

Università degli Studi di Genova

Scuola Politecnica

Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DIME)

Sez. MASET (Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti)



Ph.D. Thesis in Fluid Machinery Engineering

XXX cycle

***Applicazioni avanzate di monitoraggio e controllo di
sistemi energetici***

Supervisor:

Prof. Ing. A. Traverso

PhD Candidate:

Vincenzo Alessandro Santamaria

Genova, Maggio 2018

ABSTRACT

The aim of this thesis is investigating the role of digital controls in the modern energetic systems through the implementation of monitoring and control application in different scenarios; industrial, civil, basic and applied research.

All the monitoring and control systems were entirely developed, tested and installed during the three-year PhD research.

The different applications are the following:

- monitoring system of the emissions of a biomass boiler
- control system of a hydropower plant
- monitoring and control system of an innovative Wave Energy System (WEC)
- monitoring system of level set

For every application there is a specific corresponding technological environment, for example the control system of the hydropower plant has been integrated in the complex Distributed Control System (DCS) of the plant itself. In reverse, the core of the monitoring and control system of the innovative WEC and the monitoring system of level set is a simple and cheap microcontroller.

The different researches are included in national and international research project including **Biomass+** funded by “Maritime Italy-France Cross-Border Cooperation Program 2007-2013”, **Seaspoon: verso la nuova energia del mare 2** funded by European Regional Development Fund (ERDF) and **New Approach to the Optimal Control of Level Sets Generated by Partial Equations to Bridge the Gap Between Computational Mathematics and Control of Complex Systems** funded by Air Force Office of Scientific Research (AFOSR).

SOMMARIO

Lo scopo di questa tesi è indagare il ruolo dei sistemi digitali nei moderni sistemi energetici attraverso l'implementazione di applicazioni di monitoraggio e controllo in diversi scenari; industriale, civile, ricerca di base e applicata.

I diversi sistemi di monitoraggio e controllo sono stati interamente sviluppati, testati e installati nel corso dei tre anni del corso di dottorato.

Le diverse applicazioni implementate sono le seguenti:

- sistema di monitoraggio delle emissioni di una caldaia a biomassa
- sistema di controllo di una centrale idroelettrica
- sistema di monitoraggio e controllo di un Wave Energy System (WEC) innovativo
- sistema di monitoraggio di level set

Per ogni applicazione esiste uno specifico ambiente tecnologico, ad esempio il sistema di controllo della centrale idroelettrica è stato integrato nel complesso sistema di controllo distribuito (DCS) dell'impianto stesso. Al contrario, il nucleo del sistema di monitoraggio e controllo del WEC innovativo e del sistema di monitoraggio dei level set è un semplice e economico microcontrollore.

Le diverse ricerche sono incluse in diversi progetti di ricerca nazionale e internazionale che comprendono **Biomass** + finanziato dal "Programma di cooperazione marittima transfrontaliera Italia-Francia 2007-2013", **Seaspoon: verso la nuova energia del mare 2** finanziato dal Fondo europeo di sviluppo regionale (FESR) e **New Approach to the Optimal Control of Level Sets Generated by Partial Equations to Bridge the Gap Between Computational Mathematics and Control of Complex Systems** finanziato da Air Force Office of Scientific Research (AFOSR).

Sommario

1	INTRODUZIONE	6
1.1	Monitoraggio di un sistema energetico	6
1.2	Controllo innovativo di un sistema energetico.....	6
1.3	Monitoraggio e controllo di un WEC innovativo	7
1.4	Monitoraggio di un test rig innovativo.....	7
2	SISTEMA DI MONITORAGGIO EMISSIONI DA CALDAIA A BIOMASSA	9
2.1	Contesto di riferimento	9
2.2	Contesto normativo	10
2.3	Sistema di monitoraggio delle emissioni	11
2.4	Campagna di monitoraggio e analisi dati.....	13
2.4.1	Ossigeno.....	13
2.4.2	Monossido di carbonio.....	14
2.5	Conclusioni	16
3	SISTEMA DI CONTROLLO OTTIMO DELLA PRODUZIONE DA IMPIANTO IDROELETTRICO.....	17
3.1	Architettura software del sistema di monitoraggio e controllo.....	17
3.2	UML Diagrammi di casi d'uso	17
3.3	Deployment view	18
3.4	Logical view.....	19
3.5	Process view.....	23
3.5.1	Prima fase	24
3.5.2	Seconda fase	25
3.6	Validazione e comparazione con lo stato dell'arte	25
3.7	Conclusioni	26
4	SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO DEL WAVE ENERGY CONVERTER DENOMINATO "SEASPOON"	27
4.1	Il Seaspoon.....	27
4.2	Descrizione componenti principali del prototipo.....	30
4.2.1	Circuito ad olio e pistoni.....	30
4.3	Hardware del sistema di monitoraggio e controllo	32
4.3.1	Sensoristica on board	33
4.3.2	Sensoristica in superficie	36
4.3.3	Controllo della pressione del circuito idraulico	39
4.3.4	Sistema di controllo del braccio di posizionamento	41
4.3.5	Scheda a microcontrollore	43
4.3.6	Sistema di Telecomunicazione	46
4.4	Architettura software del sistema di monitoraggio e controllo.....	48
4.4.1	UML Use Case Diagram.....	48
4.4.2	Deployment view	51
4.4.3	Logical view	52
4.4.4	Process view	54
4.5	Installazione in mare aperto	56
4.6	Analisi dati campagna sperimentale.....	56
4.7	Conclusioni	64
5	MONITORAGGIO E CONTROLLO DI LEVEL SET	65
5.1	Introduzione	65
5.2	Test rig ferrofluido	69

5.3	Electronic driver Design	69
5.4	Sistema di monitoraggio	73
5.5	Conclusioni	76
6	Conclusioni	77
7	Conclusion	78
8	Bibliografia	79

1 INTRODUZIONE

I sistemi energetici prevedono sempre di più l'interazione con sistemi digitali. Ciò si sta verificando per diverse ragioni: controllo e diagnostica remota degli impianti, manutenzione "on-condition" e predittiva, gestione di impianti innovativi. Questa tesi ha come obiettivo lo studio e lo sviluppo dei sistemi di monitoraggio e controllo di diversi sistemi energetici, caratterizzati o dalla diffusione ancora limitata oppure dallo stato di sviluppo ancora in fase di sperimentazione a basso TRL (Technology Readiness Level) Il fattore comune che li lega le diverse tecnologie ed applicazioni, di carattere principalmente "meccanico", è l'interazione con i diversi sistemi di monitoraggio e controllo.

Il monitoraggio e controllo viene declinato in diverse forme, innovative dal punto di vista dell'ambito di applicazioni o innovative dal punto di vista della soluzione implementata.

-

1.1 Monitoraggio di un sistema energetico

Nell'ambito degli strumenti e delle politiche per fronteggiare i cambiamenti climatici, un ruolo fondamentale è svolto dal monitoraggio delle emissioni dei gas climalteranti o gas serra. Gli impianti energetici e industriali le cui emissioni sono soggetti a monitoraggio in continuo sono elencati nella legge quadro D.Lgs. 152 e s.m.i.

La prima applicazione di monitoraggio riguarda lo studio delle emissioni gassose di una caldaia a biomassa installata in un'azienda agricola toscana.

Il sistema monitorato è di tipo convenzionale, il lavoro svolto è consistito nella scelta della strumentazione e relativa installazione, progettazione della campagna sperimentale e conseguente analisi dati.

In questo caso il monitoraggio in continuo delle emissioni gassose non è previsto dalla normativa D.Lgs. 152 e s.m.i in quanto la caldaia in oggetto ha una potenza di soli 55 kW_t. Il sistema di monitoraggio è stato implementato per consentire un'analisi quantitativa e qualitativa delle biomasse disponibili in loco rispetto a quelle disponibili sul mercato. Un altro obiettivo del monitoraggio è stata la determinazione del raggiungimento di determinati valori emissivi in modo da poter accedere a incentivi economici.

1.2 Controllo innovativo di un sistema energetico

Il controllo di un sistema energetico, in particolare di un impianto idroelettrico composto da sette turbine idrauliche, è stato progettato, testato e installato.

Il controllo ottimo ha come funzione obbiettivo la massimizzazione della produzione di energia elettrica istantanea in funzione della portata di acqua in ingresso al sistema agendo sull'accensione/spengimento delle diverse turbine e i relativi set di portata.

I modelli di ottimizzazione sono da anni impiegati nel controllo di centrali idroelettriche [1].

Il controllo ottimo è implementabile attraverso diverse tecniche di ottimizzazione quali per esempio la programmazione dinamica (DP). In fase di progettazione è stato scelto di implementare un

controllo ottimo deterministico e non basato sulle tecniche di DP. Questo ha consentito di avere un applicativo con minori richieste computazionali e al contempo stesse performance nell'inseguimento della funzione obbiettivo.

Il controllo ottimo istantaneo dunque si occupa dello scheduling delle diverse unità idroelettriche; le cui caratteristiche (curve di efficienza, range operativo etc.) variano da turbina a turbina.

1.3 Monitoraggio e controllo di un WEC innovativo

Nelle due precedenti applicazioni si è trattato indipendentemente il problema del monitoraggio e del controllo. Infatti nella prima applicazione è stato implementato il sistema di monitoraggio delle emissioni demandando al sistema integrato della caldaia il controllo del processo di combustione. Nella seconda applicazione al contrario è stato implementato un controllo ad alto livello di un impianto idroelettrico; in questo caso è il controllo della singola turbina e il monitoraggio delle variabili di impianto a essere demandato al pre-esistente sistema DCS (Distributed Control System).

Nella terza applicazione è stato invece implementato un **sistema di monitoraggio e controllo** nella sua totalità. Un sistema di monitoraggio e controllo di un Wave Energy Converter (WEC) innovativo è stato dunque progettato, testato e installato.

Il WEC in oggetto è chiamato Seaspoon (SS), sviluppato dal TPG (Thermochemical Power Group) dell'Università di Genova, è in grado di catturare e convertire energia direttamente dal moto orbitale delle onde. Il SS sfrutta il movimento delle particelle d'acqua appena sotto la superficie della stessa; tale movimento provoca una traiettoria circolare delle particelle d'acqua, rendendo così il SS un Wave Orbital Motion Converter [2] [3].

