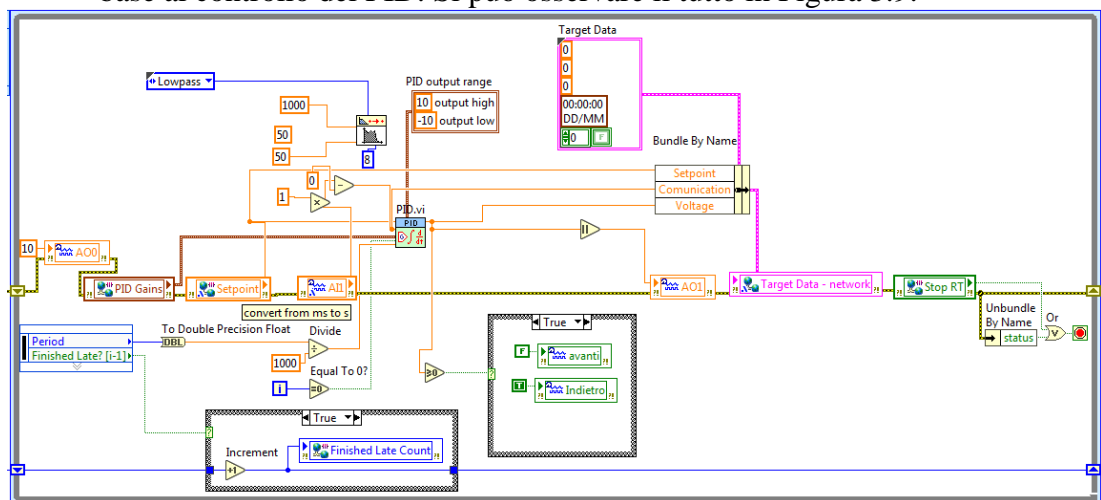


Figura 3.9- Controllo principale del software LabView

3. Attività di spegnimento: fondamentale per ripristinare le variabili al termine dell'esecuzione del software.

Tutto il lavoro svolto dal "RT Main" si potrà controllare e osservare in modo parallelo dall'"Host": in cui è possibile modificare le variabili, nel nostro caso i guadagni PID e il setpoint, e si riesce a visualizzare tramite il front panel grafici con il voltaggio dato al motore e come il segnale segua il set point.

Per spiegare questo concetto, nella Figura 3.10 è riportato lo schema a blocchi del pannello host, utilizzata per modificare l'analisi di input e output, la procedura di controllo e così via. Nella Figura 3.10 si può riconoscere uno dei principali elementi del software costruito: la struttura di registrazione dei dati o Data Logging (Figura 3.11). Questo elemento raccoglie i dati durante l'esecuzione del test con una frequenza di 10 Hz e li riporta alla fine del processo in un file .btmi.

Mentre nella figura 3.12 è riportata l'interfaccia grafica dell'host in esecuzione durante la sessione di lavoro; le modifiche che si verificano in uno di questi due pannelli si manifestano anche nell'altro.

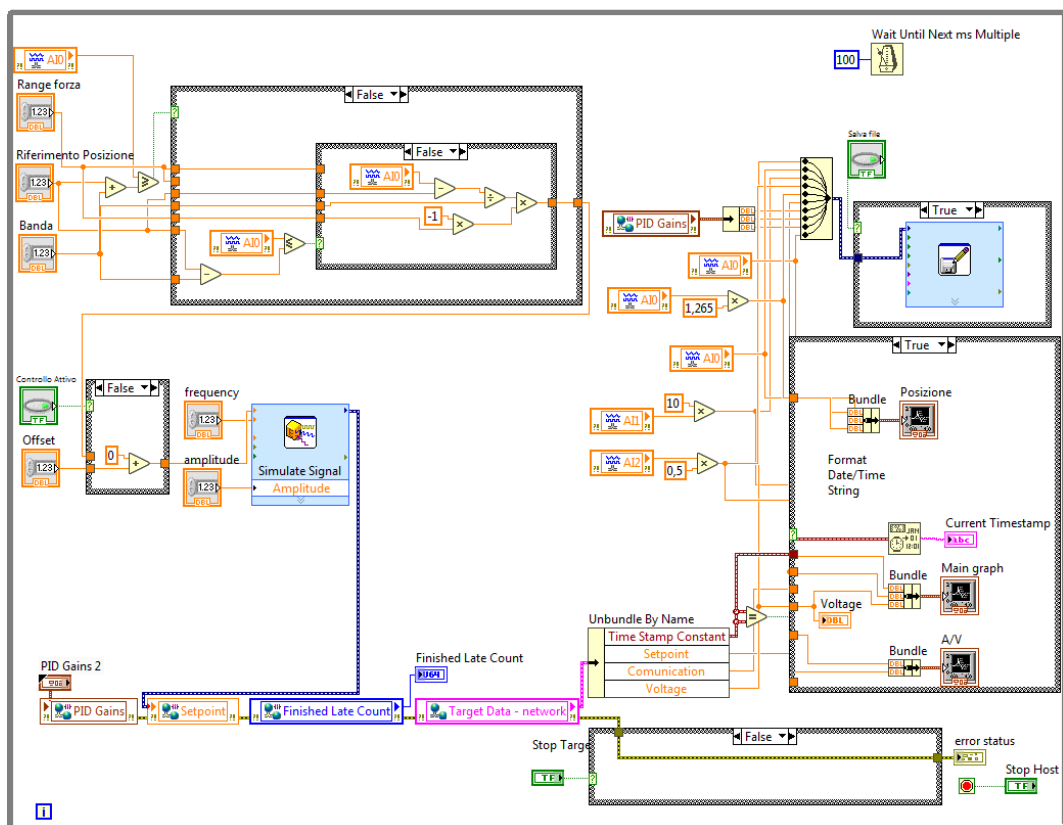


Figura 3.10 - Riepilogo di tutto il codice del modulo, tipo di input e connessione con la struttura



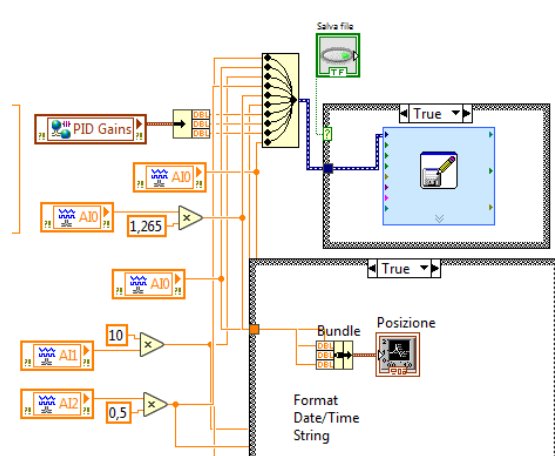


Figura 3.11 - Zoom della parte dedicata al Data Logging

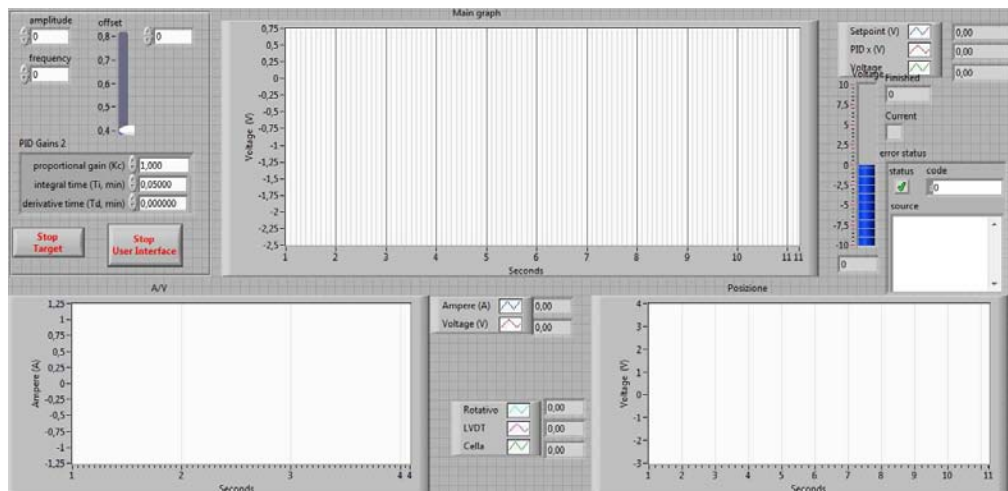


Figura 3.12 - Interfaccia grafica dell'host LabView

## 3.4 Caratteristiche strutturali e fisiche

Si descriveranno qui di seguito le caratteristiche dell'ambiente in cui è stata eseguita l'esperienza, ovvero il laboratorio Marittimo dell'Università di studi di Padova e nello specifico il canale e le sonde presenti. Si descriverà il corpo galleggiante e le caratteristiche di attenuazione che possiede.

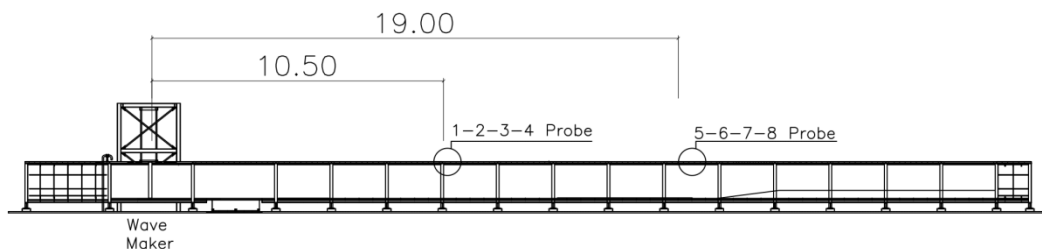
### 3.4.1 Laboratorio e canale ad onde

I test vengono eseguiti in un canale ondoso situato nel laboratorio marittimo dell'Università di Padova. La struttura, costruita in cemento armato e travi in acciaio con pareti realizzate con pannelli di vetro. Il canale è caratterizzato da una lunghezza di 35 m, una larghezza di 1,0 m e un'altezza di 1,3 m. È inoltre dotato di un sistema di pompaggio, che consente di far riciclare l'acqua, immagazzinata in un serbatoio chiuso sotto il condotto, permettendo così di lavorare sia in condizioni asciutte, per la costruzione del modello, per esempio, e in condizioni di bagnato, per eseguire test. Nella Figura 3.13 è riportata una foto del canale ondoso del Laboratorio di Padova.



**Figura 3.13 - Canale ad onde presente in laboratorio**

Nel canale è presente una macchina per la generazione d'onda, necessaria per la simulazione dell'attività del mare, e un sistema di assorbimento dinamico dell'onda, usato per regolare l'influenza delle onde riflesse su quelle generate. L'acquisizione dei dati viene eseguita utilizzando sonde resistive, calibrate ogni sessione di lavoro, e i dati ottenuti vengono successivamente sviluppati con MATLAB per una corretta analisi. Le sonde all'interno del canale sono distanziate in maniera adeguata, definita in base all'esperienza richiesta; per questo studio si trovano prima e dopo il sistema oscillante, considerando in questo modo le condizioni a monte (on-shore) e a valle (off-shore) rispetto il galleggiante. Nella Figura 3.14 è possibile vedere la posizione delle sonde nel canale. Si trovano con un intervallo non costante, per evitare la perdita di informazioni a causa della ridondanza della caratteristica dell'onda sotto forma di onda propagante.



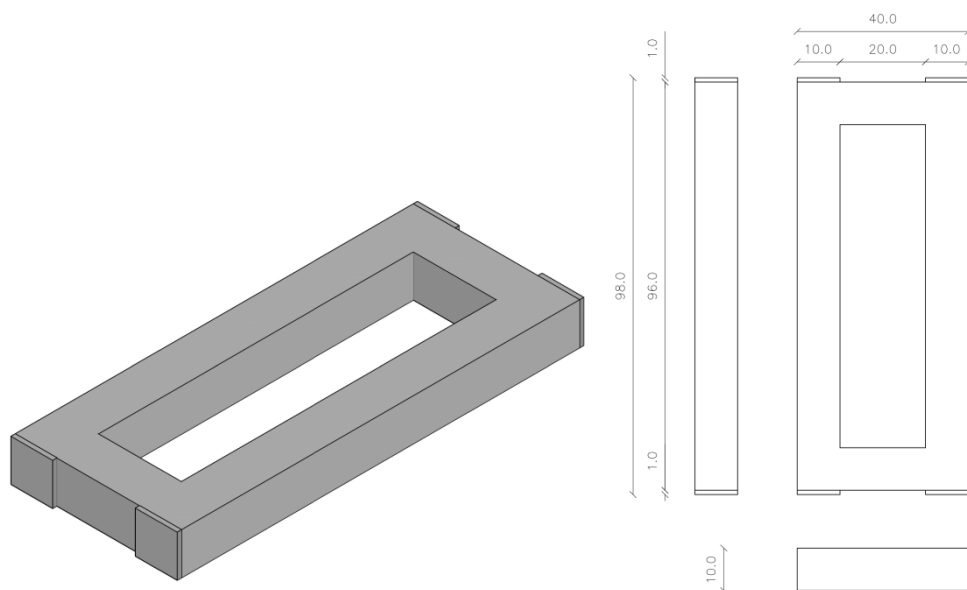
**Figura 3.14 - Schema del canale ad onde e relativa posizione delle sonde resistive**

### 3.4.2 Struttura del corpo galleggiante

L'intera struttura del corpo oscillante è composta dal corpo flottante e dai componenti meccanici utilizzati per controllarne il movimento; queste parti sono collegate e controllate da inverter e software, che ne definisce il comportamento grazie alle diverse tecniche di controllo. Il corpo oscillante si trova nel canale tra i due gruppi di sonde resistive, con una distanza media dal generatore di onde di 15,40 m.

Il corpo galleggiante ha una forma rettangolare con una cavità nel mezzo, le sue dimensioni sono mostrate nella Figura 3.15; le dimensioni di questa struttura rappresentano la dimensione reale con una scala di 1:20.





**Figura 3.15 - Rappresentazione 3D del galleggiante e relative dimensioni**

È realizzato in acciaio e materiale di riempimento che consente il galleggiamento. Il corpo flottante è posizionato con il lato più grande ortogonale alla direzione dell'onda, arrestando in questo modo onde incidente lungo l'intera larghezza del canale. Queste particolari dimensioni del corpo consentono di arrestare l'onda di piccolo periodo, mentre le onde di periodo maggiore possono attraversarlo senza alcuna interferenza rilevante. Il corpo, infatti, è fissato lungo la direzione orizzontale grazie a due sbarre in acciaio che lo ancorano, ma che consentono comunque piccoli movimenti orizzontali quando il corpo si muove verticalmente.

### **3.4.3 Schema di funzionamento dell'attuatore lineare del carrello**

L'attuatore lineare è un dispositivo elettromeccanico che serve a trasformare il moto rotatorio di un motore elettrico in un moto traslatorio lineare.

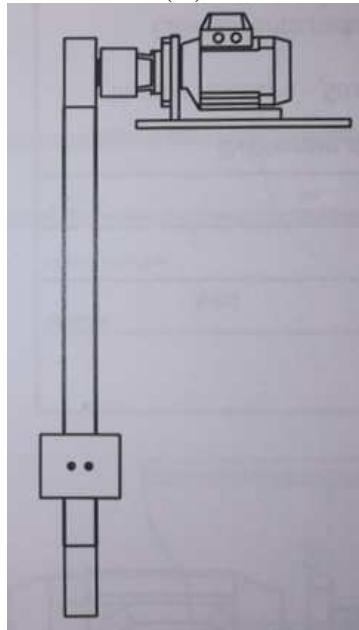
Il motore elettrico, con il suo movimento rotatorio trasmette il moto al riduttore il quale a sua volta mette in movimento una ruota dentata, quest'ultima è accoppiata ad una cinghia parallela all'asse dell'attuatore per cui si produce un movimento lineare.

Uno dei vantaggi che ne deriva dall'utilizzo della cinghia per la movimentazione di guide lineari è la buona silenziosità aggiunta alla possibilità di raggiungere velocità elevate fino a 2-3 m/s. La cinghia è collegata ad un carrello collegato a sua volta ad un'asta di ottone che lo mette in collegamento col galleggiante.

Viene utilizzato un attuatore a cinghia CTS, di cui è visibile la struttura in Figura 3.15.



(a)



(b)

Figura 3.16 - Attuatore lineare a cinghia; modello utilizzato (a) assemblaggio con motore e riduttore (b)

### 3.5 Funzionamento generale

Una volta che tutti gli elementi del sistema sono stati descritti individualmente, è possibile comprendere l'intero funzionamento della struttura: come le varie componenti interagiscono tra loro dal punto di vista meccanico, come avviene la comunicazione dei dati dalle sonde al software e come ciò dia controllo della velocità al motore e così via.

Si può osservare la struttura di funzionamento del galleggiante in Figura 3.17: il galleggiante risulta ancorato a due barre di acciaio che permettono lo spostamento verticale e una leggera libertà di movimento orizzontale. Dall'altro lato il corpo è collegato al motore tramite un'asta di ottone e due cerniere che bloccano i gradi di libertà lungo l'asse ortogonale all'asta, pertanto il sistema imprimerà una forza  $F_V$  al galleggiante lungo l'asse verticale.

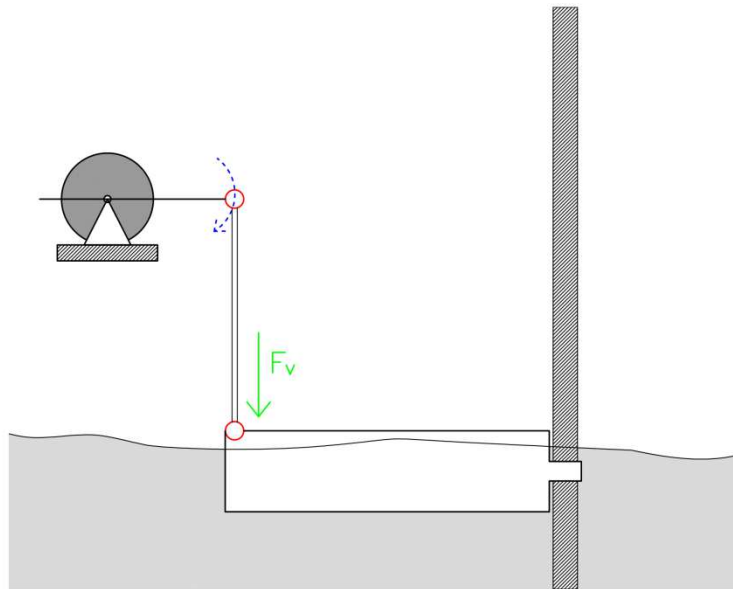


Figura 3.17 - Schema di funzionamento del sistema sotto studio

La coppia rotazionale del motore viene aumentata grazie al riduttore TREMAC EP90 10 TT e convertita in movimento traslatorio grazie ad un carrello mobile. La rotazione indicata con una freccia curvilinea blu indica la rotazione del motore da cui proviene la forza verticale.

La quantità totale di forza,  $F_v$  imposta dal motore al sistema è correlata alla strategia di controllo, definita nel codice LabView, e dalle misurazioni dei dati raccolti dalle sonde. In particolare due sonde di posizione e una cella di carico.

Si può osservare l'assemblaggio completo nella foto in Figura 3.18, in particolare vengono indicati con "cerchi rossi" le tre sonde, mentre con "rettangoli blu" le componenti "meccaniche" (motore, riduttore e carrello). L'LVDT riesce a stimare lo spostamento dal movimento oscillatorio verticale di un piccolo cilindretto all'interno dello strumento. Il movimento di questo cilindretto corrisponde a quello del galleggiante in quanto è collegato con un filamento al carrello a cui è fissata anche la cella. L'altro strumento di misura della posizione è il trasduttore di posizione, che funziona con lo stesso principio. La cella di carico è montata tra l'asta di ottone e il carrello, in questo modo può percepire la forza che il motore e il galleggiante imprimono sul sistema.

Per questi test è stata considerata una sola variabile di processo nel tempo, quindi quando il controllo della forza era attivo non è possibile realizzare una strategia di controllo basandosi anche sulla posizione come feedback allo stesso tempo; è in ogni caso garantita la raccolta di dati di posizione. Lo stesso si può dire quando si lavora con la posizione come variabile di processo.

In particolare, qui è possibile vedere l'impossibilità, nell'attuale avanzamento del lavoro, di impostare due riferimenti di feedback, indicando un solo valore di offset. Questo valore di offset è diverso a seconda della strategia di controllo prescelta: in entrambi i casi è quello della perfetta orizzontalità del corpo flottante, ma per il controllo della posizione, considerando la calibrazione si definisce con un valore di 0,39 V, mentre per il controllo della forza con un valore di -0,9 V.

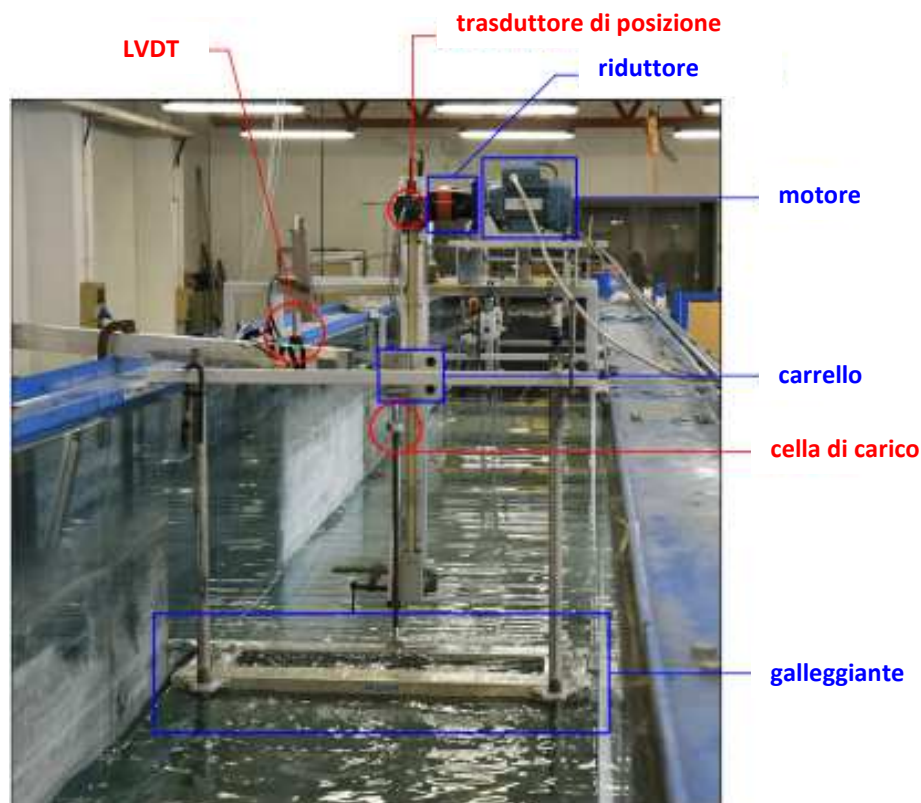


Figura 3.18 - Assemblaggio completo della struttura con relativi riferimenti alle diverse parti

Alcuni limiti principali sono presenti con questo tipo di controllo: in primo luogo, supponendo che il lavoro venga eseguito con onde irregolari in cui non è presente alcuna previsione, non è possibile definire in anticipo il moto dell'onda e quindi adeguare lo spostamento in tempo reale. Per questo motivo con il controllo della posizione non è possibile seguire immediatamente, la posizione del galleggiante quando le onde si avvicinano, quindi la prima soluzione che è stata progettata è stata l'imposizione della posizione di orizzontalità in acque ferme come condizione di riferimento, che deve essere mantenuta anche quando le onde si avvicinano. La seconda considerazione che si può fare, si basa sul controllo della forza, qui infatti non è possibile mantenere una posizione fissa, quando l'acqua non è ferma; per questo motivo, in questa strategia di controllo, l'imposizione è stata effettuata considerando la forza registrata dalla cella di carico in condizioni di acqua ferma. Questo valore dovuto alla compensazione del peso del carrello insistente sul frangiflutti, è stato mantenuto, garantendo in questo modo condizioni di galleggiamento.

Da queste due imposizioni di base, è stato possibile attuare strategie di controllo che saranno esposte nei capitoli seguenti.

## 4 Test preliminari e preparatori

Per procedere con l'implementazione dei test delle strategie di controllo, è stato necessario effettuare alcuni test preliminari, che sono: calibrazione delle sonde di dati input e delle sonde di registrazione dell'onda; filtraggio dei dati dovuto alla presenza di rumori nei segnali di input; stima dei corretti coefficienti PID impostati; test delle condizioni al contorno, con galleggiante completamente libero e completamente bloccato. Concludendo con test di verifica sull'abilità di controllo di Labview, con simulazione di galleggiamento libero, condizione bloccata e generazione di onde sinusoidali ad acqua ferma.

### 4.1 Calibrazione e filtraggio delle sonde

Per quanto riguarda le sonde di dati input si rende necessaria una calibrazione. Si effettuano infatti misurazioni considerando la variazione del segnale volt e, per questo motivo, è necessario trasformare questi valori in unità fisiche. In particolare, le procedure di calibrazione qui descritte vengono eseguite per la sonda del trasduttore di posizione, la sonda di posizione LVDT, la cella di carico e le sonde resistive di registrazione dell'onda.

#### 4.1.1 Sonde resistive d'onda

Al fine di stimare l'altezza e l'andamento generale delle onde si sono piazzate otto sonde resistive (dette wave probe) lungo il canale in due diversi punti rispetto al galleggiante: a monte e a valle rispetto ad esso. Attraverso l'utilizzo di un software "*HR-DAQ - Data Acquisition and Analysis software program*", viene misurata la variazione del segnale in volt come conseguenza dell'innalzamento e dell'abbassamento del livello dell'acqua.

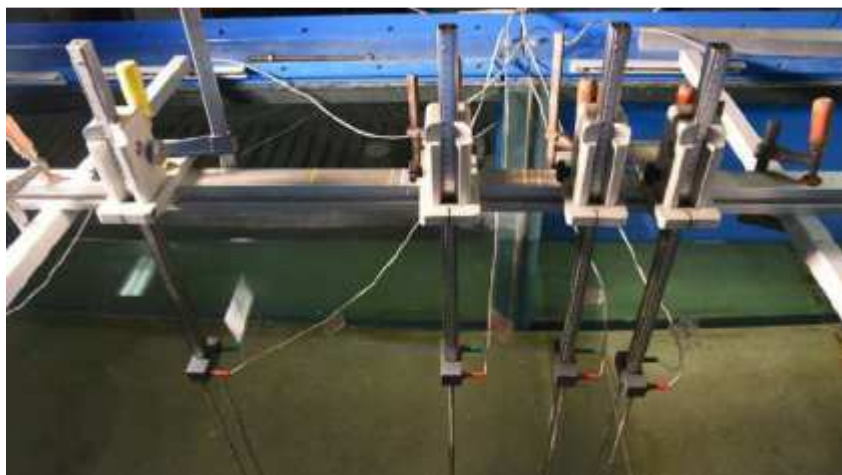


Figura 4.1 - Set di sonde resistive

Come si può notare dalla Figura 4.1 ogni sonda è costituita da due asticelle d'acciaio parallele. La corrente viene rilevata misurando la caduta di tensione tra due resistori. Poiché la tensione misurata si alterna, il segnale viene inviato a un raddrizzatore di

precisione per produrre una tensione in corrente continua proporzionale all'altezza dell'onda.

Per questa sonda è stato necessario eseguire la calibrazione per ogni sessione di lavoro. Utilizzando il software sopracitato si seleziona la tipologia di sonda adottata e a ciascuna viene assegnato un codice seriale, con la corrispondente unità di misura, in questo caso [m].

Tutte le sonde sono fissate su un valore zero di riferimento del livello dell'acqua e viene preso il primo segnale volt misurato; in secondo luogo, le sonde vengono alzate e abbassate dei valori di offset tipici, in questo caso  $\pm 0,05$  cm e  $\pm 10$  cm, ogni valore di volt corrispondente viene misurato e riportato dal software. In questo modo si permette alle sonde di memorizzare la posizione iniziale e le varie altre posizioni a cui si sono trovate successivamente: così facendo il software creerà una retta interpolatrice permettendo una corrispondenza lineare tra i valori in volt rilevati dalla sonda e il livello dell'acqua. Si riporta in Figura 4.2 la procedura di calibrazione descritta.

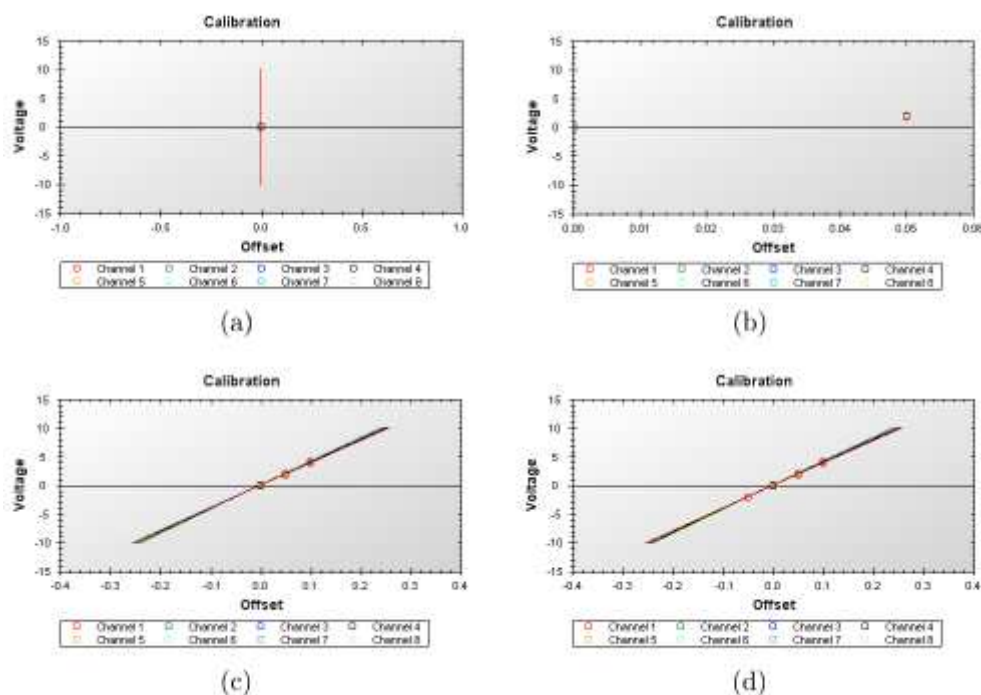


Figura 4.2 - Schermata del software addetto alla calibrazione delle sonde resistive necessarie per stimare il livello dell'acqua, si possono qui notare i vari passaggi

## 4.1.2 Sonde di posizione

Per calibrare al meglio le due sonde di posizione a disposizione viene eseguita la stessa procedura di calibrazione: si è fatto muovere il galleggiante per distanze note in centimetri e dopo aver registrato i relativi valori in volt si è costruito il relativo grafico, calcolato la linea di tendenza e la relativa equazione assumendo una regressione lineare. Nella Tabella 4.1 sono riportati i valori utilizzati per la calibrazione delle sonde del trasduttore di posizione e quelli per la calibrazione del LVDT. Si riportano le linee di tendenza dei dati raccolti in Figura 4.3, da cui si ricava la costante di misura per passare dalla grandezza in volt a quella in centimetri.

	Distanza [cm]	Trasduttore di posizione [V]	LVDT [V]
1	0	-3,29	-2,64
2	1,8	-2,92	-1,045
3	2,8	-2,75	-0,33
4	3,6	-2,55	0,51
5	4,6	-2,38	1,22
6	4,9	-2,27	1,65
7	6,4	-2	2,734
8	7,7	-1,74	3,77

Tabella 4.1 - Dati utilizzati per la calibrazione del trasduttore di posizione e del LVDT

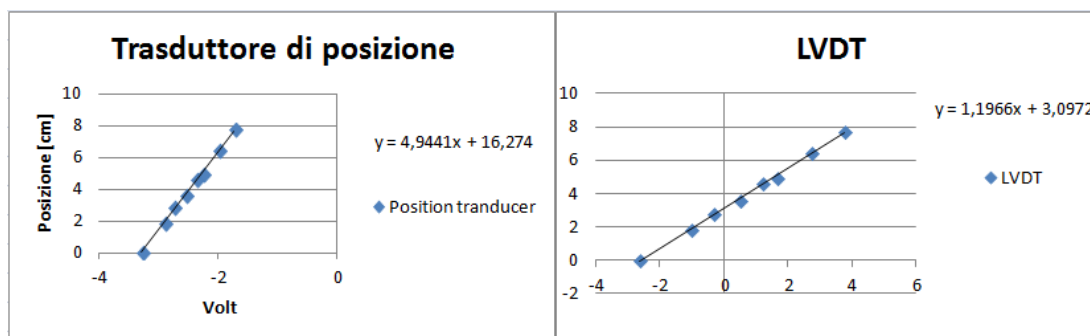


Figura 4.3 - Linea di tendenza delle due sonde di posizione

## 4.2 Cella di carico

Per quanto riguarda la cella di carico, essa è stata calibrata conoscendo il carico noto misurato in kg e rapportandolo alle relative misurazioni della cella in volt si è potuta identificare un'equazione della retta interpolatrice, in modo da ricavare la costante di misura. Si riportano le linee di tendenza dei dati raccolti in Figura 4.4, da cui si ricava la costante di misura per passare dalla grandezza in volt a quella in chilogrammi.

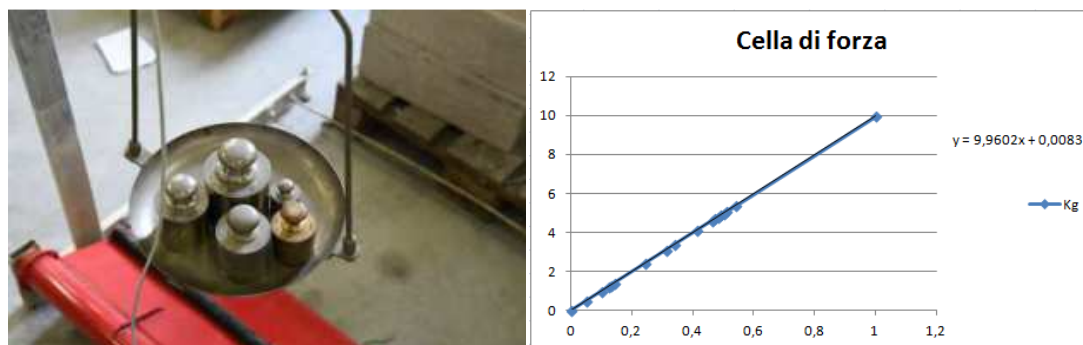


Figura 4.4 - Linea di tendenza della cella di forza

Dall'analisi riportata in Figura 4.3 deriva che la costante si può approssimare a 10. Di conseguenza per passare dal peso alla forza-peso in [N] ; la costante di misura si approssima per comodità a 100.



## 4.3 Filtraggio dei segnali input

Una delle principali problematiche legate all'acquisizione dei dati è stata la presenza di disturbi elettromagnetici indotti all'inverter sulla sonda della cella di carico per effetto di una schermatura poco efficiente; questo porta alla presenza di un rumore ad alta frequenza nelle misurazioni del carico. Per questo motivo, è stato necessario sviluppare un filtro sulle misure prese dalla cella di carico; tuttavia tale filtro influenza le prestazioni con l'aumento del ritardo di elaborazione e, di conseguenza, esso ha ripercussioni sul controllo e la risposta del sistema.

In questi casi, vale la pena aggiungere semplicemente un filtro passa-basso che annulla tutto al di sopra della massima larghezza di banda del segnale (Figura 4.5) .

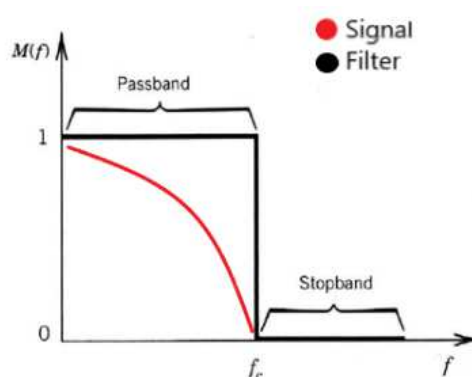


Figura 4.5 - Filtro Passa basso ideale

L'ordine nel filtro è correlato alla pendenza nel taglio del filtro; in particolare rappresenta il numero massimo di elementi di ritardo utilizzati nel circuito del filtro, quindi un filtro del primo ordine è caratterizzato da 20 dB per decade, un secondo ordine da 40 dB per decade, un terzo da 60 dB per decade e così via. Quindi, è facile capire come, aumentando l'ordine, il filtraggio diventi più complesso nella progettazione, mostrando d'altra parte una maggiore efficienza nelle prestazioni, perché vengono memorizzate più informazioni sull'input ed è più facile produrre output da tali campioni; ovviamente ordini superiori, caratterizzati da elevata complessità e memoria di passaggi precedenti, implicano tempi di risposta più lenti, con un ritardo nell'elaborazione dei dati.

Le difficoltà nella corretta definizione del filtro da utilizzare e nella riduzione del valore da considerare, si basano sulla necessità di compensare da un lato la quantità di rumore che deve essere esaurita, di avere una misurazione più chiara dei dati e, dall'altro, il mantenimento della reale caratteristica temporale del processo. L'applicazione di un filtro, infatti, implica un ritardo nell'output dei dati, in base al tipo di filtro e, soprattutto, all'ordine definito per il processo di filtraggio; un ritardo che non può essere consentito in questo tipo di test.

Per filtrare la sonda si sono fatti vari tentativi attraverso il software LabView e si è optato per il più comune filtro passa basso Butterworth, per la sua semplicità e facilità di implementazione, avendo comunque buone prestazioni. Nella figura 4.6 è riportato il filtro finale utilizzato per l'immissione delle misure delle celle di carico. È possibile vedere le caratteristiche del filtro: la definizione di filtro utilizzata, Lowpass; nella casella arancione superiore, la caratteristica della frequenza di



campionamento con un valore di 10 Hz (che dipende dalla frequenza del programma); i valori di taglio basso (nella casella arancione inferiore) con un valore di 5 Hz e l'ordine 4 (con la casella blu).

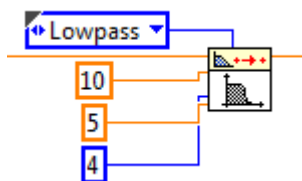


Figura 4.6 - Filtro Butterworth passa basso sviluppato nel software LabView

### 4.3.1 Ricerca coefficienti PID

Il processo di impostazione dei guadagni ottimali per P, I e D, studiati nel capitolo 2, per ottenere una risposta ideale da un sistema di controllo è chiamato tuning. Inizialmente si è effettuato un lavoro preliminare di simulazione senza essere collegati al galleggiante. Si presentano successivamente diversi metodi di messa a punto riguardanti il sistema finale montato in canale dei quali verrà discusso il metodo Ziegler Nichols e il metodo "guess and check".

## 4.4 Test preliminare

I test preliminari sono stati utili a verificare l'efficacia del programma LabView sviluppato e a capire approssimativamente come si sarebbe comportato il sistema in acqua.

Inizialmente si è cercato di valutare la risposta del sistema ad una variazione a gradino monotona, per fare ciò, considerando la cella di carico si è inserito come peso una catena, come si può osservare in Figura 4.8.

In questo modo quando il carrello si alzava aumentava il peso e di conseguenza anche il segnale dato dalla cella.

Si è impostato il software in modo tale che il motore fosse controllato per produrre una forza che compensasse il peso della catena sollevata da terra. In questo modo il PID aveva un segnale da seguire e poter stabilizzare al set point desiderato. Si sono quindi tentati vari metodi di tuning senza molto successo, fino ad arrivare a dei valori di guadagno tramite sistema empirico con risultati discreti nella risposta al gradino. I risultati migliori si sono avuti impostando una sinusoide al movimento del carrello, come si può notare il front panel di LabView dalla Figura 4.7. Dove si nota in blu il set point imposto in entrata al controllo, in verde il segnale della cella di carico in cui si nota già del rumore e infine in rosso il voltaggio di comando al motore per chiudere il ciclo di controllo. Vista la somiglianza del valore misurato dalla cella di carico al set point, i valori di guadagno scelti sembrano adeguati al controllo esaminato.

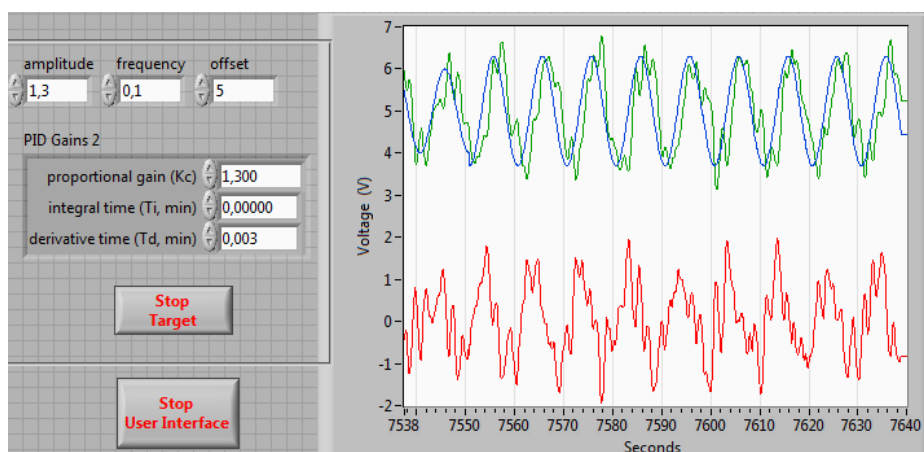


Figura 4.7 - Front panel LabView nel test preliminare con catena



Figura 4.8 - Test preliminare con catena

Probabilmente i problemi rilevati in questa fase iniziale di lavoro erano dovuti a:

- L'entità del rumore presente nel segnale della cella di carico che limitava di molto la stabilità del sistema.
- L'uso inappropriato della catena, che probabilmente restituiva al sistema perturbazioni supplementari tra il sollevamento di un anello e l'altro. Per risolvere questa problematica si sarebbe dovuto impostare il sistema in modo tale da avere una variazione di peso continua e costante, cosa che non ha permesso l'utilizzo della catena.

#### 4.4.1 Metodo "Guess and check" e metodo Ziegler Nichols

I guadagni di un controller PID possono essere ottenuti con il metodo di "Guess and check". Una volta che l'utente comprende il significato di ciascun parametro di guadagno, questa procedura diventa relativamente facile. In questo metodo, i termini I e D vengono prima impostati a zero e il guadagno proporzionale viene aumentato finché l'uscita del loop non oscilla. Man mano che si aumenta il guadagno proporzionale, il sistema diventa più veloce, ma occorre fare attenzione a non

rendere instabile il sistema. Una volta che P è stato impostato per ottenere una risposta veloce desiderata, il termine integrale viene aumentato per arrestare le oscillazioni. Il termine integrale riduce l'errore di stato stazionario, ma aumenta l'overshoot. Una certa quantità di overshoot è sempre necessaria per un sistema veloce in modo che possa rispondere ai cambiamenti in modo immediato. Il termine integrale è ottimizzato per ottenere un errore di stato stazionario minimo. Una volta che P e I sono stati impostati per ottenere il sistema di controllo rapido desiderato con un errore di stato stazionario minimo, il termine derivativo viene aumentato fino a quando il ciclo non sia giunto rapidamente al suo valore prefissato. L'aumento del termine derivativo diminuisce l'overshoot e produce un guadagno più elevato con la stabilità, ma farebbe sì che il sistema sia altamente sensibile al rumore.

Nel caso di un sistema a circuito chiuso, viene utilizzato il metodo di calibrazione Ziegler e Nichols [18]. Nel 1942 J. G. Ziegler e N. B. Nichols, suggeriscono che per determinare i parametri PID corretti si ottiene la migliore soluzione eseguendo una sintesi analitica basata sul modello matematico del "plant"; ma questo approccio implica molti calcoli e, anche se è preferibile per la precisione dei risultati, la soluzione empirica suggerita è la migliore per la prontezza della soluzione del problema. La procedura suggerita in questo metodo è la seguente: le azioni di Integrativo e Derivativo sono escluse e viene considerato solo il coefficiente proporzionale  $K_P$ . Analogamente al metodo precedente, il sistema viene mantenuto ad un valore di retroazione uguale a quello del target, minimizzando l'errore che il sistema deve compensare, in questo modo si verificano gli unici movimenti a causa dell'instabilità legata all'aumento del valore di  $K_P$ .  $K_P$  viene aumentato fino all'inizio di un'oscillazione permanente: il valore del coefficiente proporzionale in cui ciò si verifica viene chiamato  $K_C$  e il periodo di oscillazione corrispondente viene definito  $T_U$ , come mostrato nella Figura 4.9.

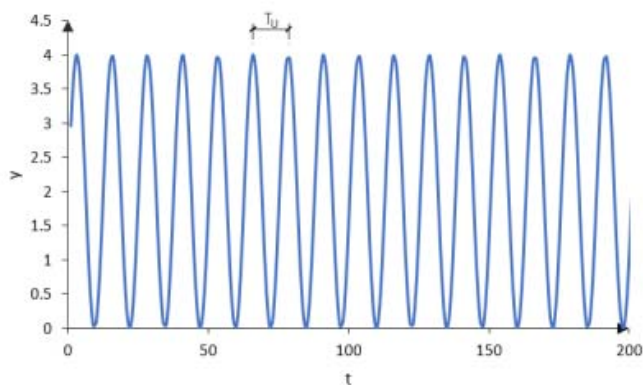


Figura 4.9 - Esempio di oscillazione permanente

Una volta iniziata l'oscillazione, vengono annotati il guadagno critico  $K_c$  e il periodo di oscillazioni  $T_U$ . P, I e D vengono quindi regolati secondo la Tabella 4.2:

Controllo	P	Ti	Td
<b>P</b>	0.5 $K_c$	-	-
<b>PI</b>	0.45 $K_c$	$T_U/1.2$	-
<b>PID</b>	0.60 $K_c$	0.5 $T_U$	$T_U/8$

Tabella 4.2 - Metodo di ricerca dei coefficienti PID tramite metodo Ziegler-Nichols [18]

## 4.5 Tuning effettivo ad acqua ferma

I valori dei parametri del PID definiti precedentemente sono stati poi calibrati in presenza del corpo flottante. La calibrazione dei coefficienti PID è stata eseguita con e senza filtro sul segnale della sonda. In ogni caso, è importante sapere che più il segnale è disturbato, più il coefficiente proporzionale andrà impostato basso, perché, altrimenti, anche una piccola deviazione del rumore può rendere instabile il sistema. Il coefficiente PID della cella di carico viene calcolato con la seguente procedura:

1. Si aumenta il valore di  $K_P$  fino a quando non si arriva al valore  $K_C$  per cui si ottiene un'oscillazione permanente; con il caso della cella di carico, è stato difficile ottenere una corretta oscillazione periodica, a causa dell'enorme rumore, per questo motivo il  $K_C$  selezionato era il più vicino possibile a questa condizione;
2. Il valore di  $K_C$  appena trovato viene moltiplicato per i coefficienti riportati in Tabella 2, lo stesso avviene per  $T_U$ , ottenendo i coefficienti PID di riferimento;
3. i valori ottenuti nel passaggio precedente sono ora analizzati empiricamente, considerando l'instabilità del sistema: in particolare l'alto valore di  $K_C$ , ottimo per condizioni ad acqua ferma, potrebbe non essere adeguato in presenza di azione ondulatoria;
4.  $K_P$  è stato ridotto del 10%; Il valore di  $K_I$  è stato diminuito (perché si presenta come una relazione inversamente proporzionale) fino a raggiungere un valore vicino a quello di calibrazione;  $K_D$  aumenta nuovamente gradualmente.

La stessa procedura è stata eseguita senza filtraggio sulla cella di carico e con sensore di posizione, ottenendo coefficienti PID diversi, riportati nella Tabella 4.3. In particolare è possibile notare che la presenza del filtro implica un valore più elevato del coefficiente proporzionale consentito, a causa dell'attenuazione del rumore; d'altra parte quando non è stato utilizzato alcun filtro, l'enorme disturbo del rumore consente solo un valore basso di guadagno proporzionale e quindi del valore corrispondente di coefficiente integrativo e derivativo.

Al contrario, le sonde di posizione non sono state influenzate in misura elevata dall'inverter, quindi è stato raggiunto un valore più elevato di  $K_C$ . Ciò implica un migliore controllo con queste sonde, caratterizzato da una risposta più rapida del sistema, a causa del valore più elevato di  $K_P$ , e una sorta di previsione dello stato futuro grazie alla memoria dei passaggi precedenti con il valore di  $K_I$  e del tasso di variazione  $K_D$ .

Sonda	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Cella di carico (filtrata)	3.5	0.01	0.0001
Cella di carico (non filtrata)	1.4	0.08	0.0001
Trasduttore di posizione	5	0.055	0.00005

Tabella 4.3 - Coefficienti PID trovati dalla calibrazione tramite metodo Ziegler-Nichols

## 4.6 Condizioni al contorno

Considerando la forma e il movimento del galleggiante, sono state prese in considerazione tre principali configurazioni di riferimento, che erano in grado di rappresentare tre condizioni al contorno del sistema di riferimento. Queste configurazioni sono:

- Il galleggiante completamente libero, che si è ottenuto scollegando completamente il corpo dall'asta di ottone a cui, mediante il carrello, era connesso al motore. Di conseguenza il galleggiante rimaneva vincolato solo ai due pali in acciaio verticali su cui era inserito. (Figura 4.10).

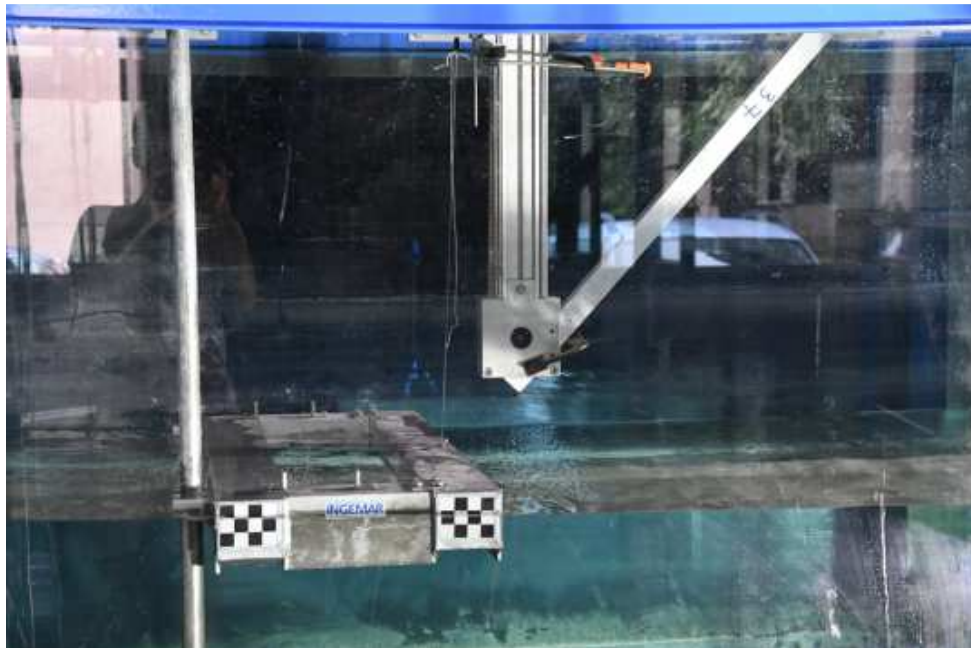


Figura 4.10 - Test con galleggiante completamente libero

- Il galleggiante parzialmente bloccato, che si è ottenuto bloccando il movimento del carrello con un morsetto sulla rotaia, impedendo i movimenti e la corrispondente oscillazione del galleggiante lungo il lato a valle; (Figura 4.11).