A seguito dei promettenti risultati di simulazioni numeriche e di prove in laboratorio di prototipi di piccola scala [4] [5] [6], nel settembre 2015 è iniziata una campagna sperimentale in mare aperto di un prototipo full scale.

La progettazione e l'implementazione del **sistema di monitoraggio e controllo** (lato firmware) e la successiva analisi dati, è stata parte integrante del percorso di dottorato.

Il sistema ha permesso il monitoraggio in continuo delle variabili di interesse ed il suo controllo da remoto per tutta la durata della sperimentazione (da ottobre 2015 a giugno 2016).

La campagna sperimentale è parte integrante del progetto **Seaspoon: verso la nuova energia del mare 2**, finanziato dalla Regione Liguria FESR (Fondo Europeo Sviluppo Regionale) tramite il Distretto Ligure delle Tecnologie Marine (DLTM)

1.4 Monitoraggio di un test rig innovativo

Nell'ultima applicazione è stato implementato il monitoraggio di un di un test rig innovativo il cui scopo è validare un modello numerico basato su reti neurali.

Il test rig consente di controllare una matrice di elettrocalamite, posizionata al di sotto di un contenitore contenente un ferrofluido, in modo da studiare l'iterazione fra i campi magnetici sviluppati dalle elettrocalamite e il ferrofluido stesso. Un ferrofluido è un liquido in cui le nanoparticelle ferromagnetiche sono sospese in un liquido di trasporto. Il ferrofluido, di colore nero, è a sua volta sospeso in un liquido trasparente. In questo modo viene a crearsi un'interfaccia, cioè un

confine tra due regioni spaziali occupate da materie differenti (o da una stessa materia in differenti stati fisici).

La propagazione di interfacce è applicabile allo studio di diversi fenomeni fra cui la combustione, la fluido dinamica e l'elettromigrazione [7].

Lo scopo globale del progetto, finanziato **dall'Air Force Office of Scientific Research**, è l'implementazione di un controllo ottimo di interfacce.

L'obiettivo del sistema di monitoraggio è invece estrarre informazioni, tramite l'utilizzo di algoritmi di visione artificiale e sensoristica dedicata, relative all'interazione fra campo magnetico e ferrofluido.

2 SISTEMA DI MONITORAGGIO EMISSIONI DA CALDAIA A BIOMASSA

In questo primo capitolo si parte dallo studio ed applicazione di un sistema di monitoraggio convenzionale di sistemi energetici, in particolare il monitoraggio delle emissioni di un sistema energetico a biomassa.

Il monitoraggio continuo delle emissioni coinvolge diverse attività associate alla determinazione e alla memorizzazione delle emissioni inquinanti da sorgenti stazionarie. Impianti di produzione di energia elettrica e calore, inceneritori, cementifici e altri svariati stabilimenti industriali richiedono un monitoraggio continuo delle emissioni.

La normativa italiana in vigore che regola il monitoraggio delle emissioni gassose afferisce al D.Lgs. 152 e s.m.i.

La biomassa è una fonte di energia interessante per diverse ragioni, in primo luogo perché può contribuire allo sviluppo sostenibile [8]. L'energia da biomassa è interessante anche dalla prospettiva della sicurezza energetica; le risorse, infatti, sono spesso disponibili in loco e la conversione in un secondo vettore energetico è possibile senza l'impiego di grandi capitali. Attualmente la biomassa è usata prevalentemente come combustibile tradizionale (e.g. legna da ardere, letame), contribuendo a circa $38 \pm 10 \text{ EJy}^{-1}$. Gli usi più recenti della biomassa per la produzione di energia elettrica o biocombustibili sono attorno ai 7 EJy^{-1} [9].

2.1 Contesto di riferimento

Il progetto denominato BIOMASS+, è la naturale prosecuzione del progetto BIOMASS svoltosi tra gli anni 2009 e 2011, e prevede le attività di analisi e monitoraggio dell'esalazione dei fumi della caldaia sperimentale, realizzata nell'ambito del suddetto progetto BIOMASS, ubicata presso l'azienda regionale di Alberese

Grazie al progetto BIOMASS è stato possibile installare presso l'azienda agricola Regionale Alberese una caldaia a biomassa avente una potenza nominale di 55 kW_t in sostituzione della preesistente caldaia a GPL

Grazie al progetto si sono quindi potuti ottenere diversi benefici quali la sostituzione di una caldaia a combustibili fossili con una alimentata da una fonte rinnovabile come la biomassa, la riduzione dei costi di approvvigionamento del combustibile, la possibilità di utilizzare un combustibile locale e l'occasione per testare la caldaia con una serie di biomasse non convenzionali tipiche delle produzioni agricole della zona.

Tramite il progetto BIOMASS+ si è voluto dare continuità al progetto precedente con un'attività, descritta nel seguito, tramite cui verificare il funzionamento della caldaia in termini di emissioni in atmosfera, alimentata con biomasse diverse da quelle disponibili in commercio.

2.2 Contesto normativo

L'intervento ha lo scopo di caratterizzare le emissioni gassose della caldaia a biomassa in relazione ai parametri che consentono l'accesso agli incentivi statali del conto energia termico.

Il D.M. 28/12/12 chiamato "Conto Energia Termico" prevede incentivi da erogare ai soggetti che utilizzano caldaie a biomassa per la copertura del fabbisogno termico stagionale se soddisfacenti determinati requisiti tra cui i valori di emissioni gassose in atmosfera come determinati dal D.Lgs. 152/06 e s.m.i.

La caldaia oggetto del monitoraggio, la cui potenza termica nominale è maggiore di 35kWt, rientra nella categoria per cui vige il rispetto dei parametri della Tabella 2-1.

La tabella, per ciascun tipo di biomassa considerata, riporta i limiti di contenuto di polveri e di CO (monossido di carbonio) all'interno dei fumi della combustione ed un valore di rendimento minimo consentito.

Tabella 2-1 Prescrizioni per l'accesso al "Conto Termico

Tipo	Biocombustibili Conformità/certificazione	Certificazione	PPBT ⁽¹⁾ mg/Nm ³ (13% O ₂)	CO g/Nm ³ (13% O ₂)	Rendimento minimo (%)
CALDAIE	Legna da ardere	UNI EN 303-5:2012 classe 5	40	0,3	87+ log(Pn)
	Cippato e biomasse (152/2006)				
	pellet certificato UNI EN 14961-2 cl. A1-A2		30	0,25	

Particolato Primario comprensivo della frazione condensabile

$$^{(1)}PP_{BT} \text{ (mg/Nm}^3\text{)} = PP \text{ (mg/Nm}^3\text{)} + 0,42 \cdot OGC \text{ (mg/Nm}^3\text{)}$$

Le polveri, caratterizzate dal parametro PPBT (particolato primario calcolato secondo le norme UNI) possono essere individuate attraverso la somma di altri due parametri: la concentrazione di particolato primario presente nei fumi di combustione campionati direttamente allo scarico del generatore di calore (PP) e la concentrazione di composti organici gassosi, espressi in termini di carbonio totale presente nei fumi di combustione (OGC).

L'attività prevede la caratterizzazione delle emissioni, nel corso di una stagione di funzionamento, relativamente all'utilizzo di tre biomasse differenti, due delle quali, sarmenti di vite e frasche di olivo, provenienti dalle lavorazioni agricole tipiche della zona ed una, il cippato approvvigionata sul mercato nazionale. Le due biomasse rappresentano il sottoprodotto della lavorazione della vite e dell'ulivo, due colture tipiche della zona di Alberese, che ogni anno vengono prodotte in grande quantità dalla stessa azienda agricola e smaltite, fino all'inizio della sperimentazione, in discarica con relativi costi.

La possibilità di un loro utilizzo come combustibile per la caldaia rappresenta un grande valore aggiunto per l'azienda agricola ed un modo per rendere ancora più efficiente e remunerativo l'investimento fatto all'epoca dello sviluppo del primo progetto BIOMASS.

Secondo le ultime norme a livello nazionale recentemente sviluppate per incentivare impianti di questo tipo, sarebbe possibile, per questo impianto, accedere agli incentivi del "Conto Energia Termico" sulla produzione di energia termica (www.gse.it/conto-termico). Tali incentivi vengono erogati solo a quegli impianti che soddisfano certi parametri di qualità relativamente alla efficienza di produzione e alle emissioni di inquinanti in atmosfera.

Obiettivo quindi ed oggetto del progetto è, a valle dell'installazione della macchina, dimostrare le prestazioni dell'impianto in termini di emissioni inquinanti sia alimentato con biomasse per così dire standard come il cippato forestale e il pellet certificato sia con biomasse particolari quali frasche di olivo e sarmenti di vite.

2.3 Sistema di monitoraggio delle emissioni

Il sistema di monitoraggio e controllo consta sostanzialmente del sistema di analisi gas (FGMS - Flue Gas Monitoring System), progettato da Fer Strumenti S.r.l. per il monitoraggio in continuo delle emissioni di CO (monossido di carbonio), O₂ (ossigeno) e PTS (Polveri Totale Sospese) prodotte dalla caldaia a biomassa e da due datalogger Comet mod. S6021 per il campionamento e la registrazione dei dati.

Il sistema di analisi è a sua volta formato dalle diverse sub-unità, ognuna demandata alla rilevazione di un gas o inquinante particolare.

L'analizzatore ad infrarosso non dispersivo per l'analisi del CO, Enox II (Figura 2.1), commuta il parametro CO (0-200 mg/Nm3) in un'uscita attiva 4-20 mA.



Figura 2.1 Analizzatore CO mod. ENOX II

L'analizzatore dell'ossigeno è composto da una cella elettrochimica (Figura 2.2) che commuta il parametro O_2 in uscita attiva 4-20 mA.



Figura 2.2 Analizzatore O₂ a cella elettrochimica

La strumentazione per l'analisi delle polveri totali sospese si compone di una sonda TD-S (Figura 2.3), del kit anticondensa (unità di alimentazione montata dentro il quadro) e del centralino di controllo TD-DIP-4-C (Figura 2.4).



Figura 2.3 Sonda TD-S

Il funzionamento dell'apparecchiatura è basato sull'effetto triboelettrico.



Figura 2.4 Centralino di controllo ed unità di alimentazione del kit anti-condensa

L'archiviazione delle grandezze misurate è effettuata da due datalogger **Comet mod. S6021**. Questi datalogger consentono l'acquisizione di due canali analogici in corrente 4-20 mA e di un segnale digitale in tensione cadauno.