Figura 4.11 - Test con galleggiante parzialmente bloccato

- Il galleggiante completamente bloccato, ovvero bloccando il movimento non solo con un morsetto lungo il carrello, ma anche bloccandolo su una barra d'acciaio situata sul lato a monte. (figura 4.12).

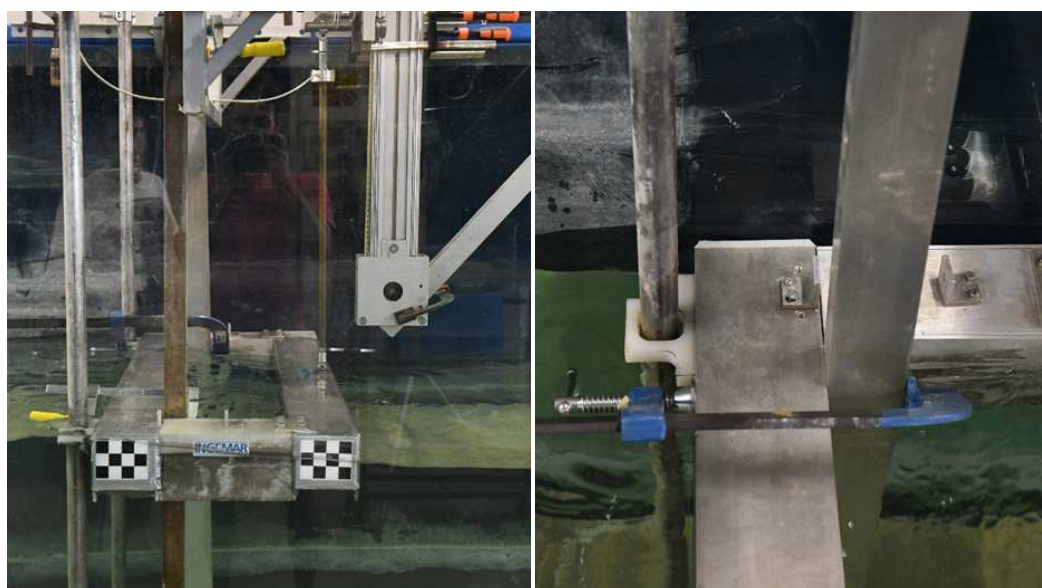


Figura 4.12 - Test con galleggiante completamente bloccato

Nel caso del galleggiante completamente libero, l'acquisizione dei dati è garantita grazie alla sola sonda di posizione legata al galleggiante tramite il filo di cui si serve per misurare lo spostamento; in questo modo, il data logging di LabView raccoglie le misurazioni dello spostamento naturale del corpo quando sottoposto all'azione delle sole onde.

Valori utili per verificare se il sistema risponde correttamente agli impulsi dati dal programma nella riproduzione, ad acqua ferma, di un'oscillazione naturale. Inoltre

questa esperienza fornisce anche un'indicazione, tramite le sonde d'onda resistive, del coefficiente di trasmissione  $kt$  che si verifica in assenza di controllo, un termine che verrà preso in considerazione nell'analisi finale di questo capitolo e di quello successivo.

Nel caso del galleggiante parzialmente bloccato, l'unico movimento permesso era solo l'oscillazione nella parte anteriore ancorata ai pali, mentre la posteriore risultava bloccata.

Questa esperienza è stata condotta per avere un confronto valido con l'esperienza successiva del galleggiante bloccato orizzontalmente dal controllo sotto studio. Inoltre è stato molto utile per registrare tramite cella di carico la forza delle sole onde non perturbata dal peso o dal movimento dello stesso frangiflutti.

Il principale obiettivo del test a galleggiante completamente bloccato è stato quello di analizzare l'eventuale attenuazione d'onda (variazione di  $kt$ ) di un caso limite come questo.

Tutti i test sopra citati sono stati sviluppati per diverse altezze d'onda (5 e 10 cm) e diversi periodi (da 0,5 a 2 s).

Riassumendo, questi test sono stati eseguiti per avere un confronto valido con le condizioni al contorno del sistema e le esperienze che verranno mostrate di seguito, in cui si è cercato di controllare il sistema ad avere le stesse caratteristiche dinamiche qui osservate, ovvero galleggiante libero o bloccato orizzontalmente. Potendo così avere indicazioni maggiori sulla qualità del controllo, come ad esempio verificare i coefficienti PID.

## 4.7 Tuning PID sonda di forza con test d'onda

In seguito alla calibrazione ad acqua ferma si è valutata l'efficienza del software sviluppato e dei coefficienti PID trovati e si è tentato, procedendo per tentativi, di modificarne i valori per stabilizzare al meglio il controllo.

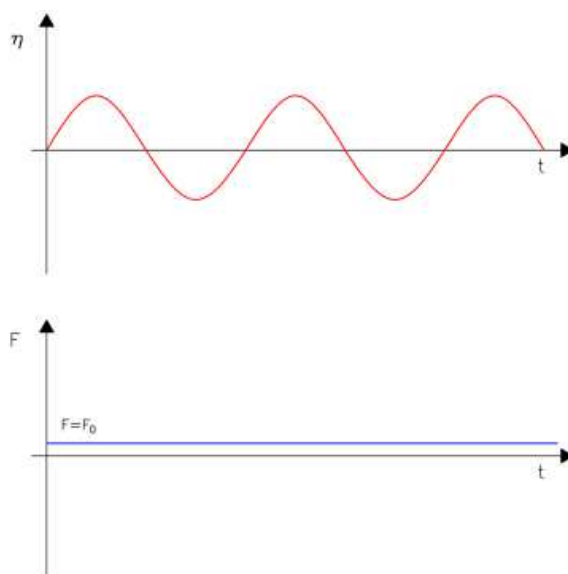
In particolare per eseguire questi test sono stati considerati come valore di riferimento i test effettuati per le condizioni al contorno, visti nel precedente paragrafo. Estrapolando da questi gli spostamenti medi calcolati con diverse altezze d'onda e periodo in cui non è stata applicata alcuna forza al sistema, essendo il galleggiante non collegato.

### 4.7.1 Sistema di forza compensativo

Per ogni test eseguito con onda è essenziale porre il galleggiante in una perfetta disposizione orizzontale in acqua in modo da compensare il peso del carrello che insiste sul galleggiante tramite la giunzione data dalla barra d'ottone. Per far questo, basta rilevare la misura della cella di carico in capo alla barra in questa configurazione.

Ponendo questo valore come set point si cerca di simulare la condizione del galleggiante completamente libero. Infatti, l'obiettivo di questo test è che i dati immessi, ottenuti dalla cella di carico, vengano elaborati dal software LabView il più rapidamente possibile e rispediti all'inverter e al motore, consentendo in tal modo un movimento il più simile possibile a quello del flottante libero. Nella Figura 4.13 sono

riportati i due grafici che rappresentano la variazione teorica di posizione del galleggiante e forza nel tempo quando è attivo questo controllo.



**Figura 4.13 - Variazione teorica di posizione del galleggiante e forza nel tempo nel test di sistema di forza compensativo**

I test sono stati eseguiti solo con onde regolari, consentendo in questo modo un confronto più semplice e preciso della loro efficienza:

1. La prima prova con  $T_p=1$  s e  $H_{si} = 5$  cm;
2. il secondo per  $T_p=2$  s e  $H_{si} = 5$  cm;
3. l'ultimo per  $T_p=2$  s e  $H_{si} = 8$  cm.

Durante questo test, tramite un controllo su LabView si variava uno dei tre coefficienti PID di una piccola quantità e tenuto costante per un minuto. Questo ha permesso di studiare il comportamento dell'impianto durante l'intera fase del test e annotarne i comportamenti al variare dei valori per trovare il sistema più efficiente. Tutti i test effettuati sono visualizzabili nell'Appendice B dove sono riportati i dati caratteristici e i risultati corrispondenti per ciascun test, per ogni minuto.

Si potrebbero fare diverse considerazioni visualizzando i risultati di questi test. La prima eseguita è stata appunto quella di rilevare lo spostamento medio per confrontarlo con i test a galleggiante libero, si nota che nei test in cui  $K_P$  è maggiore si ha una buona corrispondenza a livello di spostamento.

D'altra parte, come già visto, l'aumento di  $K_P$  provoca il conseguente aumento del rumore che non è accettabile poiché ridurrebbe le prestazioni e la qualità della strategia di controllo.

Per questo motivo è stata introdotto nello studio la definizione del rapporto segnale su rumore (Signal to Noise Ratio - SNR) definito come:

$$SNR = \frac{\text{Potenza del segnale utile}}{\text{Potenza del rumore}}; \quad (4.1)$$



Si definisce in questo modo l'ulteriore obiettivo del SNR più grande possibile, che implica piccoli disturbi del rumore. Si capisce subito che al crescere di  $K_P$  ci sarà un migliore spostamento medio ma ciò causerà una conseguente riduzione del SNR

Nella Figura 4.14, per i tre test delle onde (Numero test: 036, 037, 038), sono riportate le variazioni del rapporto tra lo spostamento rivelato effettivo e quello che si verifica quando il galleggiante è libero di galleggiare, e nei grafici della Figura 14 i valori corrispondenti di SNR.

Come previsto, i grafici della Figura 4.14 presentano una chiara tendenza, confermando l'ipotesi iniziale che con un aumento del  $K_P$ , il galleggiante mostrerebbe uno spostamento più ampio. D'altra parte, osservando i grafici della Figura 4.15, è possibile osservare che una maggiore quantità di rumore è generalmente correlata a un valore più elevato del  $K_P$ . Ma qui non è possibile richiamare una chiara tendenza, rilevando in realtà valori discordanti, probabilmente a causa di processi che si verificano con l'interazione tra dispositivo mobile, onde e input del motore.

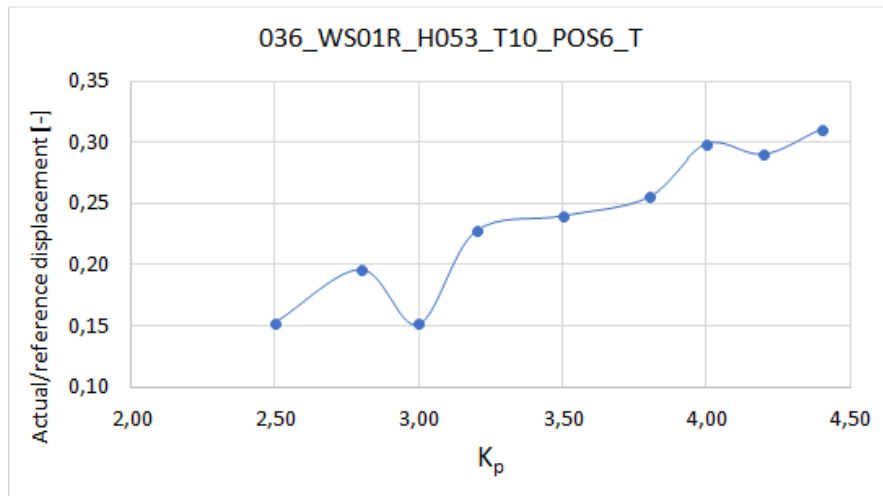
Non è possibile modificare solo il  $K_P$ : sono da considerare, non solo la stabilità del processo, ma anche la memoria dello stato precedente e l'andamento della variazione, pertanto è possibile modificare il valore del  $K_I$  e del  $K_D$ . Nello stesso test eseguito con la variazione del valore proporzionale ogni minuto (036, 037 e 038), è stato anche modificato il valore del coefficiente derivativo  $K_D$  mantenendo costanti altri parametri; nella Figura 4.16 sono riportati alcuni dei grafici risultanti da questo lavoro. Alcune considerazioni possono essere fatte:

- in generale un aumento del coefficiente derivativo induce un leggero miglioramento della capacità del dispositivo di seguire il comportamento flottante, le barre arancioni sono sempre più elevate proporzionalmente al coefficiente derivativo;
- d'altra parte, con un'onda di breve periodo, l'incremento del coefficiente derivativo non ha la stessa rilevanza, anche se si percepisce comunque un piccolo miglioramento;
- con la presenza di un coefficiente  $K_D$  diverso da zero, è possibile notare una netta diminuzione del valore SNR;
- SNR non cambia significativamente tra i diversi valori  $K_D$  e non mostra un andamento riconoscibile e costante.

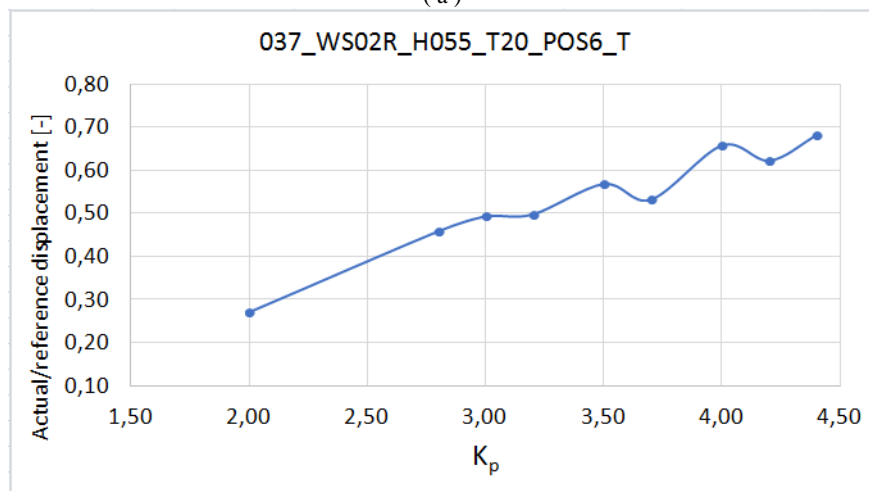
Si sono analizzati solo gli effetti dei soli coefficienti proporzionale e derivativo e in Figura 4.17 è possibile avere un quadro completo delle prove fatte, sono riportati il valore di SNR e il rapporto tra lo spostamento effettivo e quello di riferimento a galleggiante libero, ottenuto ogni minuto variando il valore PID.

È evidente che non esiste un insieme di coefficienti che massimizzino lo spostamento e minimizzino allo stesso tempo il rumore.

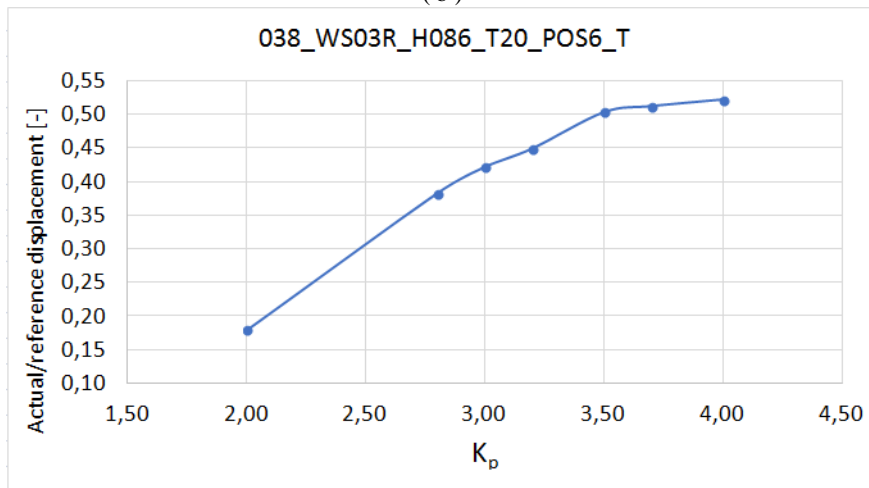
Guardando però a livello generale tutti i test, si può notare che si hanno in media buone prestazioni per  $K_P=3,0 \div 3,2$  e  $K_D=0,001 \div 0,0001$ . Questi valori sono molto simili ai valori trovati tramite il primo tuning in Tabella 4.3 e in questo modo convalidano i risultati. Nella decisione di quale coefficiente prefissato debba essere adottato per il test successivo, viene data maggiore importanza alla minimizzazione del rumore rispetto alla vicinanza allo spostamento desiderato, al fine di garantire la sicurezza del dispositivo e dei suoi componenti. Per questo motivo il set finale utilizzato è quello ottenuto nella sezione precedente col tuning eseguito secondo il metodo Ziegler e Nichols.



(a)

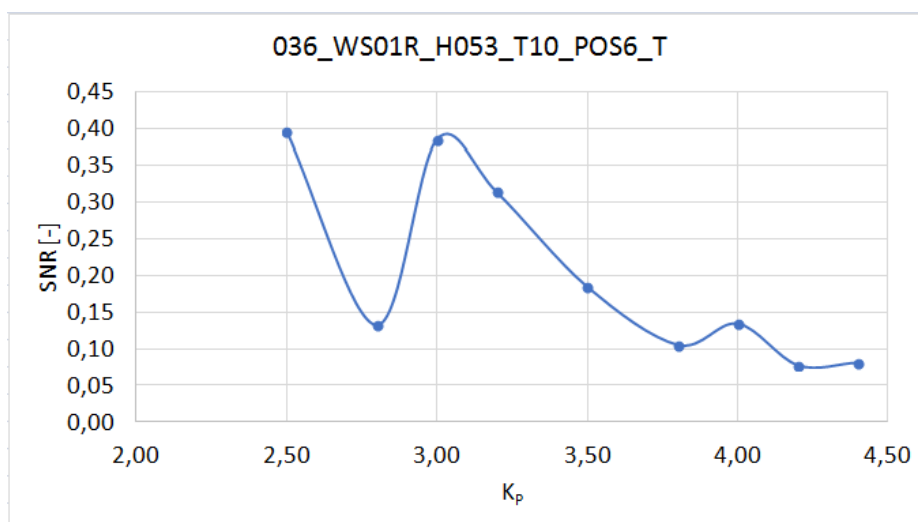


(b)

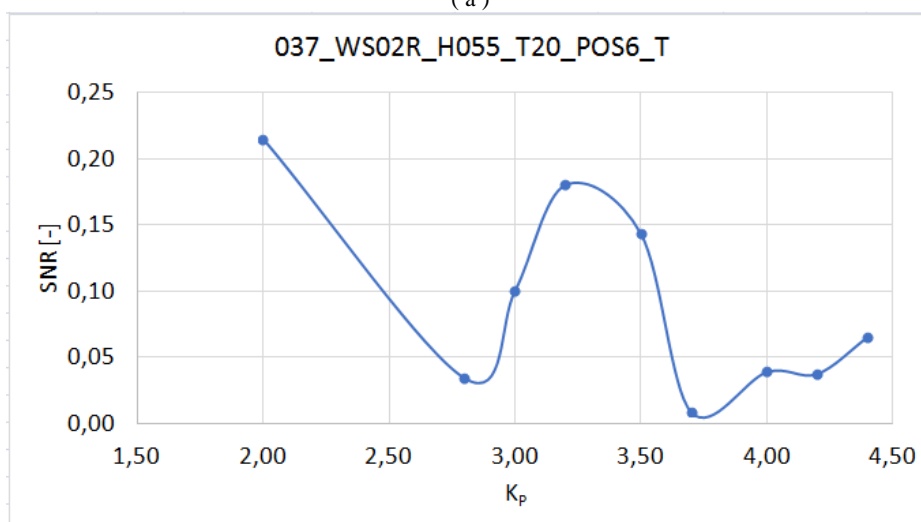


(c)

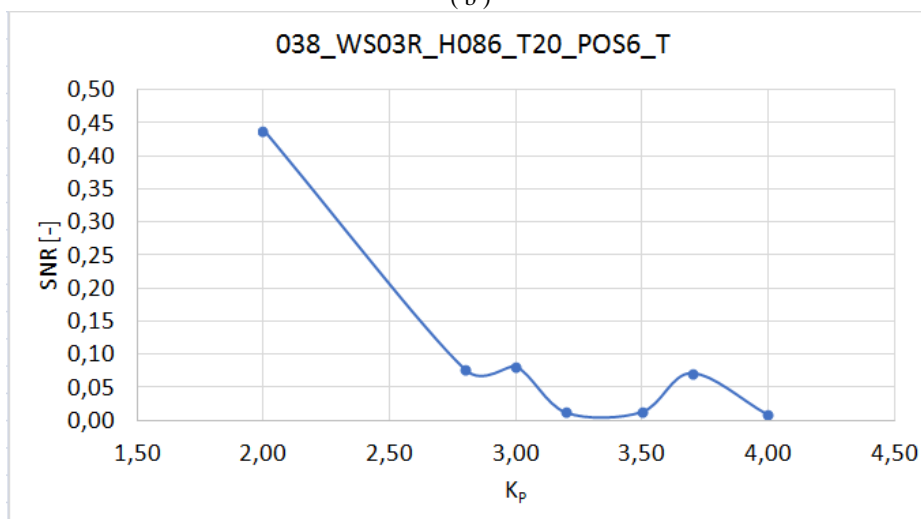
Figura 4.14 - Rappresentazione della variazione del rapporto tra spostamento reale e di riferimento con valori crescenti di  $K_p$ . (a)  $H_{si}=5$  cm  $T_p=1$ s; (b)  $H_{si}=5$  cm  $T_p=2$ s; (c)  $H_{si}=8$  cm  $T_p=2$ s.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15 - Rappresentazione della variazione di SNR con valori crescenti di  $K_p$ . (a)  $H_{si}=5$  cm  $T_p=1s$ ; (b)  $H_{si}=5$  cm  $T_p=2s$ ; (c)  $H_{si}=8$  cm  $T_p=2s$ .

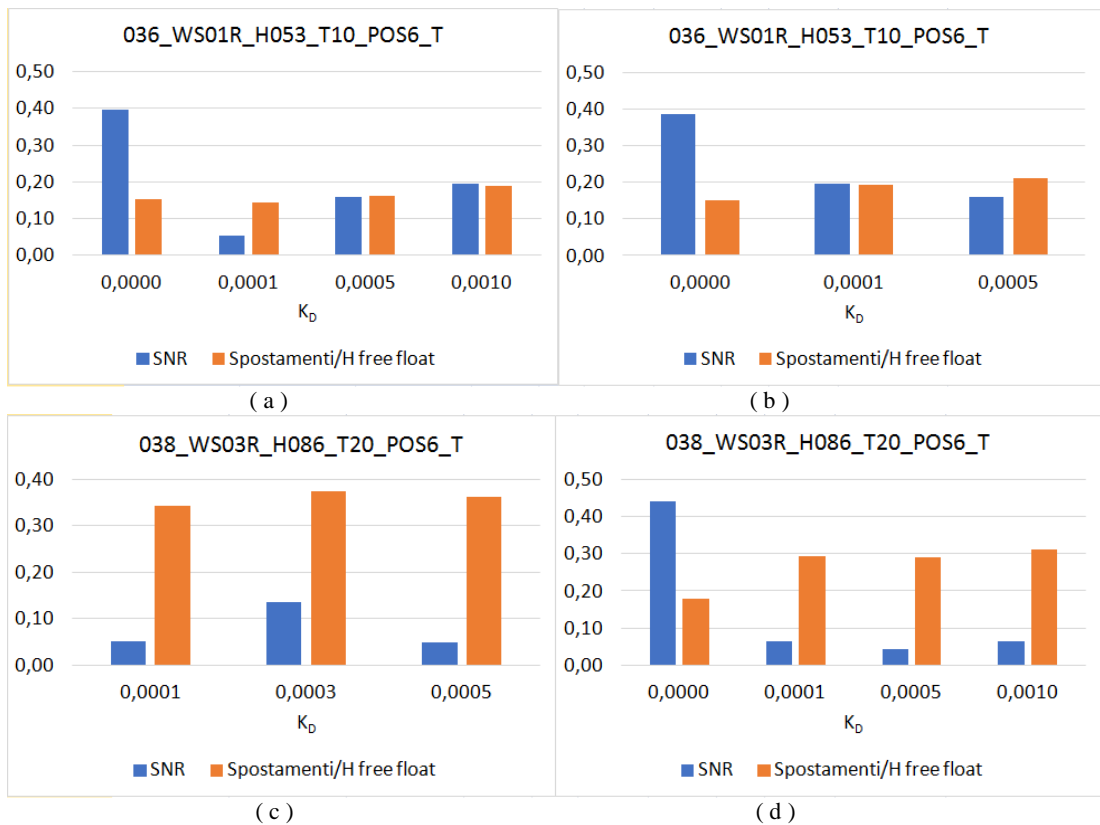
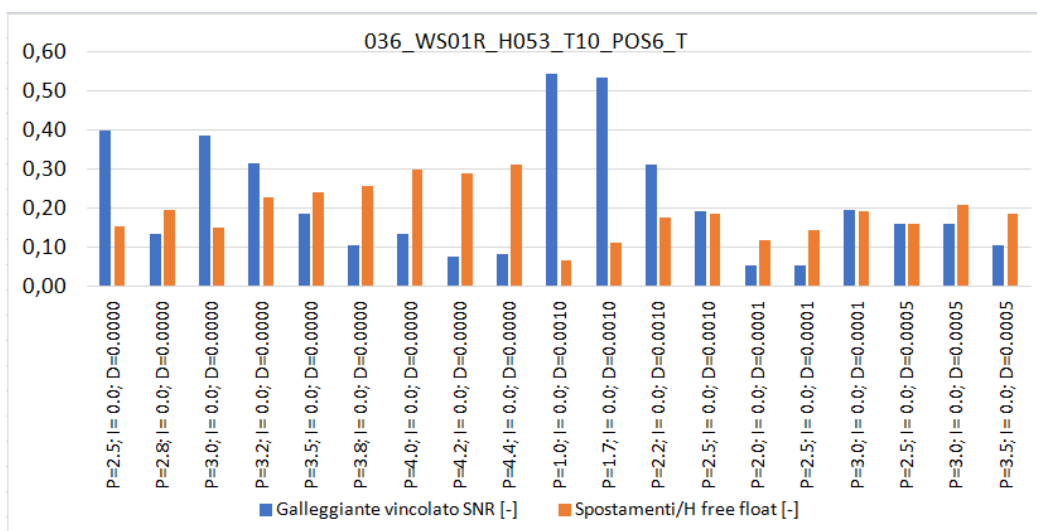
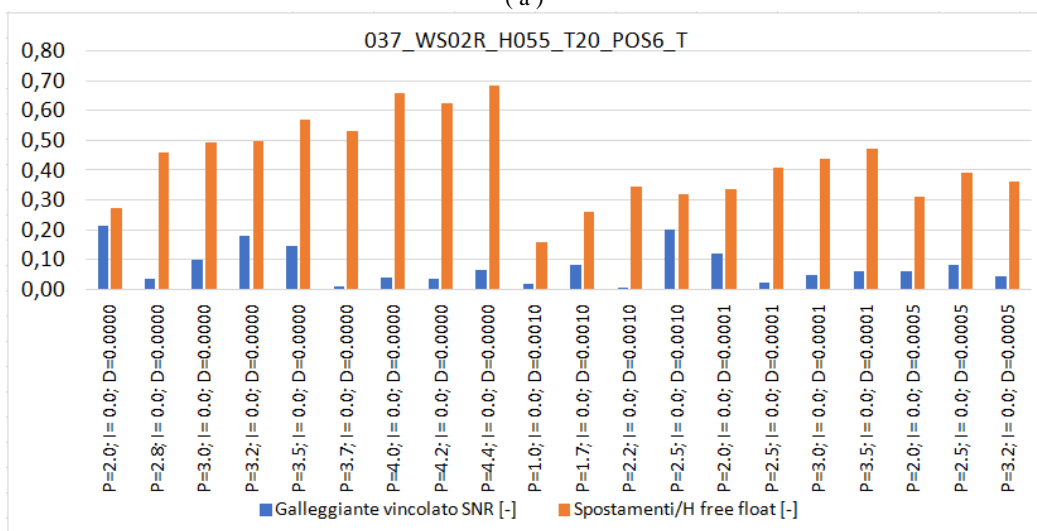


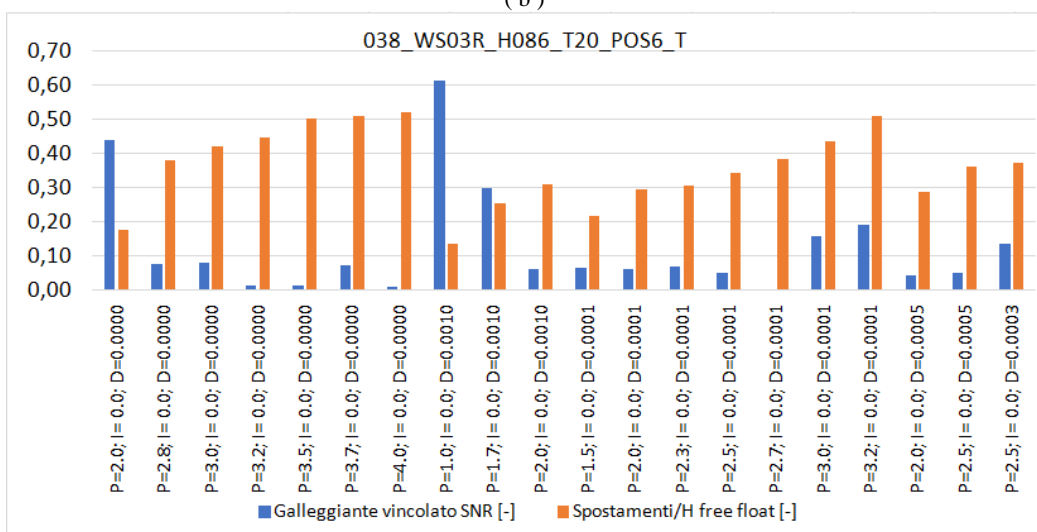
Figura 4.16 - Variazione del rapporto tra spostamento effettivo e il riferimento SNR, con un valore crescente del coefficiente derivato  $K_D$ . (a) Test 036 con  $K_p=2,5$ ; (b) Test 036 con  $K_p=3,0$ ; (c) Test 038 con  $K_p=2,0$ ; (d) Test 038 con  $K_p=2,5$ .



(a)



(b)



(c)

Figura 4.17 - Variazione del rapporto tra spostamento reale e il riferimento SNR, con tutti i valori considerati dei coefficienti PID impostati

## 4.8 Controllo tramite posizione

Altri test eseguiti prevedono l'uso del trasduttore di posizione per il controllo del movimento del galleggiante si analizzeranno in seguito: galleggiante controllato al blocco orizzontale, galleggiante con movimento sinusoidale imposto ad acqua ferma e l'analisi dei risultati ottenuti.

### 4.8.1 Galleggiante controllato al blocco orizzontale

Si eseguono dei test imponendo un set point costante pari alla posizione misurata dal trasduttore di posizione quando il corpo è perfettamente orizzontale in acqua ferma, in pratica si inibiscono i movimenti lungo la direzione verticale.

L'obiettivo principale di questo test è la preparazione del sistema affinché funzioni nella situazione reale del mare, quindi anche se molti dei test vengono eseguiti con un'onda sinusoidale regolare, nella realtà si avrebbe un'onda irregolare. Per questo motivo, quando si pensa al sistema di controllo della posizione, non è possibile definire un'ampiezza e un periodo d'onda predeterminati, poiché non sarà certamente rappresentativo di una reale condizione dello stato del mare.

Dato che si è appurato che la sonda di posizione ha migliori qualità di segnale e quindi di risposta, questo test è utile per capire la velocità di risposta dell'intero sistema, quindi tutta la capacità nel percepire la misurazione tramite sonda e inviarla al controllo LabView, che deve essere abbastanza veloce inviando le informazioni all'inverter che dà il comando il più velocemente possibile al motore.

Si può osservare lo schema di funzionamento teorico del test in Figura 4.18. Si vuole mantenere la posizione del galleggiante  $\eta$  costante, per cui anche il setpoint sarà costante come detto prima, la forza misurata teoricamente dalla cella varia teoricamente con una forma abbastanza sinusoidale, a causa dell'onda incidente e della variazione del livello dell'acqua.

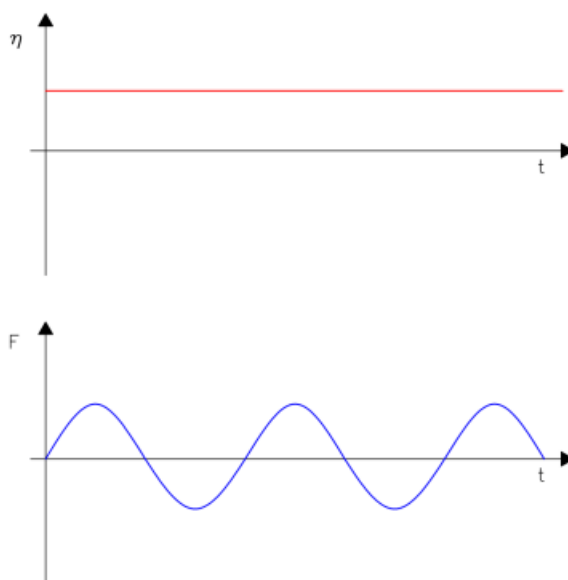


Figura 4.18 - Posizione del galleggiante impostata e forza teorica attesa

Questi test vengono eseguiti con le seguenti tre caratteristiche d'onda regolari:

- $H_{si} = 5 \text{ cm}$  e  $T_p = 1 \text{ s}$ ;
- $H_{si} = 5 \text{ cm}$  e  $T_p = 2 \text{ s}$ ;
- $H_{si} = 8 \text{ cm}$  e  $T_p = 2 \text{ s}$ .

#### 4.8.2 Galleggiante con movimento sinusoidale imposto ad acqua ferma

Infine si esegue un test con controllo tramite posizione, imponendo innanzitutto un set point che garantisca la posizione perfettamente parallela al pelo d'acqua e poi tramite un comando ad hoc si comanderà un movimento sinusoidale al galleggiante. Questo è un test ad acqua ferma, pertanto gli unici movimenti sono quelli imposti dal software LabView all'inverter e quindi al motore, questi movimenti hanno lo scopo di simulare il funzionamento del sistema in condizioni di sicurezza, poiché non sono presenti onde incidenti, per verificare se i coefficienti PID siano in grado di funzionare con regolarità.

Consentono, inoltre, un confronto tra la posizione e la variazione di forza con il controllo del motore rispetto al caso di galleggiante completamente libero, evitando così irregolarità dovute al processo di acquisizione dei dati, ma che spiegano il ritardo dell'inverter e del motore e i limiti fisici della struttura.

Il comando ad hoc utilizzato per imprimere il movimento sinusoidale si può osservare nell'Host LabView in Figura 4.19 dove è possibile definire sia l'ampiezza (in volt) che la frequenza (in herz).

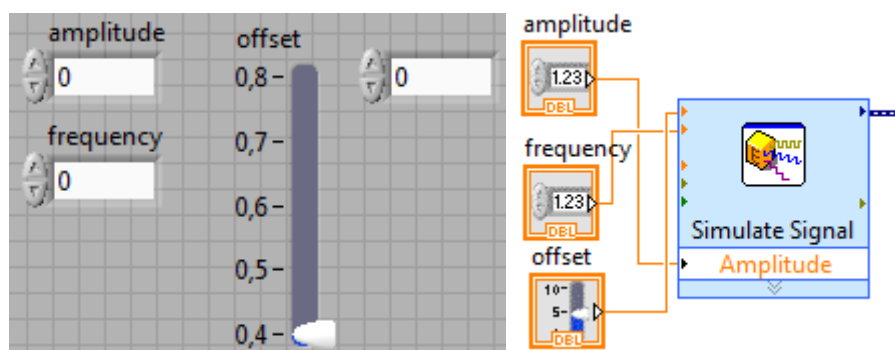


Figura 4.19 - Finestra di controllo della sinusoide nel front panel e nel diagramma a blocchi del software Labview

I test vengono eseguiti con le seguenti caratteristiche, definite nella pagina Host LabView, che chiede di inserire frequenza e ampiezza:

- Test: con frequenza di 0,4 Hz e ampiezza di 0,25 V;
- Test: con frequenza di 0,5 Hz e ampiezza di 0,20 V;
- Test: con frequenza di 1 Hz e ampiezza di 0,20 V;
- Test: con frequenza di 1 Hz e ampiezza di 0,10 V.

Il test delle strategie di controllo viene implementato solo per onde regolari, di altezza costante 5 cm e periodo di 0,5 s, 0,75 s, 1,0 s, 1,25 s, 1,5 s, 1,75 s e 2,0 s.

Questo stesso test è stato eseguito successivamente anche con controllo in forza.

### 4.8.3 Analisi dei dati sui test di riferimento

Si presentano i risultati ottenuti dai test preliminari appena citati. Tali sistemi sono stati pensati e studiati con lo scopo principale di capire il funzionamento e controllare al meglio la risposta del sistema. I test di riferimento considerati in questa sezione sono caratterizzati da un codice di riferimento, come segue:

- POS 7: detto anche "test del galleggiante completamente libero" dove il frangiflutti è stato disconnesso sia dalla cella di carico che dal motore; (vedi paragrafo 4.6 e Figura 4.10)
- POS 8: raccoglie tutti i test eseguiti con galleggiante bloccato a valle, qui il galleggiante non era in grado di muoversi, ma vengono misurate le forze che agiscono sul corpo;
- POS 9: raccoglie tutti i test eseguiti con corpo flottante controllato dalla strategia di controllo della posizione, che consente al corpo di rimanere fisso nella posizione orizzontale ad acqua ferma;
- POS 10: raccoglie tutti i test eseguiti con il corpo flottante controllato dalla strategia di controllo della forza, che fa sì che il corpo segua una simulazione di condizione fluttuante, assumendo una forza  $F = F_0$ , il cosiddetto sistema di forza compensativo discusso nel paragrafo 4.7.1.

Tutte queste configurazioni vengono eseguite per onde caratterizzate da un'altezza d'onda di 5 cm e un periodo di: 0,5 s, 0,75 s, 0,8 s, 0,85 s, 0,9 s, 0,95 s, 1,0 s, 1,25 s, 1,5 s, 1,75 s e 2,0 s. I dati sono analizzati da un codice MATLAB, che raccoglie sia le misurazioni LabView sia le misurazioni delle sonde d'onda. Verranno in seguito valutati i dati di ogni test in base agli obiettivi che si proponeva questo elaborato di tesi, ovvero quello di attenuare al meglio l'onda ricavando il maggior livello di energia possibile. Le principali grandezze valutate sono:

- Il coefficiente di trasmissione  $K_t$ , che fornisce una misura di efficienza del frangiflutti, definito come il rapporto tra l'altezza dell'onda trasmessa (ovvero successiva al galleggiante) e quella dell'onda incidente:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}; \quad (4.2)$$

deve tendere al minor valore possibile.

- Energia  $E$ , che risale dalla potenza calcolata tramite software Matlab nel seguente modo:

$$P = Forza \cdot Velocita = \frac{Posizione(n) - Posizione(n-1)}{t(n) - t(n-1)} \cdot Forza(n); [W] \quad (4.3)$$

Dalla potenza è possibile risalire all'energia dal rapporto tra la somma delle potenze ( $P_{sum}$ ) e la durata di tempo del test ( $t$ ):

$$E = P_{sum} \cdot \frac{t}{3600}; [Wh] \quad (4.4)$$

La prima analisi condotta pone sotto studio il rapporto tra la forza media che agisce sulla cella di carico ( $F_{rms}$ ) e l'altezza d'onda incidente corrispondente ( $H_{si}$ ) e la sua variazione con il periodo d'onda crescente. Si riportano i dati in Figura 4.20 dove è possibile vedere i valori assunti da  $F_{rms}/H_i$  per tre configurazioni POS 8, POS 9 e POS 10, per il POS 7 quest'analisi ha poco senso perché non abbiamo valori di forza misurati.



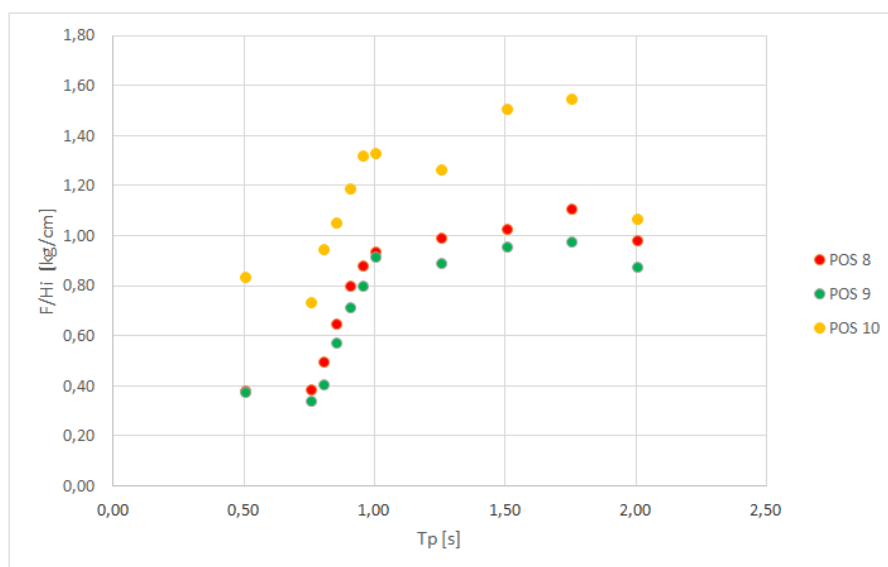


Figura 4.20 - Variazione di  $F_{rms}/H_i$  per valori crescenti di  $T_p$ , con POS 8 - 9 - 10

Le configurazioni mostrano una proporzionalità diretta tra il rapporto e l'aumento del periodo d'onda. Si hanno risultati positivi in merito al loro confronto, a dimostrazione del fatto che il controllo sia efficiente, in quanto il galleggiante reagisce allo stesso modo sia tramite bloccaggio meccanico (POS 8) sia in controllo di posizione fissa (POS 9). Ovviamente i dati del POS 8 sono leggermente più alti ma tutto sommato di una differenza accettabile.

D'altra parte il controllo della forza con sistema compensativo (POS 10) mostra valori più alti, se si pensa che tale controllo è stato scritto di modo che il galleggiante cercasse di riprodurre al meglio il movimento oscillatorio dell'onda, si arriva a dedurre che la forza registrata sia dovuta al continuo aggiornamento del sistema agli impulsi esterni dell'onda incidente. In altre parole, il sistema, per mantenere una forza "nulla" doveva continuamente aggiornarsi con la forza che registrava sul momento. Poiché l'applicazione della forza si verifica sempre con un certo ritardo, ciò implica che il software induca una forza maggiore da applicare dal motore, al fine di ridurre questo ritardo.

Si valuta adesso un altro operatore chiamato RAO che dà una misura della qualità di risposta del sistema all'input d'onda d'ingresso, infatti è dato dal rapporto tra lo spostamento del galleggiante e l'altezza dell'onda incidente. Si valutano le quattro configurazioni in Figura 4.21.

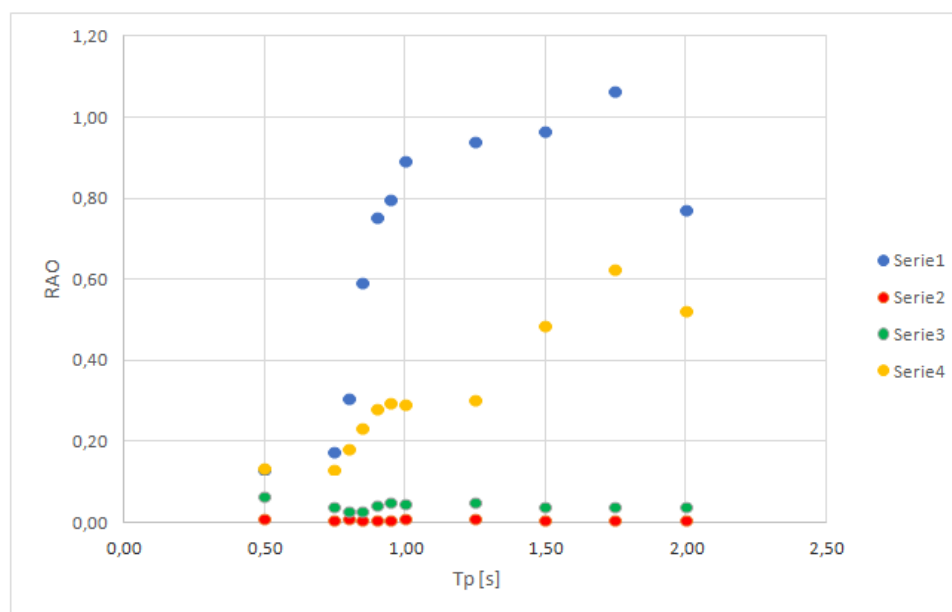


Figura 4.21 - Variazione di RAO per valori crescenti di  $T_p$ , con le quattro configurazioni in analisi

I valori RAO assunti in condizioni di bloccaggio, sono molto simili e vicini allo zero, con il POS 8 leggermente più efficace; questi risultati confermano la capacità del controllo di posizione di imitare il blocco fisico del galleggiante.

Per la valutazione del controllo in forza si è deciso di mettere al confronto la condizione di galleggiante completamente libero con  $H_{si} = 5$  cm (POS 7) con un controllo in forza del galleggiante con sistema compensativo della forza peso ovvero una compensazione dell'influenza che ha il carrello nella dinamica del galleggiamento (POS 10): qui i punti blu e i punti gialli dovrebbero essere vicini, ma in realtà mostrano differenze notevoli. Ciò rende ancora una volta evidente l'incapacità del controllo di forza di essere efficiente nel controllo. Le differenze tra i punti continuano ad aumentare con l'aumentare del periodo, perché, con un piccolo periodo, il galleggiante non è in grado di seguire l'intero movimento dell'onda a causa dei limiti fisici del galleggiante stesso.

Si analizza infine il coefficiente di trasmissione,  $k_t$  (Figura 4.22), calcolato rapporto tra  $H_{si}$  rilevato dalle sonde a valle e quello rilevato dalle sonde a monte in media. Qui, è facile rilevare una proporzionalità evidente tra  $k_t$  e il periodo  $T_p$ , questo è dovuto alla conformazione fisica del galleggiante, che è in grado di attenuare meglio il periodo più breve.

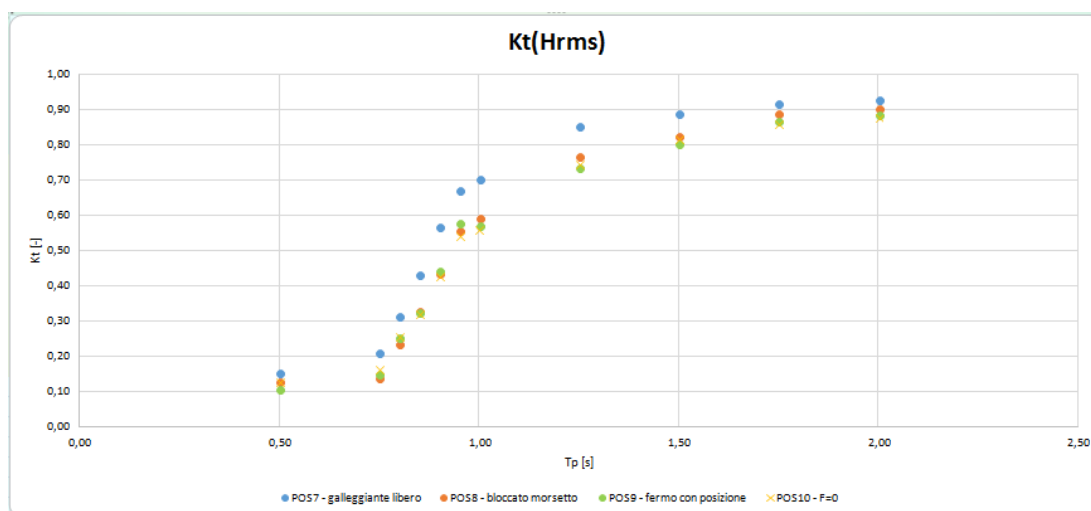


Figura 4.22 - Variazione di  $k_t$  per valori crescenti di  $T_p$ , con le quattro tipologie sotto analisi

Si può notare un andamento crescente fino al periodo  $T_p = 1s$  per poi avere una flessione della retta che interpolerebbe i restati pallini. Ciò sta a significare che il sistema riesce ad attenuare fino a circa il 50% delle altezze d'onda incidente per periodi inferiori all'unità.

Si nota che i dati del POS 7 sono i peggiori per l'attenuazione dell'onda. D'altra parte, le differenze tra le altre tre configurazioni sono molto limitate.

A questo punto vengono eseguiti set di dati comparativi e verifiche ed è possibile procedere nel capitolo seguente con l'effettiva attuazione di alcune strategie di controllo.

# 5 Strategie di controllo

In questo capitolo vengono illustrate alcune strategie di controllo utilizzate per controllare il motore in modo tale da ottenere diversi modelli funzionali a diversi scopi. Il primo tenta di smorzare le oscillazioni del galleggiante, imponendo una forza proporzionale alla sua posizione; il secondo impone una forza contraria alla direzione naturale del galleggiante; il terzo opera allo stesso modo, ma si basa sulla velocità. Alla fine, i risultati ottenuti con queste diverse metodologie vengono confrontati e analizzati al fine di ottenere più energia possibile.

## 5.1 Introduzione

Una volta evidenziate le caratteristiche del galleggiante, della progettazione del software LabView e soprattutto definiti i valori di guadagno del PID è ora possibile passare alla progettazione effettiva della procedura di controllo.

Verranno qui illustrate delle procedure sperimentali finalizzate al comprendere la strategia di comando della forza applicata dalla macchina per massimizzare la potenza convertita sulla base dei segnali acquisiti dalla sonda di posizione e di forza. Tale potenza ricavata come prodotto di forza e velocità del galleggiante risulta tuttavia soggetta a delle variabili di disturbo che sono da considerare quali soprattutto i ritardi dati dalla velocità di elaborazione e i disturbi dati dalle sonde.

Verranno presentati tre esperimenti testati e si visualizzeranno i relativi modelli di funzionamento, il relativo sviluppo in LabView, test eseguiti e analisi dei dati:

- **Metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione:** con questo metodo, la forza viene applicata resistendo al movimento naturale del galleggiante dovuto all'arrivo di una forza d'onda. Si controllerà il motore inviando un comando di forza in senso contrario a quella in entrata percepita dalla sonda di posizione ma solo dopo una certa soglia fissata a priori, in modo tale da avere una funzione di attenuazione. Per questo motivo la forza massima non viene applicata durante l'intero funzionamento, ma solo quando una certa soglia viene superata;
- **Metodo di controllo di inversione di marcia del motore:** in questo caso al sistema viene applicata una forza costante, variabile nel segno sulla base del segnale di forza della cella di carico. Il segno è definito dalla direzione oraria o antioraria della marcia del motore, in modo da opporsi al movimento d'onda fluttuante naturale.
- **Metodo di controllo tramite posizione precedente:** viene nuovamente applicata una forza costante contro le oscillazioni prodotte dall'onda, in questo caso considerando le informazioni sulla posizione negli istanti di tempo presenti e precedenti. Qui sono considerate sia la posizione nel momento della rilevazione del galleggiante  $i$  che quelle che si verificano negli istanti precedenti;

Eseguendo i test sulla procedura di controllo si è deciso di lavorare solo con un'onda di lungo periodo, al fine di avere un'implementazione più semplice, meno disturbata dalla lentezza dei processi computazionali; per questo motivo, solo i periodi considerati qui sono  $T_p=1,5$  s,  $T_p= 1,75$  se  $T_p = 2,0$  s. Per avere anche un'idea

visiva più chiara, riguardo alla verifica del rispetto della procedura, si presume un'altezza d'onda singolare, regolare e costante di 10 cm per tutti i test.