I due datalogger sono stati configurati, tramite software proprietario, con un tempo di campionamento pari a 180 secondi (3 minuti), tempo di campionamento che tiene conto della dinamica lenta dei parametri monitorati e dello spazio limitato di archiviazione.

La memoria EEPROM di cui sono dotati i datalogger consente lo storage di 32504 records, che, tenendo conto del tempo di campionamento impostato, equivalgono ad un mese di misure.

2.4 Campagna di monitoraggio e analisi dati

L'azienda agricola Alberese dispone per sua natura di diversi tipi di biomasse stagionali, in particolare:

- cippato misto di oleandro e tiglio
- cippato vite
- cippato olivo

Le biomasse sono state utilizzate per un periodo di due settimane l'una, di seguito si riportano l'analisi della campagna di monitoraggio durata sei settimane.

2.4.1 Ossigeno

Il primo parametro che è stato analizzato è l'O₂, questo parametro non è soggetto a nessun tipo di vincolo sia per quanto riguarda l'accesso al conto energia sia per quanto riguarda i limiti di legge riguardanti le emissioni inquinanti.

Questo dato tuttavia è fondamentale per correggere le misure di CO e PTS in riferimento ad un valore di ossigeno prestabilito, in modo da uniformare le misure e ad avere dunque misure confrontabili; poiché i limiti emissivi di sostanze gassose si riferiscono ad un determinato valore percentuale di ossigeno.

Il calcolo per passare da una percentuale di riferimento di ossigeno all'altra si effettua generalmente moltiplicando la concentrazione della specie in esame per il seguente coefficiente:

$$(21 - O_2 \text{ di riferimento}) / (21 - O_2 \text{ attuale})$$

Per O₂ di riferimento si intende il valore stabilito dalla normativa presa in esame mentre con O₂ attuale si intende il valore misurato. Riportiamo nel grafico seguente le misure dell'ossigeno in percentuale, il fondo scala dello strumento è 25%:

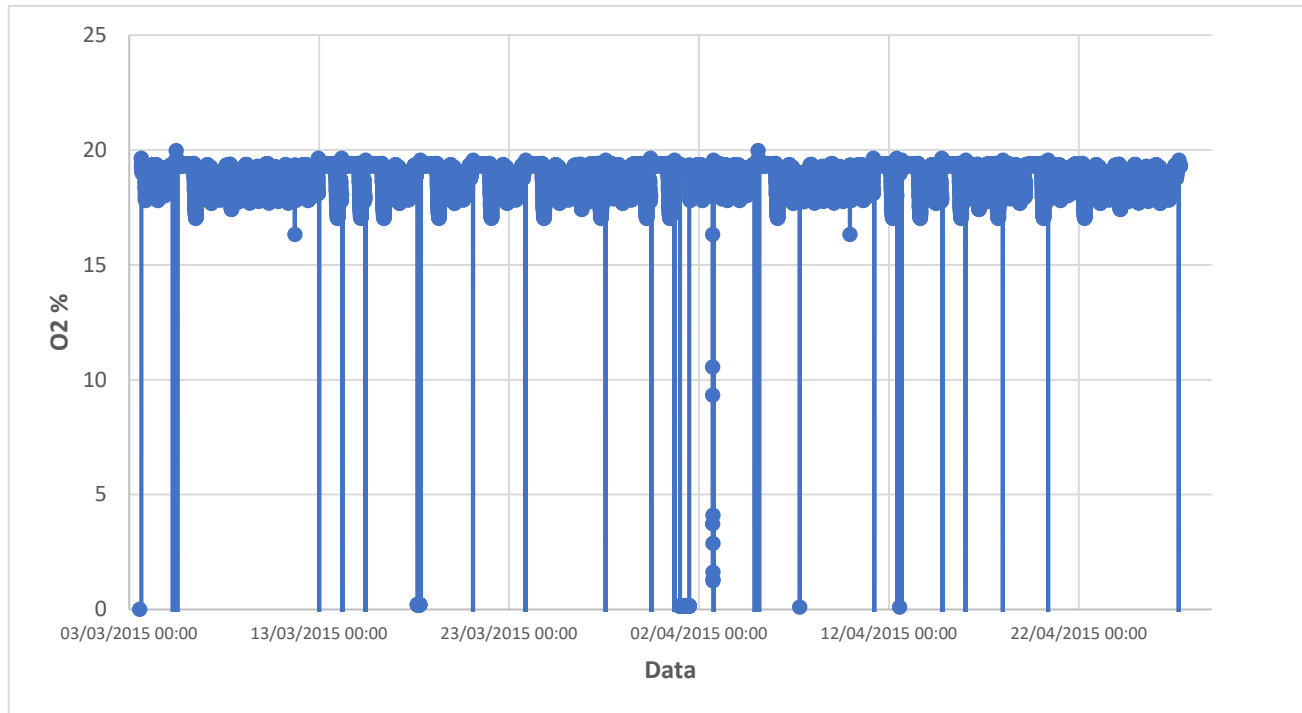


Figura 2.5 Valori campionati di O_2

La media dell' O_2 rilevata nel corso della campagna sperimentale è pari al 15,74% con uno scarto quadratico medio di 2,04.

2.4.2 Monossido di carbonio

Il monossido di carbonio al contrario dell'ossigeno è considerata un'emissione inquinante ed è normata di conseguenza.

Mentre nella combustione ottimale il carbonio viene completamente trasformato in anidride carbonica (CO_2), in condizioni di insufficiente quantità di ossigeno o di insufficiente tempo per far avvenire la reazione di combustione, si ha la formazione di una certa quantità di monossido di carbonio.

Il CO rappresenta quindi un primo stadio di ossidazione del carbonio: in pratica nei processi di combustione si formano sia CO che CO_2 .

Di seguito si riporta la tabella con i limiti per accedere al cosiddetto “Conto termico” (rif. DM 28/12/12 e GSE – Regole Applicative Conto termico (edizione 04/12/2013) - www.gse.it):

Tabella 2-2 Limiti normativi per l'accesso al "Conto termico"

[Tabella 11 – Allegato II – DM 28.12.12]	
	CO (g/Nm ³ rif. al 13% O ₂)
Caldaia a biomassa solida (escluso il pellet)	0.3
Caldaia a pellets	0.25

Di seguito si riporta il grafico del CO al 13% di O₂ nel mese di marzo e aprile:

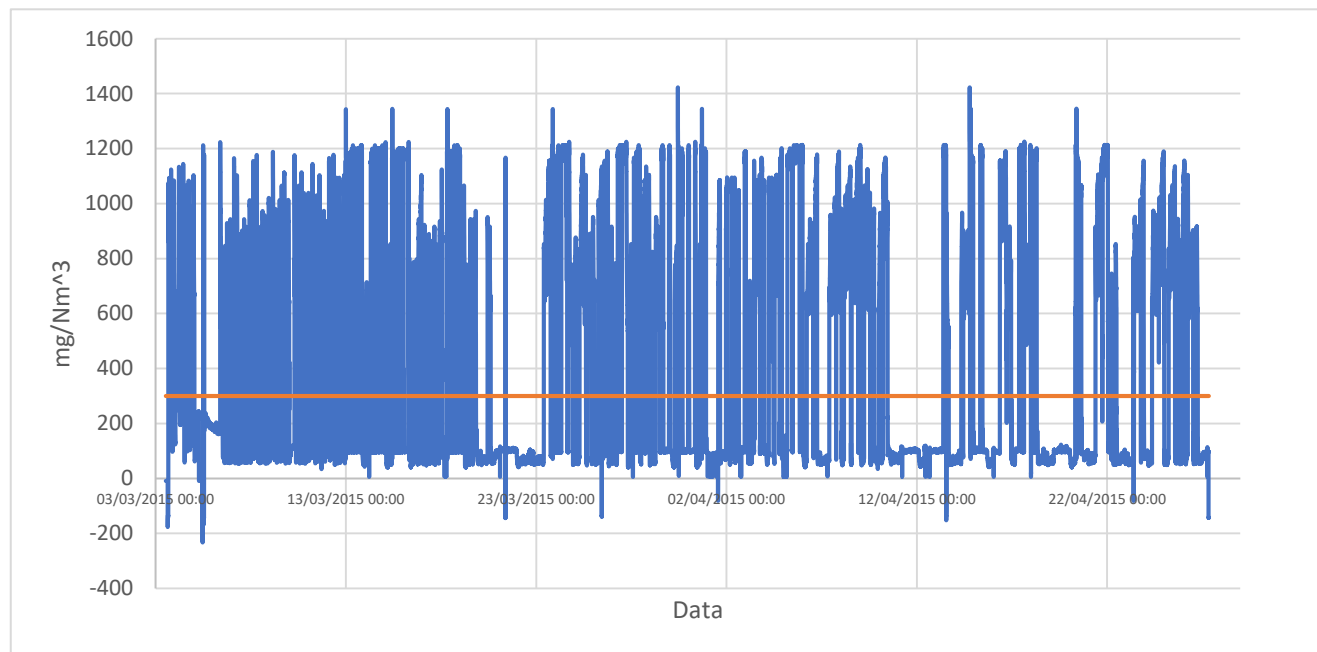


Figura 2.2.6 CO al 13% di O₂

In blu sono riportati i valori della CO misurata, in arancione il valore limite di 300 mg/Nm³.

Come si può notare dal grafico i valori di CO misurata sono ben al di sopra dei valori limite proposti dal GSE per accedere al “conto termico”. Si registrano valori fino a 1200 mg/Nm³ cioè quattro volte i 300 mg/Nm³ proposti dal GSE.

Di seguito si riportano le medie di CO per le diverse biomasse:

- misto oleandro e tiglio 349,69 mg/Nm³
- cippato vite: 517,65 mg/Nm³

- cippato olivo: 372,56

Nessuna biomassa rientra nel valore limite stabilito dal GSE.

2.5 Conclusioni

A causa dei valori di CO fino a quattro volte superiori al valore limite previsto dal “Conto Termico” si può affermare che non vi siano i presupposti per accedere ai relativi incentivi per la specifica tecnologia di caldaia considerata in questo lavoro di monitoraggio.

Valori di monossido di carbonio così elevati possono essere dovuti, oltre che da un funzionamento intermittente della caldaia causato dalle temperature miti tipiche dei mesi di marzo/aprile, da una combustione incompleta.

Per questo sarebbe opportuno regolare la portata d’aria in caldaia in modo tale da ottenere una combustione il più possibile completa.

I risultati della campagna sono stati presentati al seminario di chiusura del progetto BIOMASS+ svoltosi a Seggiano (GR) il 23 Giugno 2015 (appendice A, presentazione Power Point).

3 SISTEMA DI CONTROLLO OTTIMO DELLA PRODUZIONE DA IMPIANTO IDROELETTRICO

In questo capitolo si affronta lo sviluppo ed implementazione di un sistema di controllo di un impianto energetico convenzionale, quale un impianto idroelettrico. Tale controllo è dotato di un ottimizzatore, sviluppato ad hoc per l'applicazione, che massimizza la produzione di energia elettrica in base alla portata idrica disponibile.

Il sistema di ottimizzazione controlla real-time l'accensione e spegnimento delle singole turbine, impostandone il relativo set di carico di portata in modo da massimizzare la produzione di energia elettrica.

L'algoritmo sviluppato è stato implementato nel sistema di supervisione e controllo installato nell'impianto idroelettrico di Tombetta (VR), composto da 7 gruppi di generazione di tipo sincrono; in particolare di quattro turbine Andritz con generatori ad eccitazione del rotore a magneti permanenti e di tre turbine Riva con generatori ad eccitazione del rotore di tipo brushless

Verrà dunque descritto lo scenario, l'architettura software e i risultati di questo sistema di contro

3.1 Architettura software del sistema di monitoraggio e controllo

Questo paragrafo analizza l'architettura software del sistema di controllo mediante il modello **4+1 architectural view model** [15].

Il modello 4+1 è stato pensato per “descrivere l'architettura di un sistema software tramite l'uso di diverse e concorrenti viste”. Le viste vengono utilizzate per descrivere il sistema dal punto di vista di diversi stakeholder, come gli utenti finali, gli sviluppatori e i project manager. Le quattro viste del modello sono gli **Use Case Diagram**, la **logical view**, la **development view** e la **process view**. All'inizio di ogni sotto paragrafo verrà illustrato brevemente lo scopo della particolare vista in oggetto..

3.2 UML Diagrammi di casi d'uso

In questo paragrafo verranno descritti le funzioni offerte dal sistema, così come sono percepiti e utilizzati dagli attori che interagiscono col sistema stesso.

Gli attori principali di questo sistema sono l'operatore di impianto, che supervisiona 24 ore su 24 l'impianto, in sito o da remoto, il sistema di ottimizzazione e l'impianto stesso. Il sistema di ottimizzazione e l'operatore comunicano attraverso il software proprietario di supervisione e controllo PGP (Power General Portal) di ABB, mentre l'ottimizzatore è implementato attraverso un Windows Service.

L'operatore di impianto ha accesso, tramite interfaccia grafica, ai dati di impianto, siano essi misure dirette o indirette. Può inoltre modificare la disponibilità delle turbine e la loro priorità. Il PGP si interfaccia all'impianto, aggiornando in tempo reale il database delle misure e conseguentemente l'interfaccia grafica. L'ottimizzatore acquisisce i dati di impianto d'interesse e gli input dell'operatore, li elabora e assegna i set point di portata per ciascuna turbina che vengono presi in carico da PGP e attuati dai PLC di impianto. Questo metodo di funzionamento è uno dei tre disponibili e selezionabili dall'operatore (Figura 3.1, sinistra).

L'operatore può anche decidere di cambiare la logica di controllo che implementa la logica di distribuzione delle portate alle varie turbine, in questo caso l'unico elemento che differisce dalla Figura 3.1 è l'attore Optimizator, che non sarà più l'implementazione di un algoritmo che massimizza la potenza elettrica generata, ma un semplice controllore che distribuisce la portata di acqua sequenzialmente alle varie turbine disponibili basandosi sulla loro priorità e disponibilità.

Un'ultima modalità di controllo è quella completamente manuale, in cui è l'operatore a settare i set point delle diverse turbine idroelettriche (Figura 3.1, destra). In questo caso l'operatore disintermedia qualsiasi controllo di alto livello.

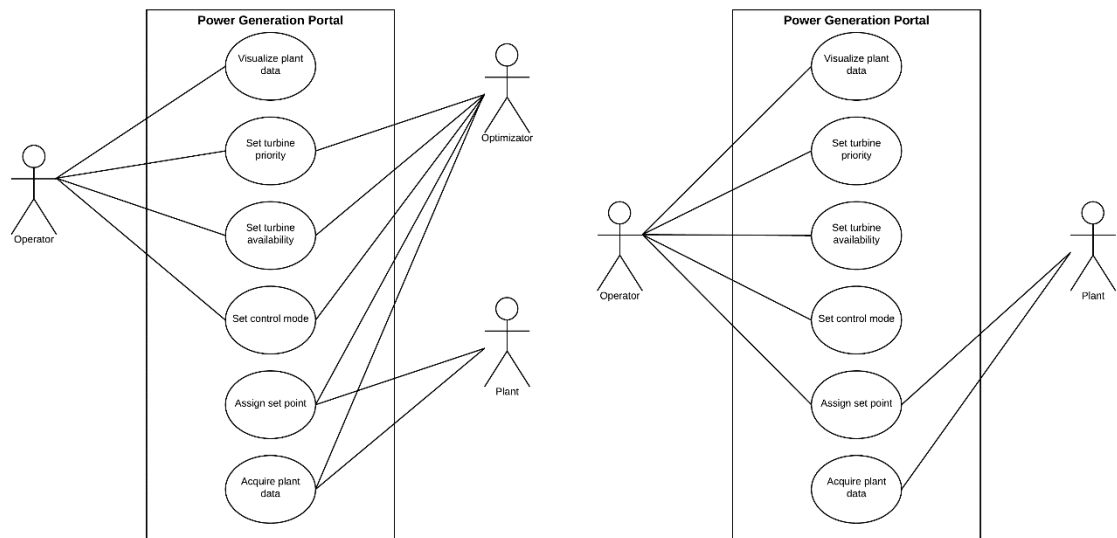


Figura 3.1 Optimizator mode (sinistra), manual mode (destra)

3.3 Deployment view

L'ottimizzatore come accennato precedentemente, è implementato attraverso un servizio Windows, installato nei due computer dedicati alla Human Machine Interface (HMI). L'HMI è basata sulla piattaforma proprietaria ABB HMI Platform Power Generation Portal (PGP).

Il controllo e l'acquisizione dati è attuata dalle Process Control Unit (PCU) ABB Harmony, i due livelli comunicano attraverso il protocollo di comunicazione ABB C-Net.

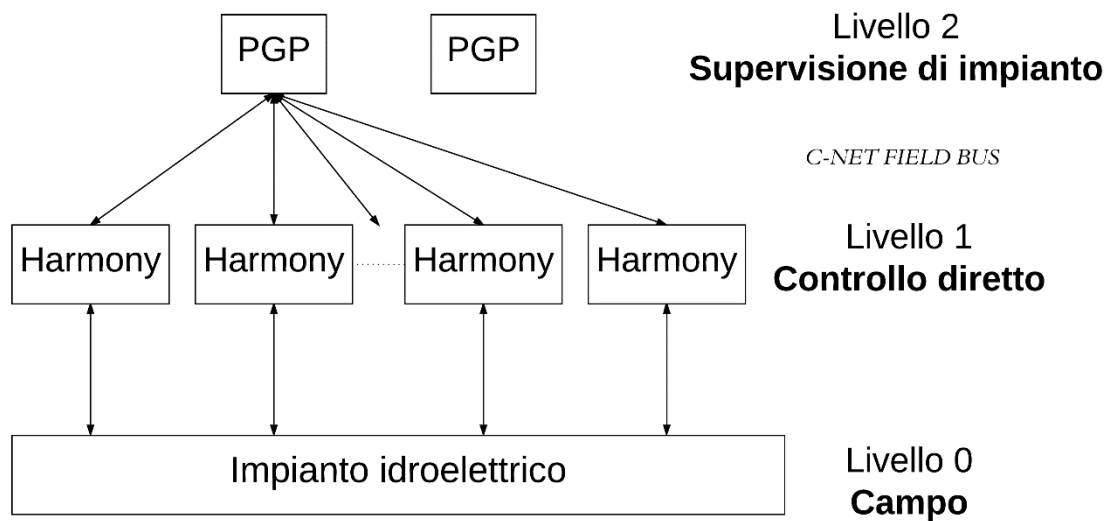


Figura 3.2 Architettura sistema di controllo

Il sistema HMI si basa su due server PGP nella configurazione *dual master*, in entrambi è installato il servizio Windows di ottimizzazione. Per configurazione *dual master* si intende la configurazione in cui due copie identiche di PGP comunicano in maniera sincrona con il livello 1, questa configurazione consente la ridondanza, perché se un server si blocca, l'altro continua a gestire l'impianto mantenendo il servizio di Windows in esecuzione.

Il tempo di ciclo del servizio è di 20 secondi, l'applicativo campiona gli input provenienti dal livello 1 e 2, li elabora e comunica i nuovi set point, per ciascuna turbina, al livello 2.

Il pacchetto di ottimizzazione è stato installato nei server DCS per evitare firewall e semplificare l'architettura, ma anche perché è completamente integrata nel software PGP, rendendosi totalmente trasparente all'operatore.

3.4 Logical view

L'ottimizzatore è implementato attraverso un Windows Service Application (o servizio

Windows), un programma eseguibile che opera in background, avviato e gestito dal

Sistema Operativo e dunque progettato per non dover richiedere l'intervento dell'utente.

Il servizio comunica con l'applicativo PGP grazie a una Dynamic Link Libraries.