Verranno in seguito valutati i dati di ogni test in base agli obiettivi che si proponeva questo elaborato di tesi, ovvero quello di attenuare al meglio l'onda ricavando il maggior livello di energia possibile. Le principali grandezze valutate sono  $K_t$ ,  $P$  ed  $E$  già viste al paragrafo 4.8.3.

Definendo la raccolta dei dati, si decide di garantire un confronto tra condizioni controllate e condizioni di riferimento ad onda attiva, in cui nessun controllo era attivo, per questo motivo è stata aggiunta una nuova chiave nel pannello host per attivare/disattivare la procedura di controllo. In Figura 5.1 è riportata l'implementazione di LabView dell'interruttore "Controllo attivo" nel diagramma di flusso a blocchi del pannello host (Figura 5.1 a) e la manifestazione nell'interfaccia grafica del pannello host (Figura 5.1 b), qui è presente anche una piccola finestra definita "Range forza" utilizzato per definire il valore della forza in volt da applicare al galleggiante. Durante i primi secondi del test nessun controllo è attivo e successivamente il controllo viene attivato. Nella Figura è inoltre riportato lo switch "Salva file" utilizzato per avviare la raccolta dei dati, per evitare file di registrazione dei dati troppo grandi.

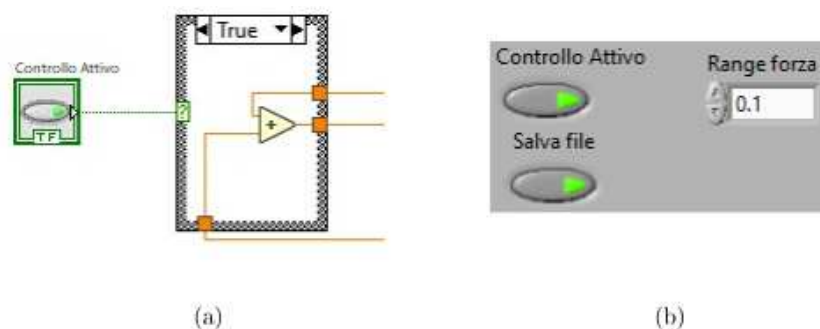


Figura 5.1 - Schermata LabView dello switch "Controllo attivo", nel pannello host (a) e nell'interfaccia grafica (b).

## 5.2 Metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione

### 5.2.1 Descrizione del modello e implementazione

Il primo metodo di controllo progettato è sviluppato con una forza che viene applicata al galleggiante per resistere al movimento naturale dell'onda. In ingresso al sistema di controllo si considera il segnale fornito dalla sonda di posizione, utilizzando quindi quest'ultima come variabile di processo di questo sistema di controllo. L'obiettivo principale di questa sperimentazione è la comprensione del principio di base della progettazione del controllo in LabView e del modo di sviluppare una forza che si oppone al movimento naturale del frangiflutti, in modo tale da smorzare al meglio l'onda. Simultaneamente alla funzione di attenuazione si vuole consentire un certo movimento, necessario per ottenere una certa energia. La tecnica sperimentata per questo set di prove ha l'obiettivo di diminuire l'altezza d'onda trasmessa  $H_t$  rispetto all'altezza d'onda incidente  $H_i$  in entrata, come si può

osservare in Figura 5.2, si evidenzia la differenza tra l'onda incidente (tratteggiata blu) e l'onda trasmessa attenuata (continua verde) dall'azione smorzante qui esercitata. In particolare è prevedibile un certo ritardo dell'onda attenuata dovuto ai ritardi di elaborazione, controllo e filtraggio dei segnali.

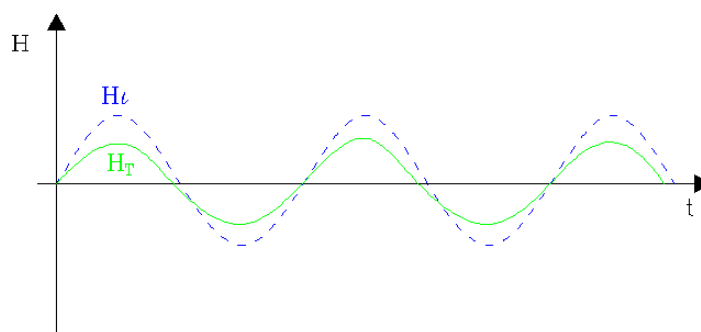


Figura 5.2 - Differenza tra onda incidente e onda trasmessa

Lo sviluppo di questo modello viene effettuato come mostrato nella Figura 5.3: finché la posizione del galleggiante  $\eta$  è inferiore alla soglia selezionata  $+\eta_0$  ed è superiore alla soglia  $-\eta_0$  il motore reagisce con una forza proporzionale e opposta al rapporto tra la differenza tra la sua posizione attuale e lo zero di riferimento (identificato dall'asse delle ascisse) e lo spessore delle due bande venutesi a creare  $[(+\eta_0) \div 0$  e  $0 \div (-\eta_0)]$ .

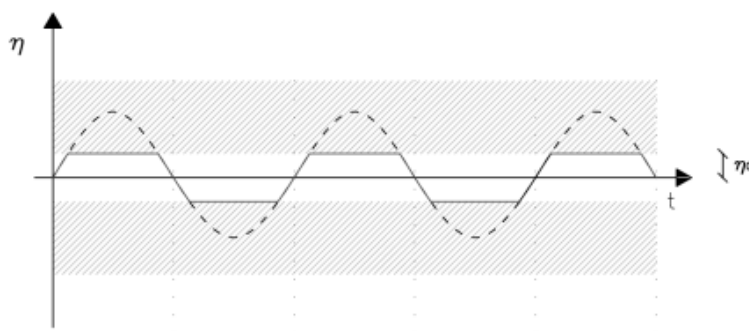


Figura 5.3 - Schema che rappresenta un'onda incidente e le zone in cui la massima forza applicata FM si oppone al movimento del corpo, rappresentato dalla regione scura; e zona in cui viene applicata una forza più piccola e proporzionale, rappresentata da una regione chiara

Come si può notare in Figura 4, si controlla la forza del motore in diversi modi a seconda della posizione  $\eta$  del galleggiante e dell'andamento dell'onda, definito:

$$\alpha = \frac{\eta}{\eta_0}; \quad (5.1)$$

si ha:

- $0 < \eta < (+\eta_0)$  : per opporsi ad un'onda crescente si applica una forza  $F = -\alpha F_M$ ;
- $\eta > (+\eta_0)$  : Superata la soglia positiva, si applica la forza massima negativa  $F = -F_M$ ;
- $(+\eta_0) < \eta < (-\eta_0)$  : si nota un andamento decrescente quindi si applica  $F = \alpha F_M$ ;
- $\eta < (-\eta_0)$  : Superata la soglia negativa, si applica la forza massima positiva

$$F = F_M;$$

A questo punto è possibile osservare la forza impressa dal motore al sistema in Figura 5.4: la forza massima  $F_M$  non appena viene superata la soglia, mentre quando si sposta tra soglia negativa e positiva è curva, anche se molto simile a una linea retta.

Per ottenere questo controllo si è andati a modificare il pannello host del programma LabView che si può osservare in Figura 5.5. Oltre ad aver aggiunto i componenti per attivare il controllo, sopra di essi sono state inserite le "case structure" necessarie per questa tipologia di controllo, che si possono osservare in Figura 5.6.

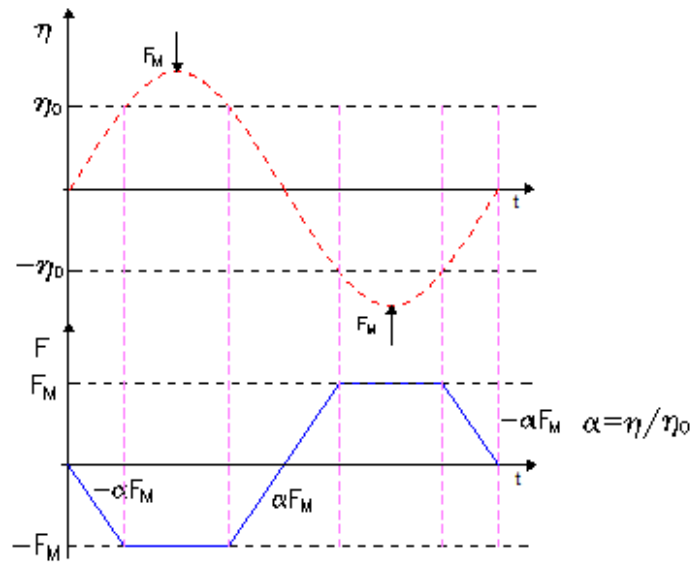


Figura 5.4 - Schema di funzionamento generale della forza nel controllo di attenuazione dell'oscillazione

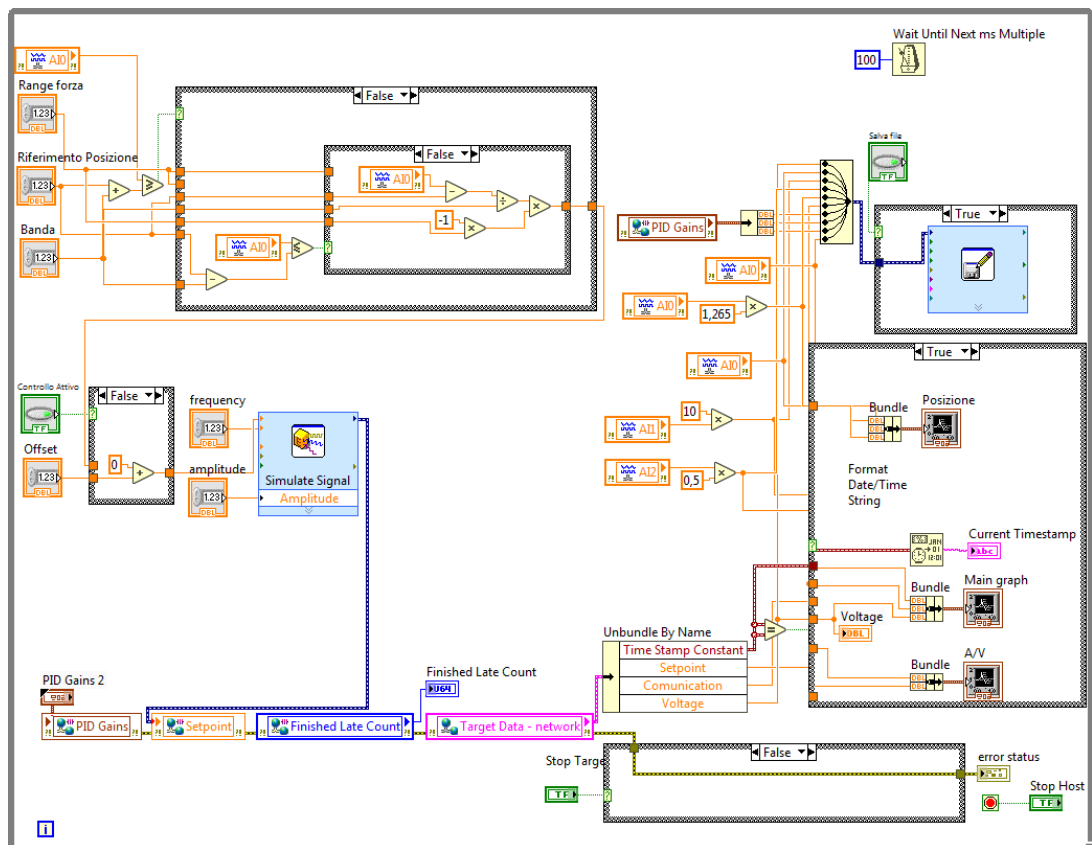


Figura 5.5 - Schema a blocchi del pannello Host del programma Labview sul controllo di attenuazione dell'oscillazione

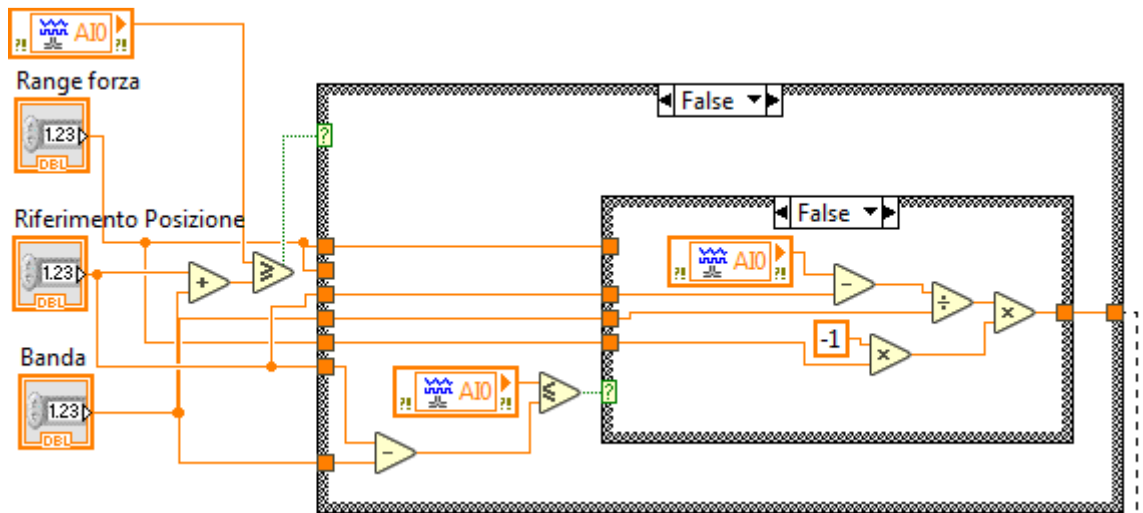


Figura 5.6 - Dettaglio dello schema a blocchi specifico per il controllo di attenuazione dell'oscillazione

In entrata a questa parte di programma si hanno:

- AIO (Analogic Input 0): Costituisce l'entrata analogica corrispondente alla sonda di posizione, in sostanza essa costituisce la variabile  $\eta$ .
- Riferimento di posizione: corrisponde alla posizione 0 del nostro sistema, ovvero quella misurata ad acqua ferma.



- Banda: corrisponde al  $\eta_0$  del caso teorico, si somma al riferimento di posizione per costruire la banda per cui il sistema reagisce in modo proporzionale.
- Range forza: che rappresenta il valore di  $F_M$  in volt.

Come si può ben notare dallo schema logico il valore di Riferimento di posizione si somma al valore di Banda, si confronta questa somma con il valore uscente dalla sonda AIO: se la misura AIO è più piccola, si verifica una condizione di "False" nel case structure; a seguire, viene inserita la differenza tra la posizione di riferimento e il valore di banda e se questo valore risulta minore di AIO il valore del case structure seguente è di nuovo falso, l'ultimo caso è nella configurazione False e rappresenta la posizione del galleggiante all'interno del campo di banda definito, qui agisce il "Range forza" rappresentato dalla costante di proporzionalità:

$$\alpha = \frac{AIO - \text{Riferimento Posizione}}{\text{Banda}} ; \quad (5.2)$$

Se non vengono rispettate le condizione sopra citate significa che il galleggiante si troverà al di fuori della banda quindi verrà applicata la forza massima.

### 5.2.2 Test e analisi dati

Si sono eseguiti i primi test al fine di capire quale intervallo di posizione ("Banda") e quale forza applicata ("Range forza") sarebbero stati più efficaci per il sistema. Assumendo un valore costante del periodo d'onda, pari a  $T_p = 2,0$  s per la Tabella 5.1 e pari a  $T_p=1,5$  e  $T_p=1,75$  per la Tabella 5.2. L'intervallo di posizione tra 0 e  $\eta_0$  qui considerato è pari a 0,05 V, 0,1 V e 0,15 V e considerando la costante di misura (vista al paragrafo 4.1.2) avremo 0,25 cm, 0,5 cm e 0,75 cm rispetto al riferimento di posizione; mentre per la forza applicata vengono selezionati i valori 0,05 V, 0,1 V, 0,15 V e 0,2 V. Ogni test dura 300 s.

Attraverso l'interfaccia grafica dell'host LabView: si possono modificare le variabili e visualizzare il comando di tensione applicata all'inverter che controlla la velocità del motore e come il segnale del valore della sonda inseguire il setpoint, che rappresenta il modello teorico di controllo che vogliamo ottenere e il sistema tramite il PID cerca di ottenere.

Per comprendere le differenze che si verificano assumendo diversi valori di intervallo di posizione e forza applicata, nella Figura 5.7 sono riportati due output del grafico raccolti dall'interfaccia grafica del test dei dati LabView. In particolare, il primo (Figura 5.7 (a)) è tratto dal Test 091, caratterizzato da un intervallo di posizione pari a 0,10 V e una forza applicata pari a 0,05 V; mentre il secondo (Figura 5.7 (b)) è preso dal Test 094, dove l'intervallo di posizione è ancora uguale a 0,10 V e la forza applicata a 0,20 V. Le diverse linee nella Figura 5.7 rappresentano: con il colore verde è indicato il comando di tensione applicata al motore, imposto per ottenere il setpoint corretto; con il colore rosso, il valore effettivo registrato dalla sonda utilizzata che dovrebbe inseguire il valore di setpoint, di colore blu.

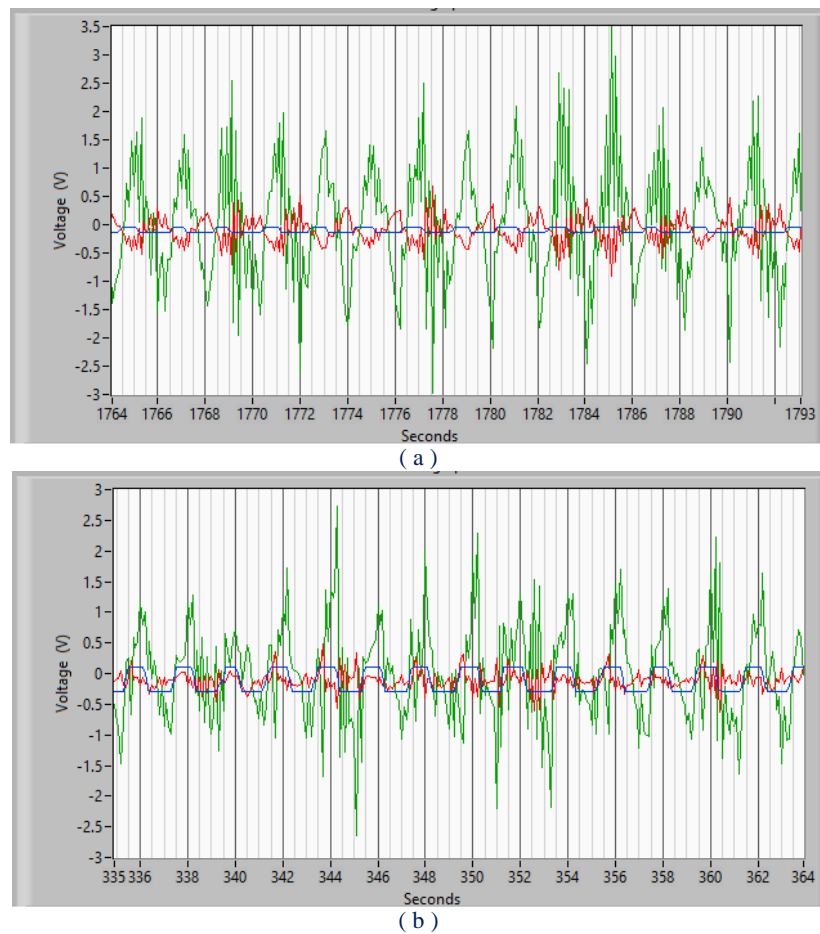


Figura 5.7 - Cattura dell'interfaccia grafica dell'host LabView riguardo il Test 091 (a) e il Test 094 (b)

Si è notato che per valori di banda costanti a una forza applicata maggiore corrisponde uno spostamento più ampio del valore del setpoint, mentre un valore più piccolo corrisponde ad una variazione inferiore. Si può osservare tutto questo dal confronto in Figura 5.7, per cui si può verificare che a banda fissa esiste una certa proporzionalità tra la forza applicata e la variazione del setpoint: un valore alto di forza applicata mostra un comportamento più ampio del setpoint (Figura 5.7 b), al contrario si osserva un comportamento più stretto del setpoint, perché viene imposto un segnale  $V$  più piccolo (Figura 5.7 a).

Se ci fosse invece un confronto tra la forza applicata costante e un intervallo di posizione imposto diverso, sarebbe possibile vedere che con un intervallo di posizione più piccolo, un tempo più lungo sarà caratterizzato dalla massima forza applicata  $F_M$ ; mentre per un intervallo di posizione più elevato, la forza massima verrà applicata per un tempo inferiore. Questo perché un intervallo più ampio viene superato in minor tempo rispetto a un intervallo più ristretto.

Test ID	Periodo [s]	Range di posizione [V]	Forza applicata [V]	Forza applicata [N]
087_WS17R_H100_T20_PS13_T	2.00	0.05	0.05	5
088_WS17R_H100_T20_PS14_T	2.00	0.05	0.10	10
089_WS17R_H100_T20_PS15_T	2.00	0.05	0.15	15
090_WS17R_H100_T20_PS16_T	2.00	0.05	0.20	20
091_WS17R_H100_T20_PS17_T	2.00	0.10	0.05	5
092_WS17R_H100_T20_PS18_T	2.00	0.10	0.10	10
093_WS17R_H100_T20_PS19_T	2.00	0.10	0.15	15
094_WS17R_H100_T20_PS20_T	2.00	0.10	0.20	20
095_WS17R_H100_T20_PS21_T	2.00	0.15	0.05	5
096_WS17R_H100_T20_PS22_T	2.00	0.15	0.10	10
097_WS17R_H100_T20_PS23_T	2.00	0.15	0.15	15
098_WS17R_H100_T20_PS24_T	2.00	0.15	0.20	20

**Tabella 5.1 - Test eseguiti per il metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione, sviluppati con  $T_p=2,00$  e diversi range di forza**

Test ID	Periodo [s]	Range di posizione [V]	Forza applicata [V]	Forza applicata [N]
135_WS24R_H100_T17_PS17_T	1,75	0.10	0.05	5
136_WS24R_H100_T17_PS18_T	1,75	0.10	0.10	10
137_WS24R_H100_T17_PS19_T	1,75	0.10	0.15	15
138_WS24R_H100_T17_PS20_T	1,75	0.10	0.20	20
143_WS23R_H100_T15_PS17_T	1,50	0.10	0.05	5
144_WS23R_H100_T15_PS18_T	1,50	0.10	0.10	10
145_WS23R_H100_T15_PS19_T	1,50	0.10	0.15	15
146_WS23R_H100_T15_PS20_T	1,50	0.10	0.20	20

**Tabella 5.2 - Test eseguiti per il metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione, sviluppati con periodi d'onda vari e diversi range di forza**

Avendo visualizzato i test si procede adesso all'analisi dei dati raccolti tramite "Data Logger" LabView inserendo il tutto in un codice MATLAB. Si è riusciti a sintetizzare i dati riuscendo a calcolare il coefficiente di trasmissione ondosa  $k_t$  e la possibile energia sviluppata dal movimento del galleggiante. Facendo variare diversi valori di banda e forza applicata dal motore e diversi periodi d'onda  $T_p$ .

Visualizzando la Figura 5.8 riguardante l'analisi della energia in [Wh] si nota che con periodo lungo l'energia decresce all'aumentare della forza. Mentre per periodi minori sembra ci sia un trend proporzionale alla forza che risulta molto più interessante per questo studio.

Volendo analizzare la Figura 5.9 si nota facilmente che si ha migliore attenuazione dell'onda con periodi più piccoli, cosa facilmente prevedibile. Inoltre all'aumentare della forza trasmessa del motore corrisponde un coefficiente  $k_t$  più alto, il che è collegato al discorso precedente per cui a forza maggiore corrispondeva un setpoint più ampio. Ciò vorrà dire che se la forza diminuisce, il galleggiante sarà soggetto ad un minor spostamento, molto simile a quello ottenuto con la posizione bloccata dal controllo.

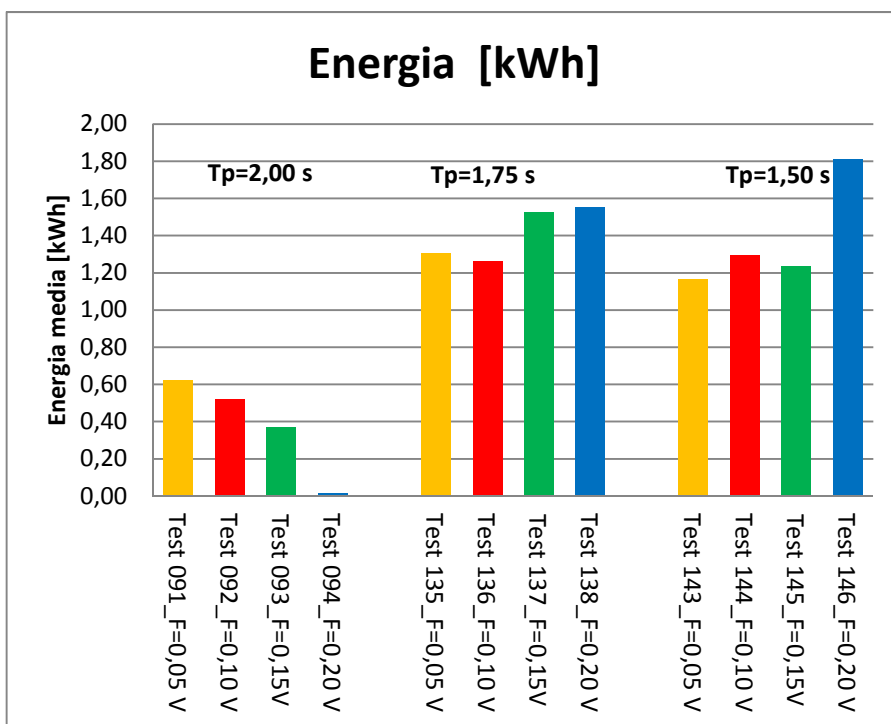


Figura 5.8 - Analisi dell'energia media per i tre periodi d'onda al variare della forza

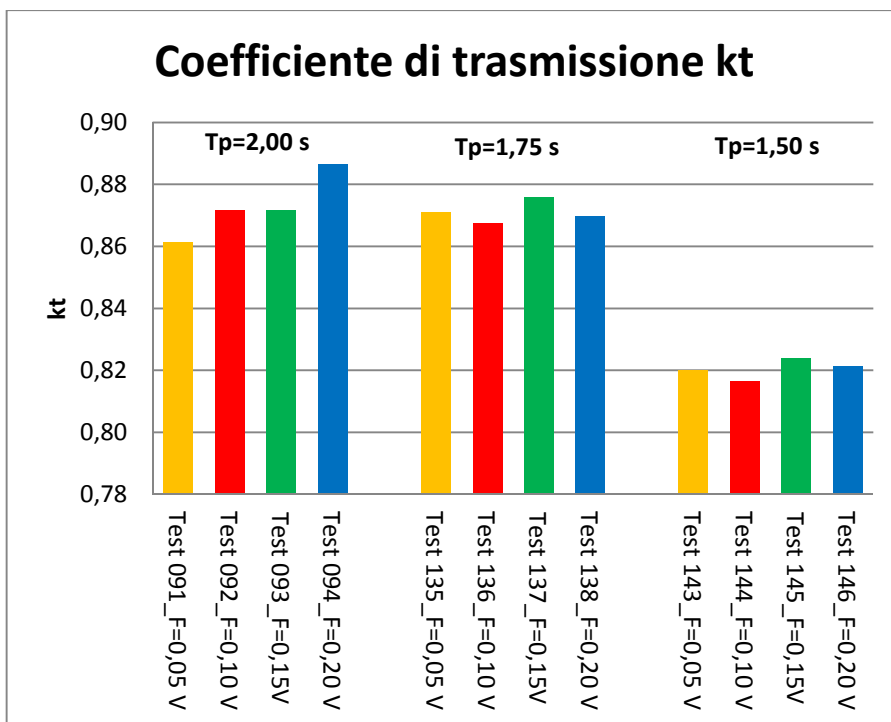


Figura 5.9 - Analisi del coefficiente di trasmissione per i tre periodi d'onda al variare della forza

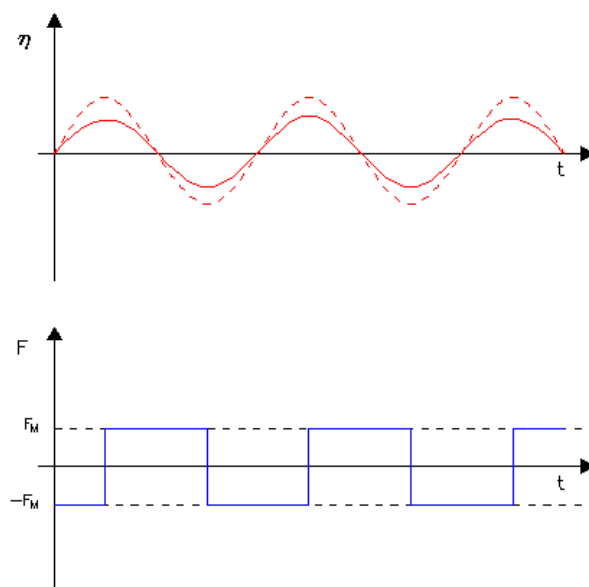
## 5.3 Metodo di inversione di marcia del motore

### 5.3.1 Descrizione e implementazione del modello

La seconda strategia sperimentata basa il suo funzionamento sul fatto che quando il corpo fluttua a causa della forza delle onde incidenti in arrivo, il motore legato al galleggiante risente di una rotazione. Questa rotazione può essere sia in senso orario che antiorario a seconda che il galleggiamento si sposti verso l'alto o verso il basso. Si è scelto quindi di provare a opporsi a questa forza per rallentarne il movimento, facendo imprimere al motore un'opportuna coppia frenante.

Per avere i giusti riferimenti è importante dire che quando il galleggiante si sposta in alto il motore ad esso legato gira in senso orario e quindi tramite controllo si impone una forza resistente al sistema ovvero negativa; al contrario quando il galleggiante si sposta in basso il motore girerà in senso antiorario di conseguenza si impone una forza positiva.

Si riporta in Figura 5.10 un modello semplificato in cui si può facilmente notare il confronto tra l'andamento d'onda in entrata al sistema e il comportamento del motore che assume un modulo costante  $F_M$  che si oppone alla variazione d'onda. Essa infatti è di segno negativo di fronte ad un andamento crescente e si inverte il segno non appena si raggiunge un andamento decrescente.



**Figura 5.10 - Variazione della posizione del galleggiante  $\eta$  e forza applicata  $F$  durante l'inversione di marcia del motore; la linea tratteggiata rossa rappresenta una posizione del galleggiante non controllata, la posizione controllata effettiva della linea continua rossa, le linee tratteggiate blu rappresentano la forza massima applicata  $F_M$  e la forza applicata effettiva della linea continua blu.**

Si può anche qui osservare lo sviluppo del pannello host su LabView che riprende per larga parte quello utilizzato in precedenza. In particolare avendo nuovamente la forza come variabile di processo viene modificata minimamente al fine di eseguire l'obiettivo qui proposto di attenuazione della forza.

Nella Figura 5.11 è riportato l'intero diagramma di flusso a blocchi presente nel pannello host utilizzato per implementare questa strategia di controllo. Come è

possibile vedere, vengono presentati gli stessi componenti visti in precedenza nello schema a blocchi del metodo di oscillazione smorzata, come la registrazione dei dati e la corrispondente struttura e comando dell'interruttore; diagramma dei dati misurati; struttura di arresto e struttura dell'interruttore di controllo di attivazione.

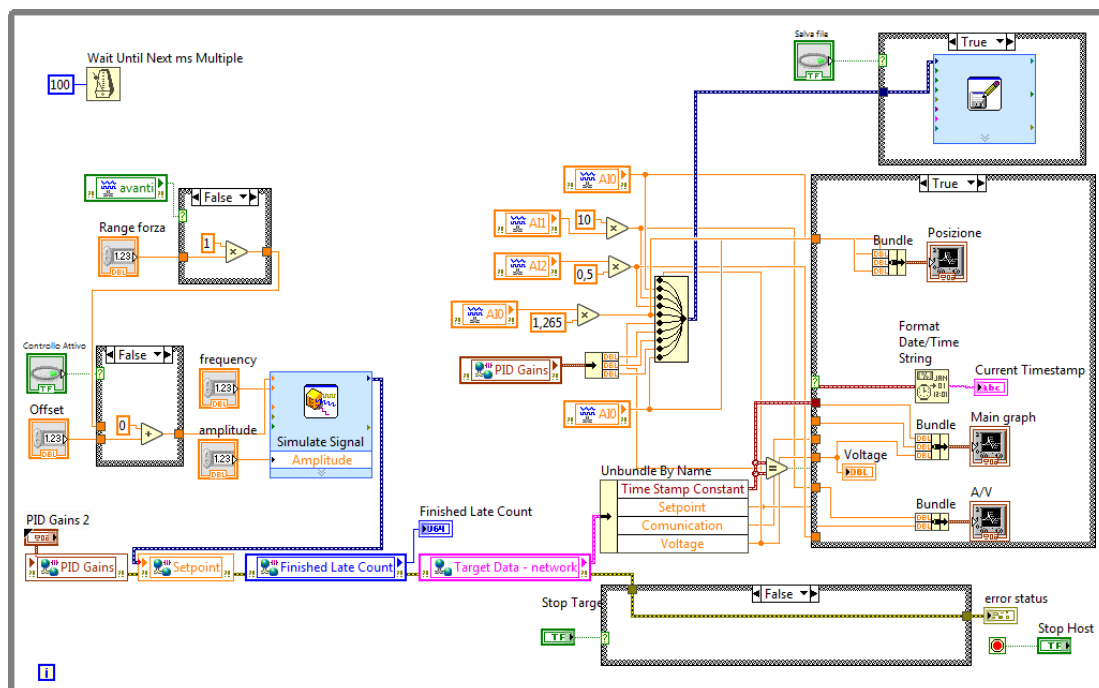


Figura 5.11 - Schema a blocchi del pannello Host del programma Labview sul controllo di inversione di marcia del motore

La differenza rispetto al caso precedente qui sta nella struttura di controllo sviluppata nell'angolo in alto a sinistra della figura e ingrandita in Figura 5.12. Qui la procedura logica di controllo è molto più semplice rispetto a quella vista in precedenza per l'implementazione del metodo di smorzamento dell'oscillazione spostata, infatti l'unica differenza riguarda la direzione di rotazione del motore, data come variabile di input, la direzione di marcia "avanti" che fa parte del controllo di parte digitale all'inverter. Allo stesso modo di prima, "Range forza", descrive l'inserimento della forza deciso dagli utenti nella finestra del pannello frontale.

Ci si trova nuovamente di fronte ad una case structure con i due casi "False" e "True":

- False: se la marcia avanti non è attiva per cui la funzione booleana da al sistema uno 0 si ha la condizione per cui il galleggiante si muoverà verso il basso e il motore girerà in senso antiorario, la forza applicata  $F_M$  viene moltiplicata con un'unità positiva, dando così una forza diretta verso l'alto  $F_M$ .
- True: la marcia avanti è attiva per cui la funzione trasmetterà un segnale positivo 1 che trasmetterà un movimento verso l'alto al galleggiante, per cui il motore girerà in senso orario, per contrastare questo movimento  $F_M$  viene moltiplicato con un'unità negativa, ottenendo in questo modo  $-F_M$ .

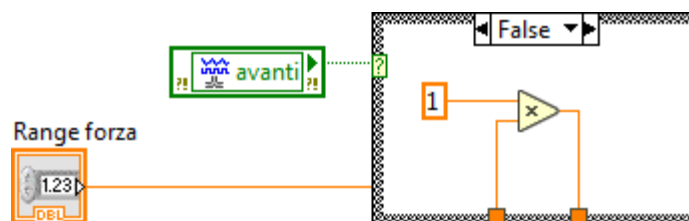


Figura 5.12 - Dettaglio dello schema a blocchi specifico per il controllo di inversione di marcia del motore

### 5.3.2 Test eseguiti e analisi dei dati

Questo modello è uno dei primi testati per la sua semplicità e la sua facile visualizzazione.

Tale metodo si basa interamente sulla direzione di marcia comandata dal programma LabView tramite schede verso l'inverter che comanda il motore. Si cerca di contrastare il movimento dell'onda in ingresso dal segnale proveniente dal controllo "marcia avanti" che ovviamente dipende dalla cella di carico. Purtroppo basarsi su questo comando non risultava essere la scelta migliore in quanto il segnale che arrivava in entrata era disturbato dalla costante presenza del rumore dato dalla sonda. Di conseguenza il programma registrava e cercava di rispondere con continui cambi di direzione della forza  $F_M$ . Per questo motivo, sono stati eseguiti meno test con questo specifico metodo di controllo per non compromettere troppo la strumentazione viste le forti vibrazioni.

Per capire meglio quanto appena detto si riportano le immagini dei segnali di posizione che si potevano vedere dal pannello frontale del LabView (Figura 5.13) e la tabella 5.3 dei test eseguiti.

Test ID	Periodo [s]	Forza applicata [V]	Forza applicata [N]
099_WS17R_H100_T20_PS25_T	2,00	0.05	5
100_WS17R_H100_T20_PS26_T	2,00	0.10	10
101_WS17R_H100_T20_PS27_T	2,00	0.15	15
102_WS17R_H100_T20_PS28_T	2,00	0.20	20

Tabella 5.3 - Test eseguiti per il metodo di controllo di inversione di marcia del motore, sviluppati con  $T_p=2,00$  e diversi range di forza

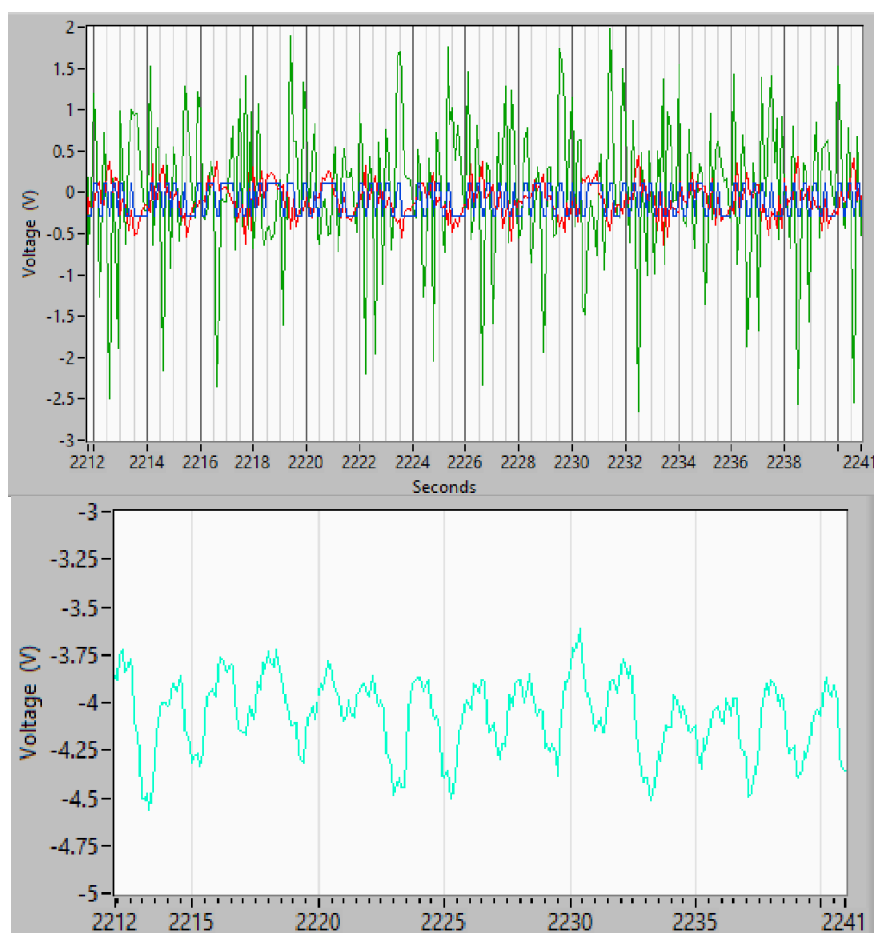


Figura 5.13 - Grafici del Front Panel del software LabView del Test 102. Il set-point del galleggiante (linea blu) risulta fortemente disturbato e non regolare; (b) l'andamento della posizione (linea celeste) non regolare

## 5.4 Metodo di controllo tramite posizione precedente

### 5.4.1 Descrizione e implementazione del modello

La terza strategia sperimentata basa il suo funzionamento sulla variazione della posizione verticale considerando l'istante temporale effettivo e quelli che si verificano nella fase temporale precedente.

Questa strategia è stata pensata soprattutto per risolvere il problema del rumore dato in ingresso al sistema dalla sonda in modo da poter filtrare al meglio il segnale precedente, il programma in pratica tiene in memoria i valori di forza precedenti mentre elabora i presenti, è un approccio predittivo utilizzato in molti ambiti di controllo.

Questa strategia è fatta per avere un'idea se il galleggiante si sta muovendo verso l'alto o verso il basso, quindi, in quale fase dell'onda si trova in quel momento. Per trovare questa fase, diversamente da quanto fatto nel precedente metodo, in cui le informazioni erano fornite dalla direzione di marcia del motore dato dal comando digitale, qui si presume una diversa base di partenza: se la differenza tra la posizione istantanea del tempo attuale effettivo e quella precedente è positiva significa che il



galleggiante si sta muovendo verso l'alto, al contrario se risulta negativa significa che il galleggiante si sta muovendo verso il basso.

Questa strategia di controllo si basa sulla definizione di determinati stati temporali, è necessaria la posizione della fase effettiva ( $i$ ) e quella precedente ( $i-1$ ), si è voluto considerare anche la posizione all'istante ( $i-2$ ) che purtroppo ha dato scarsi risultati, come sarà mostrato in seguito.

Come fatto per il metodo precedente, allo scopo di attenuare al meglio il movimento del galleggiante il motore imprime al sistema una forza  $F_M$ , costante in modulo ma in verso opposto alla direzione del galleggiante ad acqua libera. Si può osservare il modello teorico dal grafico in Figura 5.14, si può notare che la linea tratteggiata rossa è ridotta come nel caso precedente dall'azione della forza  $F_M$ , dando vita ad un'onda più attenuata.

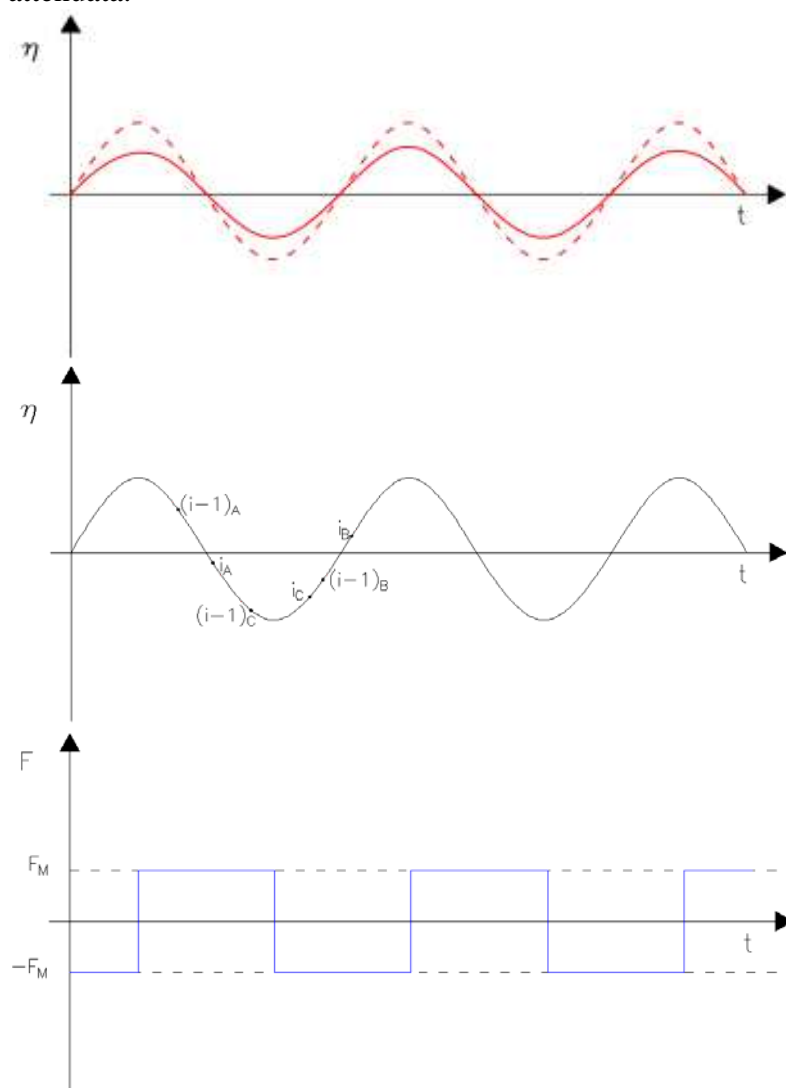


Figura 5.14 - Schema di funzionamento teorico del controllo tramite posizione precedente

Nella Figura 5.14 si nota quale debba essere la logica teorica di questo modello: supponendo di essere nel caso in cui il frangiflutti sia in fase discendente, il controllo dovrebbe confrontare la posizione istantanea effettiva  $i_A$  e quella precedente nell'istante  $(i-1)_A$ : se, come in questo caso,  $i_A < (i-1)_A$  il sistema percepirebbe che il

galleggiante è effettivamente in fase discendente. In caso contrario avremmo  $i_B > (i-1)_B$  e il galleggiante sarebbe in fase ascendente. Si nota che la forza varia da un verso all'altro esattamente come nel caso precedente.

Un'attenta analisi ci fa capire che per questo metodo sia di fondamentale importanza un campionamento fitto dei segnali di posizione, infatti si può notare l'esempio limite dell'istante  $i_C$ : nonostante si trovi in fase d'onda ascendente, in caso di scarso campionamento, si avrebbe  $i_C < (i-1)_C$ . Quindi il sistema reagirebbe ritardando l'inversione di forza del controllo. Ciò rende evidente che la distanza tra  $i$  e  $(i-1)$  deve essere la minore possibile.

Proprio per questo fenomeno è importante lavorare ad una frequenza di elaborazione più alta al fine di diminuire questo ritardo.

Anche per questo metodo si è dovuto modificare il pannello host del software LabView (Figura 5.15). Si modifica come già fatto, il segnale di riferimento in alto a sinistra di cui si può osservare lo specifico in Figura. Si nota che in entrata al diagramma di flusso si hanno i 3 istanti temporali: STEP  $i$ , STEP  $i-1$ , STEP  $i-2$  e naturalmente la sonda di posizione AIO. Tutte queste vengono visualizzate in un grafico nell'interfaccia LabView. In base a quale intervallo temporale viene considerato, solo uno viene confrontato con la posizione effettiva AIO. Si ha un confronto nel vero/falso nel case structure, ovvero se AIO è maggiore o meno rispetto allo step di un istante precedente. Se ad esempio il galleggiante ipoteticamente si muovesse verso l'alto, lo stato verrebbe impostato come Falso e un'unità negativa verrebbe moltiplicata per la massima forza applicata  $F_M$ , impostata tramite il "Range di forza". Quindi il sistema si oppone all'instabilità aiutata da una lettura di un'istante o 2 istanti precedenti.

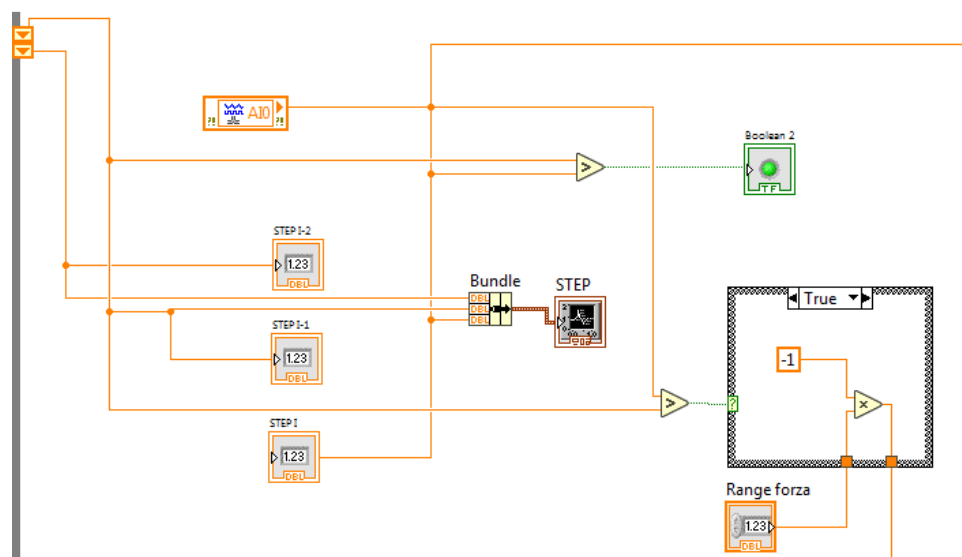


Figura 5.15 - Dettaglio dello schema a blocchi specifico per il controllo tramite posizione precedente

### 5.4.2 Test eseguiti e analisi dei dati

Si analizzano anche qui i risultati ottenuti che si rivelano sufficientemente interessanti rispetto ai precedenti. Si sono utilizzati diversi valori per la  $F_M$  in V (0,05 V, 0,1 V, 0,15 V e 0,2 V), si possono osservare i valori nella Tabella 5.4 per cui si è

fatto variare anche il periodo d'onda  $T_p$  ma si è voluto approfondire lo studio solo del caso con lo step (i-1) poiché dai primi test effettuati con lo step (i-2) risultava più efficace. Si riportano anche qui i relativi risultati del coefficiente di trasmissione  $k_t$  e della potenza media teorica assorbita.