Di seguito si riporta il diagramma delle classi che implementano il core del servizio di ottimizzazione, non evidenziando dunque le classi che si occupano dell'inizializzazione, temporizzazione e trace del servizio:

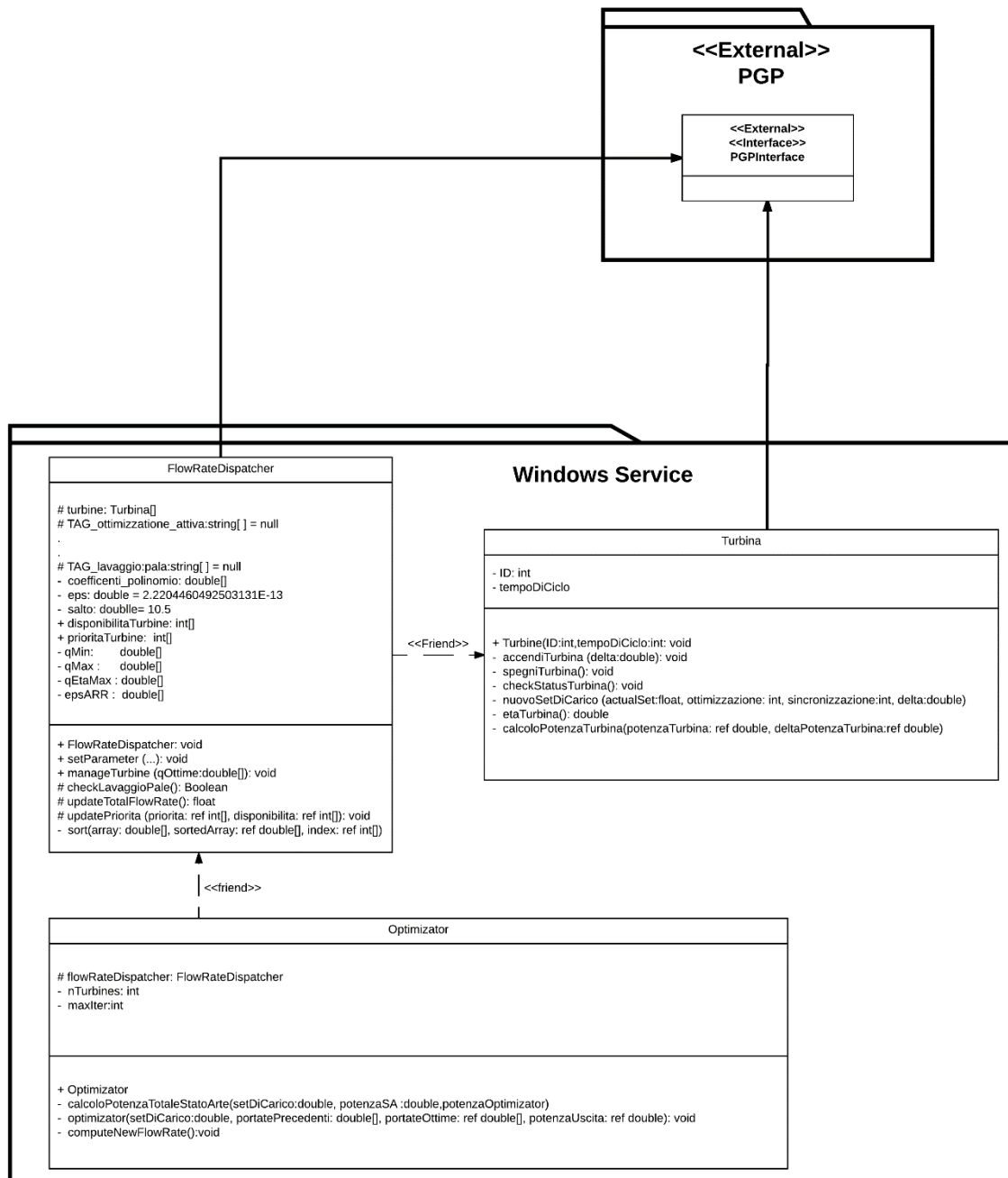


Figura 3.3 Diagramma delle classi, Windows Service

Sono tre le classi sviluppate; la classe **Optimizator** implementa l'algoritmo di ottimizzazione vero e proprio, demandando alle classi **FlowRateDispatcher** e **Turbina** l'interfaccia con l'applicativo PGP.

Il metodo `computeNewFlowRate()`, ottiene, grazie alla classe **FlowRateDispatcher**, i dati aggiornati dell'impianto e i dati immessi dall'operatore, elaborando le portate per ciascuna turbina che massimizzano la produzione di energia elettrica. I set point relative alle nuove portate vengono attuati grazie alla classe **FlowRateDispatcher** (`manageTurbine`) che a sua volta demanda alla classe **Turbina** la gestione della singola turbina, accensione, spegnimento o il solo set di carico.

Il diagramma degli stati del servizio Windows è riportato in Figura 3.4. Le modalità principali di funzionamento, come precedentemente accennato, sono tre, l'operatore può passare da una modalità all'altra in qualsiasi momento.

Il servizio viene eseguito ogni 20 secondi, mediamente il tempo di esecuzione è di 35 ms, nel restante tempo il servizio entra in una fase di sleep.

Il servizio dunque acquisisce i dati di impianto, nel caso in cui anche una sola turbina sia in manutenzione, si ritorna al primo stato. In caso contrario vengono acquisiti i dati forniti dall'operatore attraverso l'HMI, e vengono elaborate le portate ottime da assegnare a ciascuna turbina. Si ritorna allo stato iniziale.

L'attuazione del comando di ogni singola turbina viene preso in carico da un thread associato. A seconda dei diversi set point e dello stato di ciascuna turbina, il thread accenderà, spegnerà o setterà un nuovo set point. Una fase delicata è l'accensione di una turbina, questa ha un tempo variabile, che può arrivare fino ai 30 minuti. In questi 30 minuti, la portata totale in ingresso (*setDiCarico*), può variare sensibilmente. Nel caso in cui il controllo delle turbine fosse affidato ad un singolo thread, in caso di *start up* questo thread rimarrebbe in attesa della risorsa per un tempo indefinito, impendendo all'algoritmo di essere aggiornato con i dati del campo. Per evitare questo si è dunque deciso di sviluppare un'architettura multi-thread.

Diverse logiche di controllo, i cui dettagli implementativi verranno illustrati successivamente, sono state sviluppate per evitare le seguenti problematiche:

- switch di turbine basate sulle sole priorità
- continue accensioni e spegnimenti di turbine causate da piccole variazioni di portata in ingresso

La prima problematica è legata intrinsecamente alla logica di controllo ad alto livello dell'impianto. L'operatore sceglie le priorità da assegnare alla singola turbina, basandosi su fattori esogeni (per esempio certificati verdi) o endogeni (per esempio ore di lavoro della macchina). L'algoritmo nell'elaborazione delle portate che massimizzano la portata tiene conto anche di questa variabile. Ne tiene conto però solo nel caso di accensione (a parità di condizioni si accenderà la macchina con priorità più alta) e spegnimento (viceversa di prima). Quindi nel caso vi sia una sola macchina accesa con priorità bassa, e in un determinato istante una macchina con più alta priorità, questa rimarrebbe spenta.

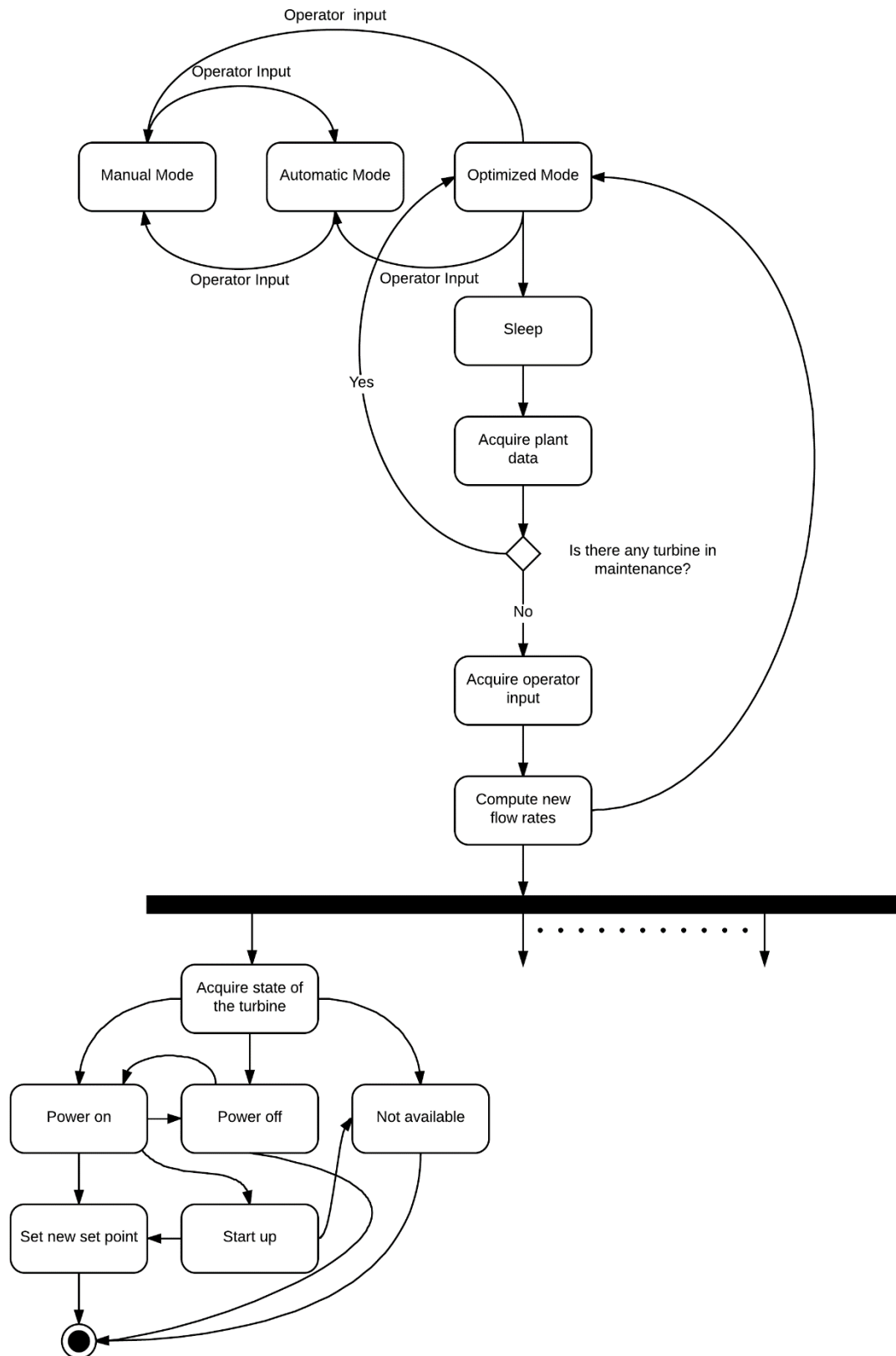


Figura 3.4 State Diagram Windows Service

3.5 Process view

L'ottimizzatore acquisisce la portata totale in ingresso dal controllore di livello, e calcola la portata di acqua per ciascuna turbina tale da massimizzare la Potenza attiva totale, in accordo con la seguente strategia:

Funzione obbiettivo:

$$P = \sum_{i=1}^N x_i g \eta_i(Q_i) * H Q_i$$

Dove:

N	Turbines Number
x	Boolean Variable (0 = turbine stop, 1 = turbine run)
g	Gravity acceleration
η	Efficiency
Q	Water flow rate set-point
H	Gross head

Vincoli:

$$\sum_{i=1}^N x_i Q_i = Q_{set} \text{ and } Q_{min,i} < Q_i < Q_{max,i}$$

Where:

N	Turbines Number
x	Boolean Variable (0 = turbine stop, 1 = turbine run)
Q	Water Flow Rate set point for each turbine
Q_{set}	[Total Water Flow Rate calculated by the control system] – [Water flow rate relevant deactivated turbines and turbines in synchronization]
Q_{min}	Minimum Water Flow Threshold (Cut-in)
Q_{max}	Maximum Water Flow Threshold (Cut-out)

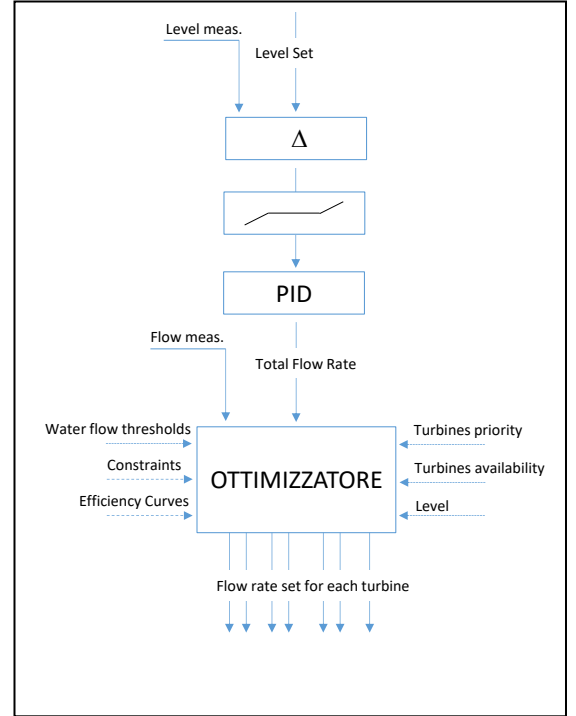
La Potenza attiva totale è una funzione che è combinazione lineare di funzioni η_i .

Le funzioni η_i sono funzioni monotone crescenti:

$$x \leq y \Rightarrow \eta_i(x) \leq \eta_i(y)$$

Per induzione con $N \geq 1$, per ogni reale $a_1, \dots, a_N, b_1, \dots, b_N$ con $a_i < b_i$ per tutti $i = 1, \dots, N$ abbiamo:

$$\sum_{i=1}^N a_i < \sum_{i=1}^N b_i$$



Dati I reali x, y con $x < y$, imponendo $a_i = \eta_i(x)$ e $b_i = \eta_i(y)$, otteniamo $a_i < b_i$ per tutti le i :

$$P(x) = \sum_{i=1}^N a_i < \sum_{i=1}^N b_i = P(y)$$

in tal modo anche g è monotona crescente.

Così che il problema di ottimizzazione può essere classificato nel sottoinsieme dei problemi di ottimizzazione monotoni [13].

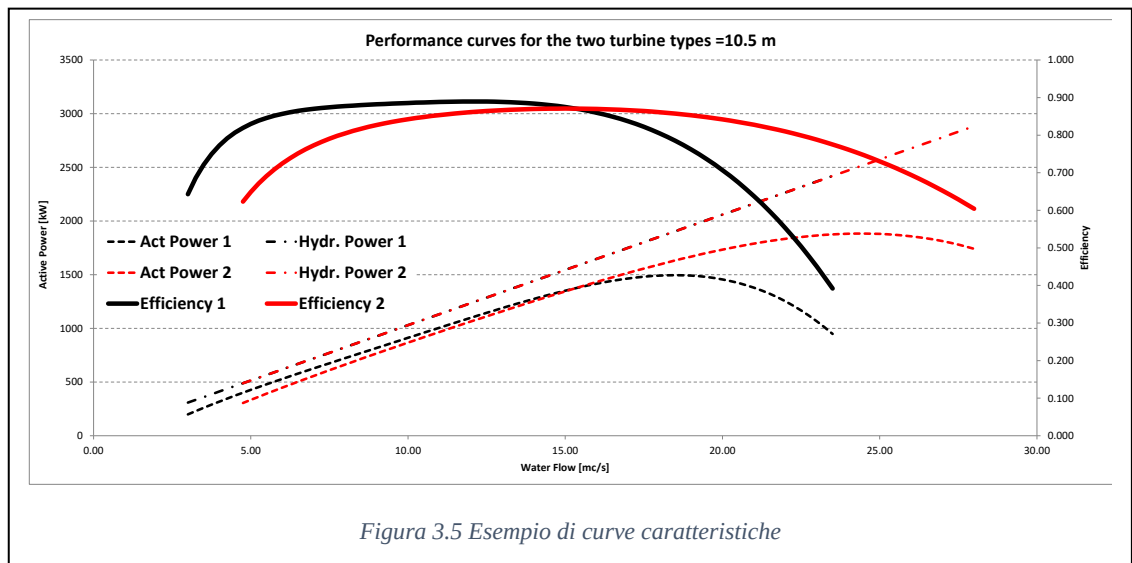
L'algoritmo di ottimizzazione decide il carico di ciascuna turbina in modo da trovare il suo punto di massima efficienza, prendendo in considerazione la portata totale in ingresso e le priorità:

$$\max \left(\sum_{i=1}^N x_i g \eta_i(Q_i) * H Q_i \right) \leq \max(x_1 g \eta_1(Q_1) * H Q_1) + \dots \max(x_N g \eta_N(Q_N) H Q_N)$$

L'algoritmo di ottimizzazione viene eseguito in alcuni millisecondi e consta di due fasi consequenziali, la prima che calcola che portate così dette di *prima istanza*, la seconda che ottiene i valori finali di carico attraverso un algoritmo iterativo.

3.5.1 Prima fase

Le curve di rendimento (Figura 3.5) mostrano tre valori di portata caratteristici per ciascuna turbina, il valore minimo necessario per attivare la turbina denominato Q_{min} , la portata massima denominata Q_{max} e il valore corrispondente alla massima efficienza, $Q_{\eta_{max}}$. La portata totale è distribuita ordinando le turbine secondo priorità, e settando il valore di carico corrispondente al punto di massima efficienza ($Q_{\eta_{max,i}}$) per ogni turbina disponibile; quindi, in caso di portata residua, un ΔQ_i addizionale di portata è aggiunto sequenzialmente alle turbine, fino al raggiungimento della soglia $Q_{max,i}$ in modo da distribuire completamente il Q_{set} .



3.5.2 Seconda fase

L'algoritmo iterativo esegue un numero Massimo di 100 iterazioni, ad ogni ciclo il An iterative algorithm performs 100 iterations, at each cycle the flow-set relevant the turbine with higher efficiency is increased by $\Delta Q_i = (Q_{set}/100)$ meanwhile the flow-set relevant the turbine with lower efficiency is decreased by the same quantity. The constraints Q_{min} and Q_{max} are taken into account, so sometimes the ΔQ_i can be reduced. At the end of the 100 iterations, the algorithm converges at the final flow set points for all the available and activated turbines.

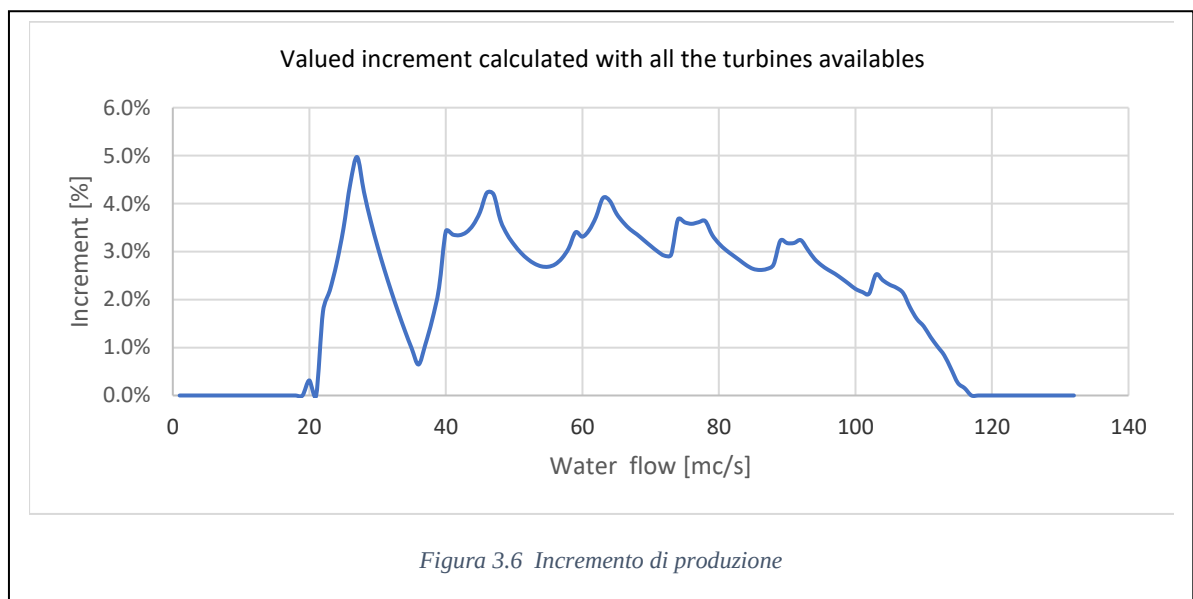
3.6 Validazione e comparazione con lo stato dell'arte

Una prima validazione dell'algoritmo è stata implementata attraverso una comparazione fra il precedente "controllo automatico" e l'attuale "controllo automatizzato".

Questa comparazione è stata attuata simulando la produzione di energia dello specifico impianto di Tombetta nei due differenti scenari di controllo.

I vincoli di ottimizzazione usati nella simulazione sono quelli dell'impianto reale, con tutte le turbine disponibili, portata d'ingresso variabile da 0 m³/s to 132 m³/s e un passo di simulazione di 1 m³/s.

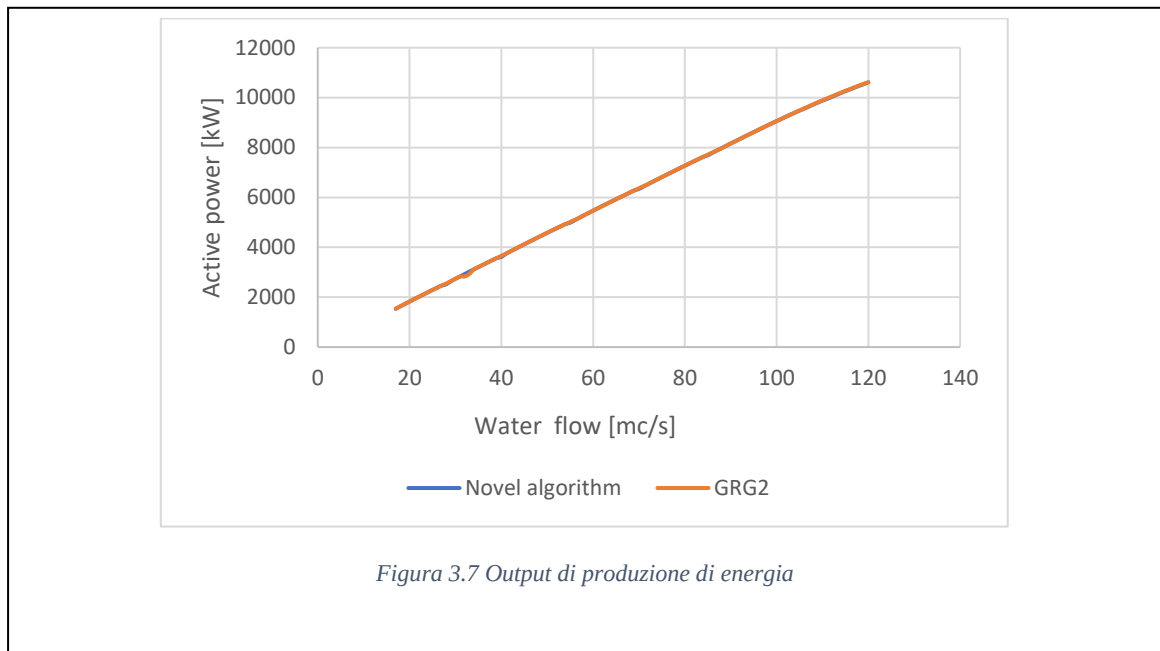
Di seguito un grafico che riporta l'incremento di produzione del "controllo ottimizzato" comparato al "controllo automatico":



L'incremento stimato arriva al 5%.

L'algoritmo, per un'ulteriore validazione dal carattere più generale, è stato comparato con l'algoritmo detto di "Generalized Reduced Gradient 2" code (GRG2) [11] basato sull'algoritmo chiamato "Generalized Reduced Gradient" [12] code, uno dei migliori metodi deterministici per la ricerca di ottimi locali [13]. GRG2 è anche uno delle tre scelte fornite da Microsoft Excel® [14] per la risoluzioni di problemi di ottimo.

Le condizioni al contorno sono le stesse della precedente simulazione, di seguito il grafico che riposta la produzione di energia nei due casi, il “controllo ottimo” e il GRG2:



Le produzioni sono comparabili se non sovrapponibili, confermando la validità dell’algoritmo sviluppato. Inoltre, la complessità di GRG2 è maggiore della complessità del Nuovo algoritmo, a titolo d’esempio il tempo di elaborazione del risolutore ottimo GRG2 di Microsoft Excel® è di circa 10 secondi, superiore di diversi ordini di grandezza rispetto al nuovo algoritmo, che si attesta sui 10 ms.

3.7 Conclusioni

È stato progettato, sviluppato, testato e installato in un impianto reale un sistema di controllo ed ottimizzazione di impianto idroelettrico. L’algoritmo di ottimizzazione, sviluppato ad hoc, consente aumenti di produzione elettrica fino al 5%, gestendo in modo ottimale la ripartizione del carico tra le varie turbine disponibili in sito.

Il controllore è operativo in continuo, non sono state riportate dagli operatori malfunzionamenti o mancate operatività dello stesso.

4 SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO DEL WAVE ENERGY CONVERTER DENOMINATO “SEASPOON”

A valle dello studio ed applicazione di metodi di monitoraggio convenzionale e controllo ottimo di sistemi energetici tradizionali, in questo capitolo si affronta il monitoraggio e controllo del dimostratore di una tecnologia innovativa.

In questo capitolo verrà analizzato il sistema di monitoraggio e controllo dell'innovativo Wave Energy Converter (WEC) denominato Seaspoon.

Il Seaspoon è un innovativo sistema di generazione di energia dal moto ondoso sviluppato e brevettato dal Thermochemical Power Group (TPG) dell'Università degli Studi di Genova.

*Il sistema di monitoraggio e controllo è stato interamente progettato e implementato nel corso progetto **Seaspoon: verso la nuova energia del mare 2**, finanziato dalla Regione Liguria FESR (Fondo Europeo Sviluppo Regionale) tramite il Distretto Ligure delle Tecnologie Marine (DLTM).*

4.1 Il Seaspoon

Il Seaspoon, sviluppato dal TPG della facoltà di Ingegneria Meccanica-DIME dell'Università di Genova, è un dispositivo innovativo per la conversione energetica del moto ondoso, concepito per un'installazione off-shore e per operare sommerso in prossimità della superficie del mare. Il sistema è progettato per essere messo in rotazione dai moti orbitali che caratterizzano il moto ondoso, i quali possiedono un maggiore quantitativo di energia subito al di sotto del pelo libero dell'acqua; il Seaspoon, perciò, presenta un asse principale parallelo all'asse dei moti orbitali, perpendicolare quindi alla direzione di propagazione delle onde.

Una prima versione del Seaspoon, le cui fasi di ideazione e progettazione iniziarono nel 2011, prevedeva due elementi principali (Figura 4.1): il rotore (1) e la pala (spoon) (6). Il rotore utilizzato era il Savonius (3), concepito per ruotare sempre nel medesimo senso, indipendentemente dal verso del flusso incidente. L'asse del rotore (2) era disposto perpendicolarmente alla direzione di avanzamento dell'onda, in modo da sfruttarne al massimo l'energia cinetica. Lo spoon, di forma rettangolare, alla base, era fissato all'asse principale di rotazione, collegato a sua volta, tramite due bracci (5), all'asse di rotazione del rotore. La funzione della pala era permettere la rotazione dell'intero dispositivo in fase con l'onda incidente (con rotore in alto in corrispondenza del cavo dell'onda e rotore in basso in corrispondenza della cresta dell'onda).

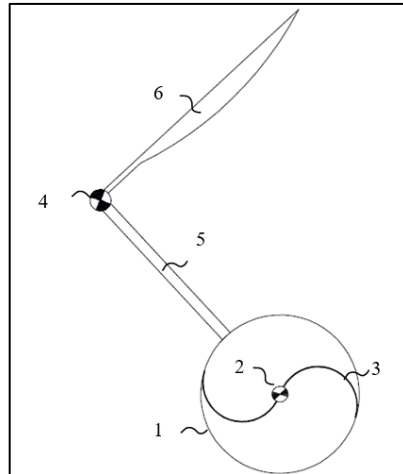


Figura 4.1 Schema prima prototipo Seaspoon

A seguito di adeguate analisi numeriche in ambiente MATLAB® e CFD (Computational Fluid Dynamics), un primo prototipo di Seaspoon, con l'assetto appena descritto, è stato realizzato e testato nel canale ondogeno presso il Laboratorio TPG al Campus universitario Savona.

Le conclusioni delle campagne sperimentali indussero a pensare ad un nuovo modello di Seaspoon costituito solamente dalla pala, con l'eliminazione del rotore :

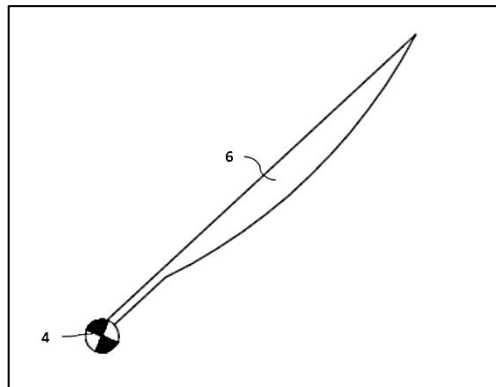


Figura 4.2 Secondo prototipo Seaspoon

Un iter simile al precedente è stato condotto per la validazione del nuovo layout costruttivo.

A seguito dei promettenti risultati delle sperimentazioni [4] [5] [6], nel settembre 2015 è iniziata una campagna sperimentale in mare aperto di un prototipo full scale.

Il prototipo realizzato (Figura 4.3) ha una potenza nominale stimata di 1 kW, ed è progettato per onde di 2 metri di altezza.