Test ID	Periodo [s]	Posizione considerata	Forza applicata [V]	Forza applicata [N]
103_WS17R_H100_T20_PS29_T	2.00	i - 2	0.05	5
104_WS17R_H100_T20_PS30_T	2.00	i - 2	0.10	10
105_WS17R_H100_T20_PS31_T	2.00	i - 2	0.15	15
106_WS17R_H100_T20_PS32_T	2.00	i - 2	0.20	20
107_WS17R_H100_T20_PS33_T	2.00	i - 1	0.05	5
108_WS17R_H100_T20_PS34_T	2.00	i - 1	0.10	10
109_WS17R_H100_T20_PS35_T	2.00	i - 1	0.15	15
110_WS17R_H100_T20_PS36_T	2.00	i - 1	0.20	20
139_WS24R_H100_T17_PS33_T	1,75	i - 1	0.05	5
140_WS24R_H100_T17_PS34_T	1,75	i - 1	0.10	10
141_WS24R_H100_T17_PS35_T	1,75	i - 1	0.15	15
142_WS24R_H100_T17_PS36_T	1,75	i - 1	0.20	20
147_WS23R_H100_T15_PS33_T	1,50	i - 1	0.05	5
148_WS23R_H100_T15_PS34_T	1,50	i - 1	0.10	10
149_WS23R_H100_T15_PS35_T	1,50	i - 1	0.15	15
150_WS23R_H100_T15_PS36_T	1,50	i - 1	0.20	20

Tabella 5.4 - Dati relativi ai test eseguiti con controllo tramite posizione precedente

Visualizzando i dati in Figura 5.16 si nota come i coefficienti siano equiparabili per qualsiasi forza immessa, tranne per il caso di  $T_p=1,5$  s, che è dovuto a vantaggi dati dalla geometria del frangiflutti in relazione alla lunghezza d'onda.

Per quanto riguarda l'energia, osservando il grafico in Figura 5.17, si nota facilmente come essa decresca all'aumentare della forza  $F_M$ . Si può ipotizzare che dal punto di vista dinamico può accadere che con una forza maggiore applicata al galleggiante, esso venga rallentato troppo fortemente e venga a formarsi una piccola velocità che, anche se la forza aumenta il suo valore, riduca la potenza finale generata.

Complessivamente risulta evidente che i test effettuati con  $T_p=1,50$  s siano i più interessanti in quanto risulta una buona attenuazione d'onda e una produzione di energia relativamente abbondante.

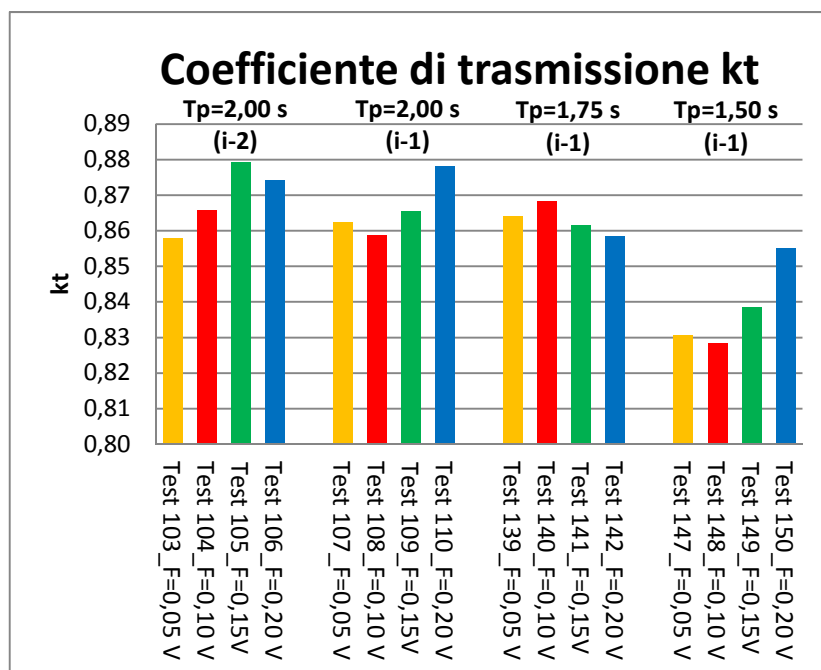


Figura 5.16 - Analisi del coefficiente di trasmissione al variare di periodo d'onda, posizione precedente e forza immessa

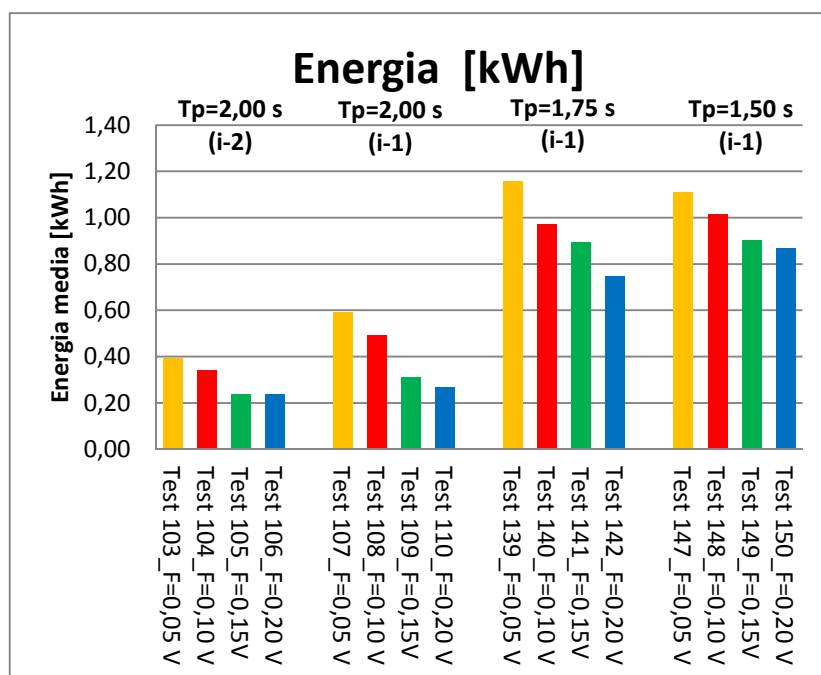


Figura 5.17 - Analisi dell'energia media prodotta al variare di periodo d'onda, posizione precedente e forza immessa

## 5.5 Confronto dei dati

Una volta progettate e implementate le metodologie di controllo, una volta eseguiti ed elaborati tutti i test tenendo conto delle sonde di onda, forza e posizione, è possibile confrontare i dati risultanti, al fine di definire se il ragionamento preventivo è corretto e selezionare la metodologia di controllo preliminare implementata che migliora la produzione di energia.

Per condurre queste valutazioni si possono considerare diverse variabili, dalla massima potenza prodotta al coefficiente di trasmissione. La prima analisi viene condotta osservando la potenza media definita in  $W$  e misurata grazie al prodotto della velocità con la forza rilevata dalla cella di carico. I valori risultanti per ciascun test, eseguiti con tutti i periodi di onda e i metodi di controllo implementati, sono riportati nella Figura 5.18, da ora in poi i vari casi saranno mostrati solamente tramite il numero del test, i metodi sono distribuiti in modo sparso e si segnalano tramite degli acronimi: controllo di attenuazione dell'oscillazione (AO), Inversione di marcia del motore (IM), controllo posizione precedente (CP). Tutti i dati sono visibili in Appendice C.

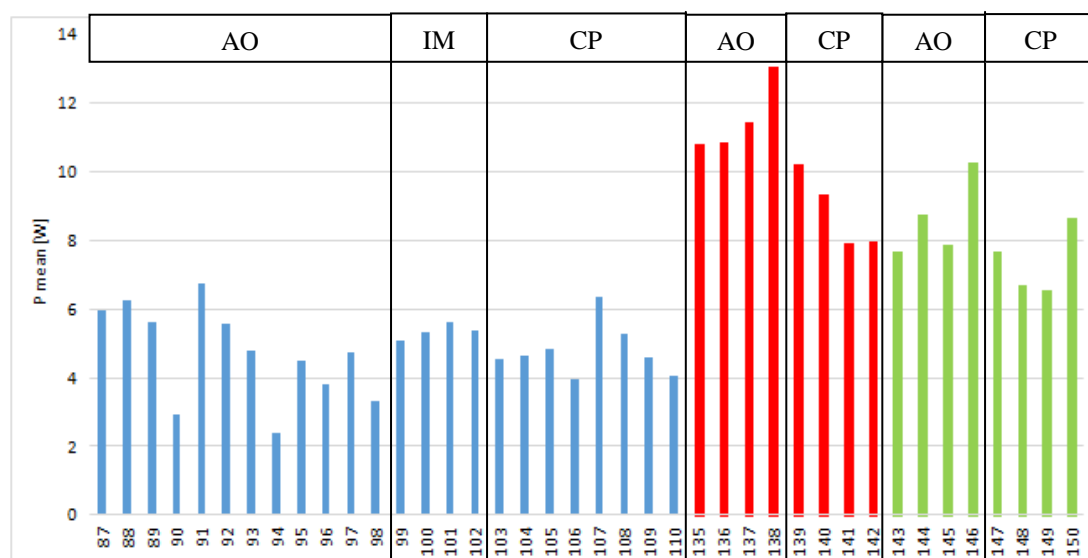


Figura 5.18 - Potenza media ( $W$ ) ottenuta in tutti i test eseguiti, con vari metodo di controllo e caratteristiche di controllo. I valori di lunghezza d'onda sono  $T_p=2,00$  in blu,  $T_p=1,75$  in rosso e  $T_p=1,50$  in verde

Considerando la potenza media sono evidenti alcuni valori di picco, inducendo in tal modo alla probabile conclusione che tali test rappresentino una procedura di controllo più efficiente. In realtà, le considerazioni su tali risultati sono più complicate. Infatti si è a conoscenza del fatto che in situazione reale non è possibile avere con lo stesso periodo di picco però è utile fare certe valutazioni su come le tipologie di controllo si comportino. È evidente che per  $T_p=2,00$  s i risultati siano peggiori ma ciò è dovuto al fatto che  $T_p$  risulta inversamente proporzionale alla  $P_{mean}$  perché al diminuire del periodo ci si avvicina ad una condizione di risonanza maggiore del galleggiante, dovuta alle sue caratteristiche fisiche.

In effetti i segnali rossi e verdi rappresentano la potenza ottenuta con il controllo sulle onde in arrivo caratterizzate da un periodo d'onda di 1,75 s e 1,50 s, periodo

d'onda più vicino a quello di risonanza del galleggiante. In questo senso ci si aspetterebbe che i dati verdi appartenenti al periodo di picco minore risultino più risonanti e quindi producano più potenza. Guardando a questi risultati, è possibile ipotizzare che i coefficienti PID, che sono costanti in tutti i test, aiutano a massimizzare l'energia con  $T_p = 1,75$  s, mentre per  $T_p = 1,50$  s non siano abbastanza efficaci.

Una volta fatte le considerazioni sulla risposta ai diversi periodi di ondata in arrivo, è possibile passare all'analisi della procedura di controllo, al fine di individuare quella in grado di garantire una maggiore efficienza nella produzione di energia.

La prima analisi viene eseguita considerando i risultati ottenuti con le quattro strategie di controllo e il periodo d'onda in entrata pari a 2,0 s. Questi valori vengono elaborati e i grafici risultanti sono riportati nella Figura 5.19: nella Figura 5.19 (a) sono raccolti per la potenza media, mentre nella Figura 5.19 (b) quelli del coefficiente di trasmissione,  $kt$ . Guardando solo al grafico della Figura 5.19 (a), è difficile definire un metodo effettivamente migliore, essendo la produzione di energia molto variabile all'interno di ciascuna metodologia, in base alle caratteristiche della larghezza della banda e della forza applicata e non mostrando, d'altra parte, forti differenze tra metodi diversi. L'unico controllo che è possibile escludere è il controllo di attenuazione dell'oscillazione eseguita con un valore maggiore della forza applicata (come i test 90 e 94).

A causa delle difficoltà nella definizione della migliore metodologia di controllo, vengono anche considerati i valori di  $kt$ , al fine di avere più parametri da confrontare. I valori di  $kt$  sono riportati nella Figura 5.19 (b). I valori di  $kt$  sembrano essere rappresentativi dei risultati che appaiono nel grafico della potenza media, mostrando valori più alti nel test in cui la potenza media è sempre più piccola e valori più piccoli dove è più alta.

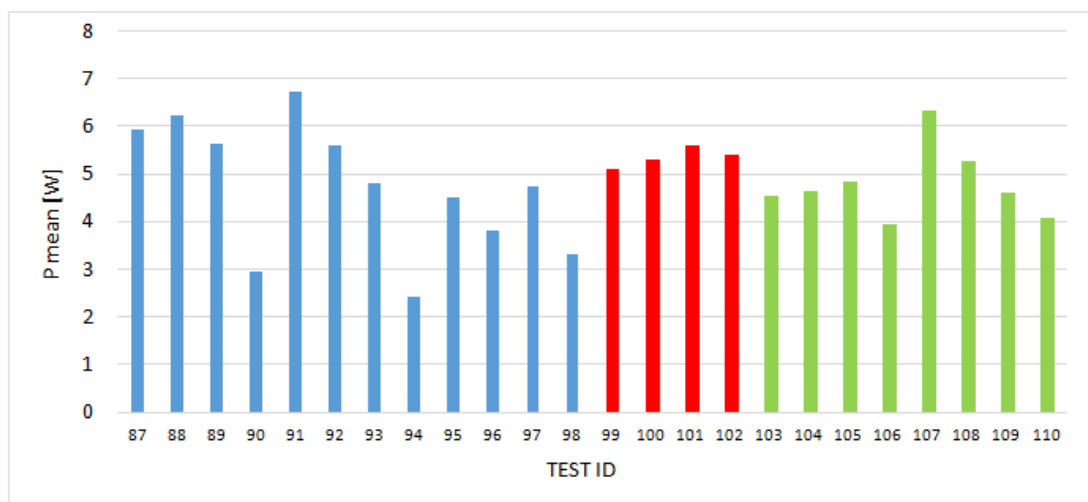
Da tutte queste considerazioni, sembra che il metodo di controllo più efficiente, osservando, soprattutto, i valori massimi della potenza media ottenuta all'interno di ciascun metodo, i risultati migliori assoluti sembrano essere quelli ottenuti con il metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione, soprattutto in condizioni di forza applicata minore. Probabilmente però i risultati nella media migliori soprattutto in termini di attenuazione sono quelli del metodo di inversione di marcia del motore.

Per andare oltre con le indagini, vengono tracciati gli stessi grafici con risultati ottenuti con onde in arrivo caratterizzate da un periodo pari a  $T_p = 1,75$  s e  $T_p = 1,50$  s. In questo caso, nessun test è stato eseguito con il metodo di inversione di marcia del motore, poiché risentiva troppo dei disturbi provenienti nella sonda di forza.

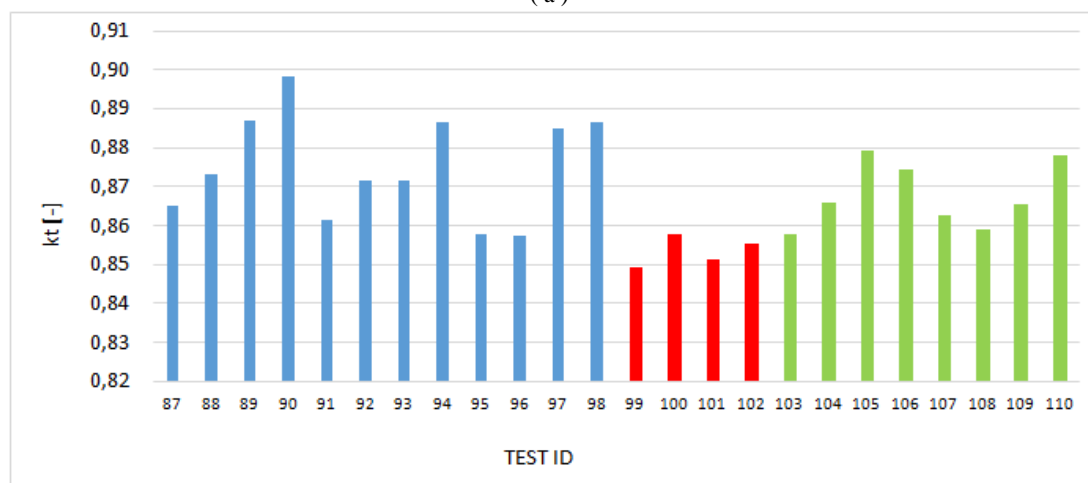
Nella Figura 5.20 sono riportati i grafici dei risultati di  $T_p = 1,75$  s, dove nella Figura 5.20 (a) sono raccolti i valori di potenza media e nella Figura 5.20 (b) sono raccolti i valori di  $kt$ . Allo stesso modo di prima, sembra che il massimo della potenza media ottenuta possa essere rilevato con il metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione.

Infine, gli stessi test vengono ripetuti con  $T_p = 1,50$  s e i valori risultanti sono riportati nella Figura 5.21: nella Figura 5.21 (a) ci sono quelli di potenza media e nella Figura 5.21 (b) quelli del coefficiente di trasmissione  $kt$ . In questo caso i valori risultanti della potenza media non variano ampiamente, anche se sembra nuovamente che le migliori prestazioni si verifichino con il metodo di controllo di attenuazione

dell'oscillazione. In questo caso questo risultato è confermato dal grafico kt (Figura 5.21 (b)).

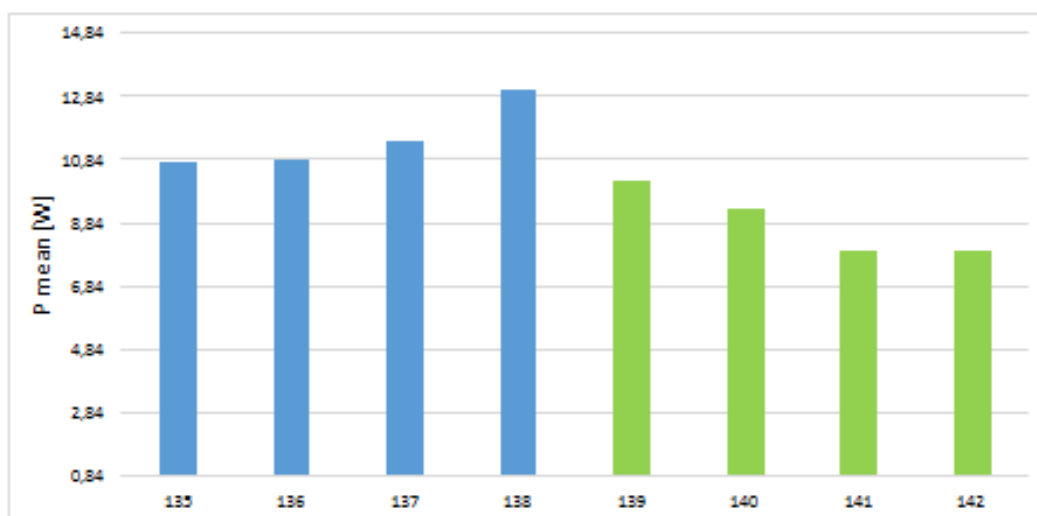


(a)

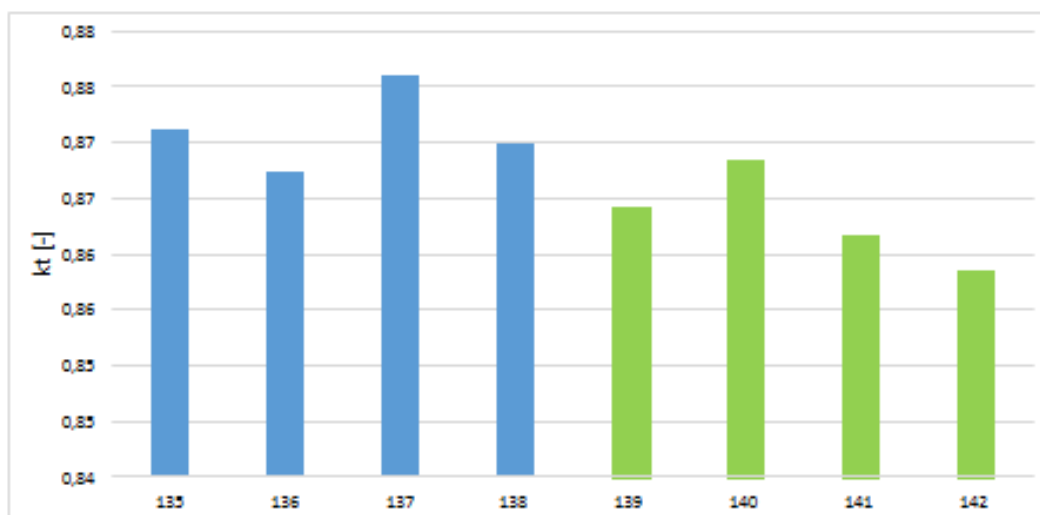


(b)

Figura 5.19 - Produzione di potenza media in W (a) e coefficiente di trasmissione, kt, (b) registrati con  $T_p=2.0$  s e quattro metodologie di controllo rappresentate come: in blu Controllo di attenuazione dell'oscillazione, in rosso Inversione di marcia del motore, in verde controllo tramite posizione precedente



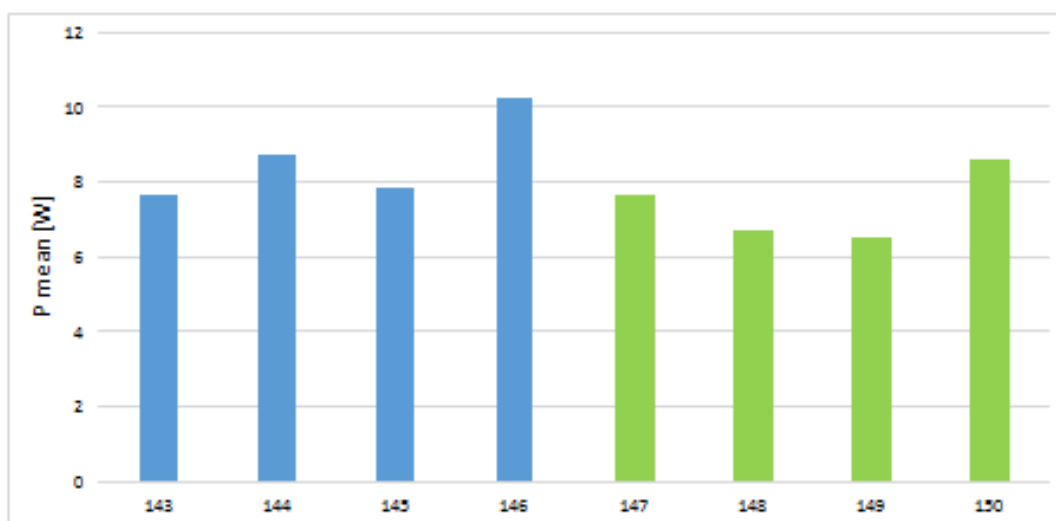
(a)



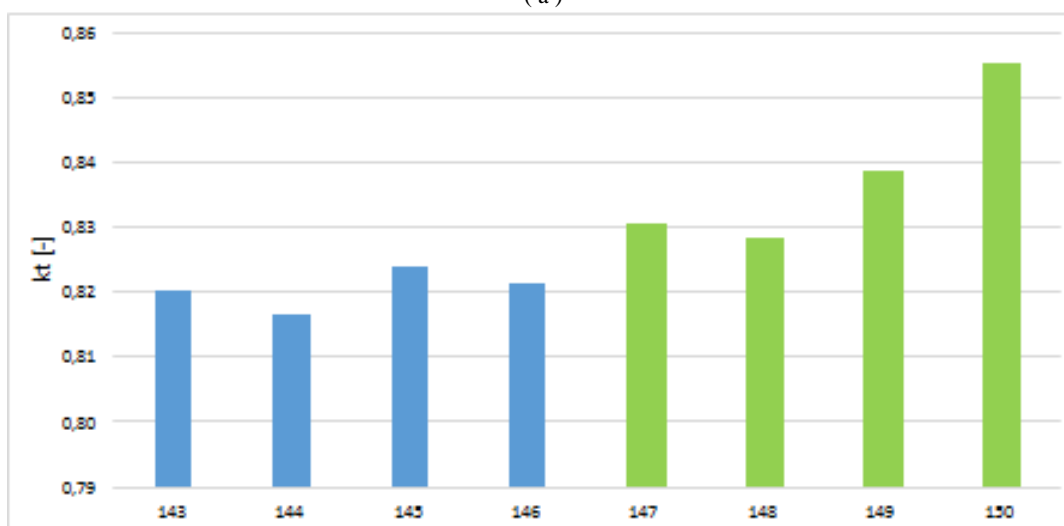
(b)

Figura 5.20 - Produzione di potenza media in W (a) e coefficiente di trasmissione,  $kt$ , (b) registrati con  $T_p=1.75$  s e due metodologie di controllo rappresentate come: in blu Controllo di attenuazione dell'oscillazione e in verde controllo tramite posizione precedente





(a)



(b)

Figura 5.21 - Produzione di potenza media in W (a) e coefficiente di trasmissione,  $k_t$ , (b) registrati con  $T_p=1.50$  s e due metodologie di controllo rappresentate come: in blu Controllo di attenuazione dell'oscillazione e in verde controllo tramite posizione precedente

# Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato studiato un azionamento elettrico per un sistema frangiflutti galleggiante (PTO) che possa integrare sia la funzione principale di attenuazione del moto ondoso sia la conversione dell'energia d'onda.

Lo scopo principale di questo lavoro era definire il miglior sistema di controllo in grado di:

- aumentare le prestazioni del frangiflutti galleggiante
- massimizzare l'estrazione di energia rinnovabile dalle onde.

Per fare ciò, un modello fisico è stato incorporato in un canale ad onda 2D del laboratorio marittimo dell'Università di Padova ed è stato progettato un software in grado di controllare il PTO.

Si è messo a punto il sistema di controllo hardware e software, riuscendo a far interagire motore, inverter e controller con il programma progettato in ambiente LabView, riuscendo a sviluppare diverse tecniche di gestione sulla base di segnali di forza e posizione.

Si sono svolti test per prelevare dati di condizioni al contorno del sistema che si sono resi utili per l'individuazione dei valori ottimali del regolatore tramite alcuni test preliminari.

Si sono testate varie tecniche di controllo considerando diverse condizioni d'onda e si è evidenziato che il miglior approccio è il cosiddetto "metodo di controllo di attenuazione dell'oscillazione", considerando sia la miglior attenuazione media (kt basso) sia il miglior assorbimento di potenza. Anche il "metodo a inversione di marcia" è sembrato abbastanza efficiente, nonostante i pochi test effettuati. In ogni caso in tutti i test implementati è stata sempre rilevata una certa quantità di produzione di energia e di attenuazione.

Si sono progettati solo tre esempi di strategia di controllo, ma molti altri possono essere progettati e ulteriori miglioramenti possono essere fatti.

Tra i possibili sviluppi del progetto si vuole segnalare:

- miglioramento del sistema di misura con sonde aventi maggiore immunità al rumore e miglioramento dell'hardware che pilota il motore in grado di incorporare controlli più evoluti.
- migliorata la pulizia dei segnali si potrebbe approfondire il metodo a inversione di marcia anche per onde di periodo minore.
- messa a punto di tecniche mirate alla massimizzazione dell'energia, valutando l'eventuale contributo in termini di attenuazione dell'onda.
- sviluppo della tecnica di controllo MPPT (Par. 2.4.2).

In definitiva, si è riuscito a sviluppare un progetto valido ai fini degli obiettivi prefissati. Il risultato principale di questo elaborato dunque è la definizione di un sistema di base in grado di prestarsi a varie strategie di controllo finalizzate al conseguimento di migliori risultati in termini di attenuazione e generazione di potenza.



# Bibliografia

- [1] C. Trossarelli, PAS-A056 Meteorologia marittima, 2014.
- [2] D. N. A. F. L. S. T. Crescenzi, Caratteristiche costruttive dei sistemi OWC e dei power take-off a questi applicabili, ENEA, 2013.
- [3] AEA Energy and Environment , Review and analysis of ocean energy systems development and supporting policies, 2006.
- [4] G. Hagerman, Southern New England Wave Energy Resource Potential, EPRI, 2001.
- [5] G. M. a. J. C. D. Mollison S. Barstow, The wave energy resource. In Ocean wave energy: current status and future prepectives, Springer, 2008.
- [6] J. Falnes, A review of wave-energy extraction, Department of Physics and Centre of Ships and Ocean Structures, Norwegian University of Science and Technology, 2007.
- [7] J. P. L. G. R. G. D. F. A. F. J.C.C. Henriques, Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys, ELSEVIER, 2016.
- [8] EMEC, «European marine energy centre ltd,» 2020. [Online].
- [9] R. Henderson, Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter, Renewable Energy, 2006.
- [10] A. S. a. T. K. A. B. E. Amon, A novel maximum power point tracking algorithm for ocean wave energy devices, ECCE, 2009.
- [11] I. G. J. L. M. D. I. S. Aitor J. Garrido, Model Implementation and Real-Data Validation of On-Shore OWC Wave Energy Plants, Bilbao: ICCOINS, 2018.
- [12] U. A. &. R. J. Korde, Hydrodynamic control of wave energy devices, Cambridge University Press, 2016.
- [13] National Instrument, «PID theory explained,» Marzo 2020. [Online]. Available: <https://www.ni.com/it-it/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>.

- [14] ABB, Scheda tecnica motore M3AA-71B-4.
- [15] Control Techniques, Guida all'installazione Unidrive, 1998.
- [16] National Instrument, CompactRio developers guide, 2012.
- [17] Unimeasure. Inc., Datasheet HX-P420 series.
- [18] J. G. & N. N. B. Ziegler, Optimum settings for automatic controllers, ASME, 1942.

# Appendice A

Si propongono di seguito basi teoriche utili al controllo in ciclo chiuso tramite PID.

## Basi teoriche del PID

Il controllo proporzionale integrale-derivato (PID) è l'algoritmo di controllo più comune utilizzato nell'industria ed è stato universalmente accettato nel controllo industriale. La popolarità dei controller PID può essere attribuita in parte alle sue solide prestazioni in una vasta gamma di condizioni operative e in parte alla sua semplicità funzionale, che consente agli utenti di gestirli in modo semplice e diretto. Come suggerisce il nome, l'algoritmo PID è costituito da tre coefficienti di base; proporzionale, integrale e derivato che sono variati per ottenere una risposta ottimale. I sistemi a circuito chiuso, la teoria del PID classico e gli effetti della messa a punto di un sistema di controllo a circuito chiuso sono discussi in questo documento.

L'idea alla base di un controller PID è quella di leggere un sensore, quindi calcolare l'uscita dell'attuatore desiderata calcolando le risposte proporzionali, integrali e derivate e sommando questi tre componenti per calcolare l'uscita. Prima di iniziare a definire i parametri di un controller PID, vedremo cosa è un sistema a ciclo chiuso e alcune delle terminologie ad esso associate.

### Sistema a circuito chiuso

In un tipico sistema di controllo, la variabile di processo è il parametro di sistema che deve essere controllato, ad esempio la temperatura, la pressione o la portata (litri al minuto). Un sensore viene utilizzato per misurare la variabile di processo e fornire feedback al sistema di controllo. Il set point è il valore desiderato o di comando per la variabile di processo, ad esempio 100 gradi Celsius nel caso di un sistema di controllo della temperatura. In qualsiasi momento, la differenza tra la variabile di processo e il set point viene utilizzata dall'algoritmo del sistema di controllo (compensatore) per determinare l'uscita dell'attuatore desiderata per azionare il sistema (impianto). Ad esempio, se la variabile di processo della temperatura misurata è 100 °C e il setpoint di temperatura desiderato è 120 °C, l'uscita dell'attuatore specificata dall'algoritmo di controllo potrebbe essere quella di azionare un riscaldatore. Se si aziona un attuatore per accendere un riscaldatore, il sistema diventa più caldo e si verifica un aumento della variabile del processo di temperatura. Questo è chiamato sistema di controllo ad anello chiuso, poiché il processo di lettura dei sensori per fornire un feedback costante e il calcolo dell'uscita dell'attuatore desiderata viene ripetuto continuamente e ad una frequenza fissa come illustrato nella figura 1.

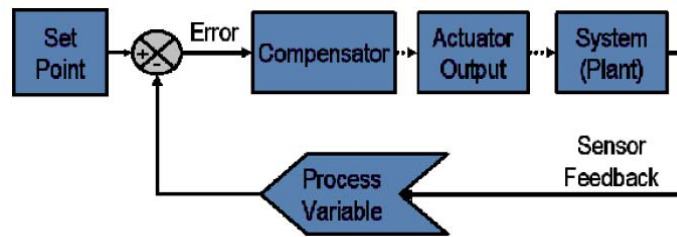


Figura A.1 - Diagramma a blocchi di un tipico sistema a ciclo chiuso [13]

In molti casi, l'uscita dell'attuatore non è l'unico segnale che ha un effetto sul sistema. Ad esempio, in una camera di temperatura potrebbe esserci una fonte di aria fredda che a volte soffia nella camera e disturba la temperatura. Un termine viene definito disturbo. Di solito cerchiamo di progettare il sistema di controllo per minimizzare l'effetto dei disturbi sulla variabile di processo.

### Risposta proporzionale

La componente proporzionale dipende solo dalla differenza tra il set point e la variabile di processo. Questa differenza viene definita come il termine Errore. Il guadagno proporzionale ( $K_c$ ) determina il rapporto tra la risposta in uscita e il segnale di errore. Ad esempio, se il termine di errore ha un valore di 10, un guadagno proporzionale di 5 produrrebbe una risposta proporzionale di 50. In generale, l'aumento del guadagno proporzionale aumenterà la velocità della risposta del sistema di controllo. Tuttavia, se il guadagno proporzionale è troppo grande, la variabile di processo inizierà a oscillare. Se  $K_c$  viene ulteriormente aumentato, le oscillazioni diventeranno più grandi e il sistema diventerà instabile e potrebbe persino oscillare senza controllo.

### Risposta integrale

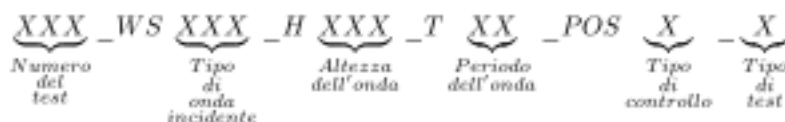
La componente integrale somma il termine dell'errore nel tempo. Il risultato è che anche un piccolo errore causerà un aumento lento del componente integrale. La risposta integrale aumenterà continuamente nel tempo a meno che l'errore non sia zero, quindi l'effetto è di portare l'errore di stato stazionario a zero. Un fenomeno chiamato windup integrale risulta quando l'azione integrale satura un controller senza che il controllore guidi il segnale di errore verso zero.

### Risposta derivata

La componente derivativa fa diminuire l'uscita se la variabile di processo aumenta rapidamente. La risposta derivata è proporzionale alla velocità di variazione della variabile di processo. Aumentando il parametro del tempo derivativo ( $T_d$ ), il sistema di controllo reagirà più fortemente ai cambiamenti nel termine dell'errore e aumenterà la velocità della risposta complessiva del sistema di controllo. I sistemi di controllo più pratici utilizzano un tempo derivativo molto piccolo ( $T_d$ ), poiché la risposta derivata è altamente sensibile al rumore nel segnale della variabile di processo. Se il segnale di feedback del sensore è disturbato o se la frequenza del loop di controllo è troppo lenta, la risposta derivativa può rendere instabile il sistema di controllo.

## Appendice B

Si riportano qui di seguito i test svolti nel corso dello studio presentato in questa tesi. Ognuno di essi è identificato da un codice ID che riporta le caratteristiche dell'onda generata e il tipo di comportamento imposto al dispositivo. Per una corretta lettura del nominativo delle varie prove svolte si sappia che:



Nelle tabelle 10 11 12 13 vengono riportati i codici identificativi dei test con rispettiva altezza d'onda incidente  $H_i$ , periodo  $T_p$ , frequenza e durata della prova.

Questa seconda appendice raccoglie i dati registrati dalle sonde d'onda e le sonde dei dati di input durante i test eseguiti per definire le condizioni di riferimento e utilizzati nella sezione 4.8 "Analisi dei dati nel test di riferimento"; le quattro condizioni di riferimento sono identificate con questo codice:

- POS 7: test eseguito con galleggiante mobile non collegato;
- POS 8 e POS42: test eseguito con galleggiante bloccato meccanicamente;
- POS 9 e POS 41: test eseguito con corpo flottante controllato dalla strategia di controllo della posizione e mantenuto fisso;
- POS 10 e POS42: test eseguito con corpo flottante controllato dalla strategia di controllo della forza al fine di simulare un comportamento simile a quello di POS7.

TEST ID	Hsi	Tp	Kt(Hs)	RAO	F
	[cm]	[s]	[cm]	[-]	[kg]
045_WS10R_H050_T05_POS7_T	5,00	0,50	0,17	0,13	0,05
046_WS11R_H050_T07_POS7_T	5,00	0,75	0,26	0,17	0,04
047_WS12R_H050_T10_POS7_T	5,00	1,00	0,70	0,89	0,04
048_WS13R_H050_T12_POS7_T	5,00	1,25	0,84	0,94	0,04
049_WS14R_H050_T15_POS7_T	5,00	1,50	0,87	0,97	0,05
050_WS15R_H050_T17_POS7_T	5,00	1,75	0,91	1,07	0,05
051_WS16R_H050_T20_POS7_T	5,00	2,00	0,92	0,77	0,05
151_WS18R_H050_T08_POS7_T	5,00	0,80	0,30	0,31	82,82
152_WS19R_H050_T08_POS7_T	5,00	0,85	0,43	0,59	83,82
153_WS20R_H050_T09_POS7_T	5,00	0,90	0,56	0,75	84,82
154_WS21R_H050_T09_POS7_T	5,00	0,95	0,67	0,80	85,82
052_WS10R_H050_T05_POS8_T	5,00	0,50	0,14	0,00	0,64
053_WS11R_H050_T07_POS8_T	5,00	0,75	0,18	0,00	1,39
054_WS12R_H050_T10_POS8_T	5,00	1,00	0,59	0,00	3,16
055_WS13R_H050_T12_POS8_T	5,00	1,25	0,76	0,00	3,60
056_WS14R_H050_T15_POS8_T	5,00	1,50	0,81	0,00	4,53
057_WS15R_H050_T17_POS8_T	5,00	1,75	0,86	0,00	4,77
058_WS16R_H050_T20_POS8_T	5,00	2,00	0,90	0,00	3,22
127_WS18R_H050_T08_POS8_T	5,00	0,80	0,24	0,01	58,82
128_WS19R_H050_T08_POS8_T	5,00	0,85	0,34	0,01	59,82



129_WS20R_H050_T09_POS8_T	5,00	0,90	0,45	0,01	60,82
130_WS21R_H050_T09_POS8_T	5,00	0,95	0,56	0,01	61,82
059_WS10R_H050_T05_POS9_T	5,00	0,50	0,12	0,11	0,75
060_WS11R_H050_T07_POS9_T	5,00	0,75	0,19	0,08	1,11
061_WS12R_H050_T10_POS9_T	5,00	1,00	0,57	0,07	1,95
062_WS13R_H050_T12_POS9_T	5,00	1,25	0,73	0,06	2,24
063_WS14R_H050_T15_POS9_T	5,00	1,50	0,78	0,06	2,92
064_WS15R_H050_T17_POS9_T	5,00	1,75	0,85	0,04	3,37
065_WS16R_H050_T20_POS9_T	5,00	2,00	0,88	0,04	2,74
119_WS18R_H050_T08_POS9_T	5,00	0,80	0,26	0,03	50,82
120_WS19R_H050_T08_POS9_T	5,00	0,85	0,34	0,03	51,82
121_WS20R_H050_T09_POS9_T	5,00	0,90	0,45	0,04	52,82
122_WS21R_H050_T09_POS9_T	5,00	0,95	0,57	0,05	53,82
066_WS10R_H050_T05_PS10_T	5,00	0,50	0,14	0,24	2,00
067_WS11R_H050_T07_PS10_T	5,00	0,75	0,21	0,16	3,26
068_WS12R_H050_T10_PS10_T	5,00	1,00	0,56	0,32	3,92
069_WS13R_H050_T12_PS10_T	5,00	1,25	0,75	0,39	4,86
070_WS14R_H050_T15_PS10_T	5,00	1,50	0,82	0,53	5,52
071_WS15R_H050_T17_PS10_T	5,00	1,75	0,84	0,64	5,49
072_WS16R_H050_T20_PS10_T	5,00	2,00	0,88	0,62	3,82
111_WS18R_H050_T08_PS10_T	5,00	0,80	0,27	0,18	42,82
112_WS19R_H050_T08_PS10_T	5,00	0,85	0,34	0,23	43,82
113_WS20R_H050_T09_PS10_T	5,00	0,90	0,44	0,28	44,82
114_WS21R_H050_T09_PS10_T	5,00	0,95	0,55	0,30	45,82

Tabella B.1 - raccoglie i risultati utilizzati per l'analisi dei dati di test di riferimento ottenuti da sonde d'onda e sonde di carico e posizione.

## Appendice C

L'appendice C raccoglie i risultati ottenuti dai test sulle strategie di controllo esposte nel capitolo 5 e analizzate nella sezione 5.5 "confronto dei dati". In particolare nella tabella C.1 sono presentate le caratteristiche delle onde in arrivo e i risultati ottenuti dalle sonde di onde resistive e dalla cella di carico; mentre nella Tabella C.2 sono riportati l'energia generata all'interno di ciascun test di strategia di controllo eseguito.

TEST ID	Hsi	Tp	Hsi <i>offshore</i>	Hsi <i>onshore</i>	Kt	F
	[cm]	[s]	[cm]	[cm]	[-]	[kg]
087_WS17R_H100_T20_PS13_T	10,00	2,00	7,89	6,82	0,865	6,50
088_WS17R_H100_T20_PS14_T	10,00	2,00	7,86	6,86	0,873	5,73
089_WS17R_H100_T20_PS15_T	10,00	2,00	7,82	6,94	0,887	5,05
090_WS17R_H100_T20_PS16_T	10,00	2,00	7,89	7,09	0,898	3,89
091_WS17R_H100_T20_PS17_T	10,00	2,00	7,93	6,83	0,861	6,16
092_WS17R_H100_T20_PS18_T	10,00	2,00	7,95	6,93	0,872	5,16
093_WS17R_H100_T20_PS19_T	10,00	2,00	8,02	6,99	0,872	4,17
094_WS17R_H100_T20_PS20_T	10,00	2,00	7,94	7,04	0,887	5,55
095_WS17R_H100_T20_PS21_T	10,00	2,00	7,93	6,80	0,858	6,68
096_WS17R_H100_T20_PS22_T	10,00	2,00	7,96	6,83	0,857	6,27
097_WS17R_H100_T20_PS23_T	10,00	2,00	7,81	6,91	0,885	5,75
098_WS17R_H100_T20_PS24_T	10,00	2,00	7,93	7,03	0,886	5,27
099_WS17R_H100_T20_PS25_T	10,00	2,00	7,96	6,76	0,849	7,09
100_WS17R_H100_T20_PS26_T	10,00	2,00	7,95	6,82	0,858	6,86
101_WS17R_H100_T20_PS27_T	10,00	2,00	7,95	6,77	0,851	7,49
102_WS17R_H100_T20_PS28_T	10,00	2,00	7,95	6,80	0,855	7,14
103_WS17R_H100_T20_PS29_T	10,00	2,00	7,97	6,84	0,858	6,11
104_WS17R_H100_T20_PS30_T	10,00	2,00	7,93	6,87	0,866	5,75
105_WS17R_H100_T20_PS31_T	10,00	2,00	7,92	6,96	0,879	5,45
106_WS17R_H100_T20_PS32_T	10,00	2,00	7,99	6,99	0,874	5,68
107_WS17R_H100_T20_PS33_T	10,00	2,00	7,91	6,82	0,863	8,31
108_WS17R_H100_T20_PS34_T	10,00	2,00	7,94	6,82	0,859	9,07
109_WS17R_H100_T20_PS35_T	10,00	2,00	8,00	6,93	0,866	7,42
110_WS17R_H100_T20_PS36_T	10,00	2,00	7,99	7,01	0,878	7,08
135_WS24R_H100_T17_PS17_T	10,00	1,75	9,04	7,88	0,871	10,03
136_WS24R_H100_T17_PS18_T	10,00	1,75	9,02	7,83	0,867	9,47
137_WS24R_H100_T17_PS19_T	10,00	1,75	9,08	7,96	0,876	9,18
138_WS24R_H100_T17_PS20_T	10,00	1,75	9,05	7,87	0,870	9,50
139_WS24R_H100_T17_PS33_T	10,00	1,75	9,05	7,82	0,864	6,97
140_WS24R_H100_T17_PS34_T	10,00	1,75	8,99	7,81	0,868	5,87
141_WS24R_H100_T17_PS35_T	10,00	1,75	9,05	7,80	0,862	5,79
142_WS24R_H100_T17_PS36_T	10,00	1,75	9,04	7,76	0,859	6,45

143_WS23R_H100_T15_PS17_T	10,00	1,50	8,99	7,37	0,820	10,11
144_WS23R_H100_T15_PS18_T	10,00	1,50	8,99	7,34	0,816	10,61
145_WS23R_H100_T15_PS19_T	10,00	1,50	8,94	7,37	0,824	10,48
146_WS23R_H100_T15_PS20_T	10,00	1,50	8,97	7,37	0,821	10,65
147_WS23R_H100_T15_PS33_T	10,00	1,50	8,94	7,43	0,831	7,54
148_WS23R_H100_T15_PS34_T	10,00	1,50	8,94	7,41	0,828	7,56
149_WS23R_H100_T15_PS35_T	10,00	1,50	8,92	7,48	0,839	6,64
150_WS23R_H100_T15_PS36_T	10,00	1,50	8,88	7,59	0,855	7,03
159_WS17R_H100_T20_PS37_T	10,00	2,00	7,75	6,61	0,852	4,61
160_WS17R_H100_T20_PS38_T	10,00	2,00	7,69	6,71	0,872	4,81
161_WS24R_H100_T17_PS37_T	10,00	1,75	9,04	7,69	0,851	4,97
162_WS24R_H100_T17_PS38_T	10,00	1,75	9,07	7,78	0,858	6,24
163_WS23R_H100_T15_PS37_T	10,00	1,50	8,95	7,46	0,834	6,71
164_WS23R_H100_T15_PS38_T	10,00	1,50	8,90	7,55	0,848	6,48
165_WS17R_H100_T20_PS39_T	10,00	2,00	7,76	6,80	0,877	5,98
166_WS24R_H100_T17_PS39_T	10,00	1,75	9,17	7,73	0,843	7,15
167_WS23R_H100_T15_PS39_T	10,00	1,50	8,99	7,57	0,842	7,45

Tabella C.1 - caratteristiche delle onde in arrivo e i risultati ottenuti dalle sonde di onde resistive e dalla cella di carico

TEST ID	Banda [V]	Forza [V]	Type of control	Pmean [W]
087_WS17R_H100_T20_PS13_T	0,05	0,05	Damp Oscillation	5,938706988
088_WS17R_H100_T20_PS14_T	0,05	0,10	Damp Oscillation	6,232059935
089_WS17R_H100_T20_PS15_T	0,05	0,15	Damp Oscillation	5,628841857
090_WS17R_H100_T20_PS16_T	0,05	0,20	Damp Oscillation	2,942552885
091_WS17R_H100_T20_PS17_T	0,10	0,05	Damp Oscillation	6,719586061
092_WS17R_H100_T20_PS18_T	0,10	0,10	Damp Oscillation	5,591372503
093_WS17R_H100_T20_PS19_T	0,10	0,15	Damp Oscillation	4,803913053
094_WS17R_H100_T20_PS20_T	0,10	0,20	Damp Oscillation	2,411489149
095_WS17R_H100_T20_PS21_T	0,15	0,05	Damp Oscillation	4,507565037
096_WS17R_H100_T20_PS22_T	0,15	0,10	Damp Oscillation	3,820270499
097_WS17R_H100_T20_PS23_T	0,15	0,15	Damp Oscillation	4,754743961
098_WS17R_H100_T20_PS24_T	0,15	0,20	Damp Oscillation	3,304066551
099_WS17R_H100_T20_PS25_T	-	0,05	Reverse Engine	5,095905114
100_WS17R_H100_T20_PS26_T	-	0,10	Reverse Engine	5,316179534
101_WS17R_H100_T20_PS27_T	-	0,15	Reverse Engine	5,606659961
102_WS17R_H100_T20_PS28_T	-	0,20	Reverse Engine	5,391545933
103_WS17R_H100_T20_PS29_T	-	0,05	Previous step	4,551621581
104_WS17R_H100_T20_PS30_T	-	0,10	Previous step	4,624017456
105_WS17R_H100_T20_PS31_T	-	0,15	Previous step	4,847171282
106_WS17R_H100_T20_PS32_T	-	0,20	Previous step	3,934587257
107_WS17R_H100_T20_PS33_T	-	0,05	Previous step	6,334128783
108_WS17R_H100_T20_PS34_T	-	0,10	Previous step	5,28045036

109_WS17R_H100_T20_PS35_T	-	0,15	Previous step	4,599896631
110_WS17R_H100_T20_PS36_T	-	0,20	Previous step	4,060651682
135_WS24R_H100_T17_PS17_T	0,10	0,05	Damp Oscillation	10,77919783
136_WS24R_H100_T17_PS18_T	0,10	0,10	Damp Oscillation	10,85145627
137_WS24R_H100_T17_PS19_T	0,10	0,15	Damp Oscillation	11,44357935
138_WS24R_H100_T17_PS20_T	0,10	0,20	Damp Oscillation	13,05266641
139_WS24R_H100_T17_PS33_T	-	0,05	Previous step	10,20704964
140_WS24R_H100_T17_PS34_T	-	0,10	Previous step	9,318004566
141_WS24R_H100_T17_PS35_T	-	0,15	Previous step	7,926343314
142_WS24R_H100_T17_PS36_T	-	0,20	Previous step	7,95256118
143_WS23R_H100_T15_PS17_T	0,10	0,05	Damp Oscillation	7,690930469
144_WS23R_H100_T15_PS18_T	0,10	0,10	Damp Oscillation	8,746720161
145_WS23R_H100_T15_PS19_T	0,10	0,15	Damp Oscillation	7,845463508
146_WS23R_H100_T15_PS20_T	0,10	0,20	Damp Oscillation	10,24755796
147_WS23R_H100_T15_PS33_T	-	0,05	Previous step	7,653843888
148_WS23R_H100_T15_PS34_T	-	0,10	Previous step	6,714421895
149_WS23R_H100_T15_PS35_T	-	0,15	Previous step	6,537922297
150_WS23R_H100_T15_PS36_T	-	0,20	Previous step	8,635081968
159_WS17R_H100_T20_PS37_T	-	0,10	Latching Control	4,865052933
160_WS17R_H100_T20_PS38_T	-	0,20	Latching Control	4,734309505
161_WS24R_H100_T17_PS37_T	-	0,10	Latching Control	4,525203192
162_WS24R_H100_T17_PS38_T	-	0,20	Latching Control	8,469106534
163_WS23R_H100_T15_PS37_T	-	0,10	Latching Control	5,654236875
164_WS23R_H100_T15_PS38_T	-	0,20	Latching Control	4,875552898
165_WS17R_H100_T20_PS39_T	-	0,30	Latching Control	4,141104639
166_WS24R_H100_T17_PS39_T	-	0,30	Latching Control	6,528492134
167_WS23R_H100_T15_PS39_T	-	0,30	Latching Control	4,51276818

Tabella C.2 - Potenza generata all'interno di ciascun test di strategia di controllo eseguito