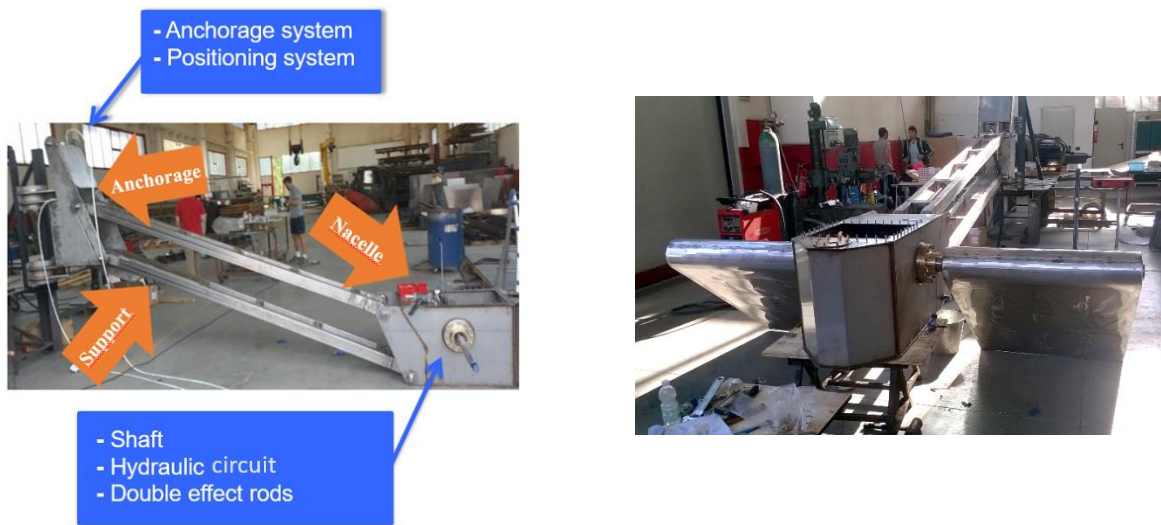


Figura 4.3 Overview del prototipo Seaspoon full scale

Il prototipo è stato installato a largo di Genova Sturla (a 1.5 km dalla costa) in data 29 settembre 2015 per un periodo di prove in condizioni di mare reale, con l'obiettivo di una valutazione qualitativa e quantitativa delle sue performance in dizioni meteomarine reali.

4.2 Descrizione componenti principali del prototipo

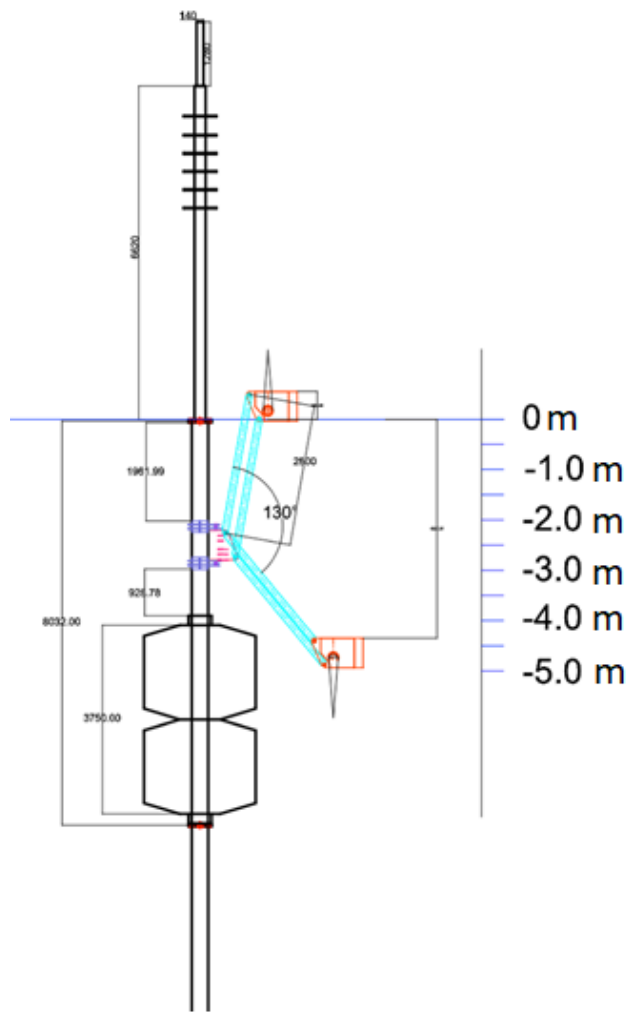


Figura 4.4 Seaspoon e meda

tramite opportuno albero.

Il prototipo, realizzato dall'azienda 3DB con sede a Cicagna (GE), è composto da 2 pale mobili unite tramite un albero di collegamento e supportate in generale dalla struttura della macchina stessa. Le pale mobili sono collocate nella "coda" della macchina denominata navicella. Al fine di immagazzinare/generare energia l'albero delle pale è collegato, tramite accoppiamento a catena (rapporto 1:1) a un sistema composto da due pistoni che comprimono alternativamente un fluido motore (olio).

La navicella è supportata da due bracci, collegati all'ancoraggio, che ne permettono sia la movimentazione verticale (tramite un pistone dedicato), variando l'altezza di immersione, sia il movimento rotatorio sul piano orizzontale, che risulta in questo caso un movimento spontaneo del macchinario con cui è in grado di auto-allinearsi rispetto alla direzione principale del moto ondoso.

Il braccio superiore è corredato da un tubo orizzontale che ha lo scopo di convogliare il cablaggio dalla navicella. La testa del Seaspoon che sostiene i bracci e il pistone di movimentazione, è connessa alla meda tramite due cerniere imbullonate e collegate

È possibile quindi distinguere quattro parti fondamentali e distinte del Seaspoon: il sistema di ancoraggio, il braccio, la navicella e l'albero con le pale su di esso calettate.

4.2.1 Circuito ad olio e pistoni

All'interno della navicella sono posti due pistoni idraulici a doppio effetto, sfasati di 136°. La scelta è stata dettata da un ragionevole compromesso tra semplicità costruttiva e costanza della coppia resistente: nelle future evoluzioni del Seaspoon sarà possibile ottenere un profilo di coppia maggiormente uniforme, questo a fronte di un numero di pistoni idraulici attivi maggiore.

In un sistema commerciale, l'olio idraulico in pressione potrebbe essere utilizzato per la generazione

di energia. Nel caso del presente prototipo, la pressione e la quantità di olio pompato sono stati monitorati al fine di dimostrare la fattibilità e le prestazioni del Seaspoon. L'olio viene quindi poi laminato in un'apposita valvola di massima pressione e restituito al serbatoio d'olio alla pressione ambiente. Tale serbatoio di olio è stato ricavato nella "testa" del corpo centrale del Seaspoon (la punta trapezoidale del corpo centrale).

Il circuito idraulico che caratterizza il Seaspoon ricopre un'importanza centrale nel progetto poiché consente di compiere tutte le considerazioni necessarie a quantificare la produzione energetica del sistema. Se ne riporta nel seguito una rappresentazione schematica con annessa una breve spiegazione del funzionamento.

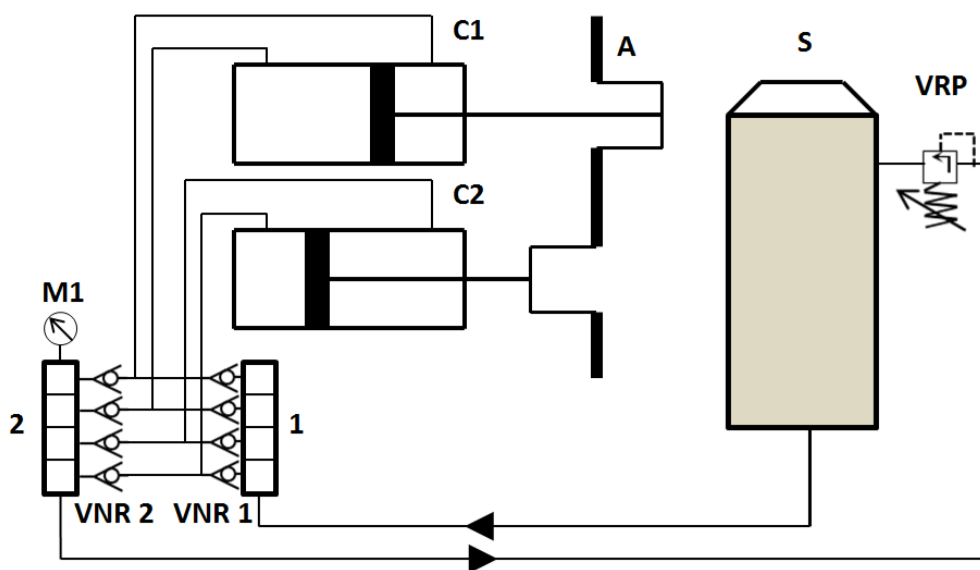


Figura 4.5 Schema del circuito idraulico

Il sistema utilizza olio che viene compresso sfruttando l'energia meccanica fornita dall'albero del Seaspoon. Quest'ultimo trasferisce il proprio moto ad un albero a gomiti (A) che favorisce l'azionamento dei due pistoni idraulici, (C1) e (C2), presenti all'interno del sistema. Questi elementi possono quindi considerarsi l'equivalente di una pompa idraulica.

Il ciclo del fluido comincia, a pressione ambiente, nel serbatoio (S), l'olio si muove da qui per immettersi nel circuito solamente se si verifica una depressione a valle di questo elemento; successivamente percorre un condotto fino ad arrivare al collettore a 4 vie (1), questo collettore mette in comunicazione rispettivamente il serbatoio alle quattro camere dei pistoni. In questo collegamento è garantita la direzionalità da 4 valvole di non ritorno (VR1) che impediscono il ritorno dell'olio al serbatoio.

I due pistoni (C1) e (C2), sfasati di 136° , funzionano a doppio effetto e quindi comprimono olio durante entrambe le fasi di moto. In parallelo al collettore di entrata olio (1), vi è un secondo collettore a 4 vie (2) che consente all'olio in uscita dai cilindri di raccogliersi e miscelarsi. Anche in questo caso, tra collettore e pistoni, 4 valvole di non ritorno (VNR2) garantiscono il corretto fluire del fluido; l'olio che oltrepassa il collettore (2) non può quindi rientrare nelle camere dei cilindri.

Proseguendo, una valvola di regolazione di pressione (VRP) permette di impostare il livello voluto di pressione all'interno dell'intero circuito.

La movimentazione dell'olio è permessa quindi dal moto dei pistoni all'interno dei cilindri. Nel momento in cui un pistone si muove, in una camera l'olio viene compresso mentre nell'altra si viene a creare una depressione; tale depressione consente all'olio presente nel serbatoio di essere richiamato e riempire appunto le camere che si stanno svuotando.

Nella camera dove invece avviene la compressione, l'olio fuoriesce ed arriva ai due collettori, non potendo fluire attraverso le valvole (VR1) passa attraverso le valvole (VR2) fino ad incontrare la valvola di regolazione (VRP). Tale valvola diventa il battente del pistone nel processo di compressione. L'olio, arrivato alla pressione stabilita dalla valvola, la oltrepassa per poi ritornare al serbatoio a pressione ambiente.

Lo stesso processo avviene nel secondo cilindro sommando il proprio effetti a quelli del primo.

Il livello di pressione massimo imposto nel circuito è monitorabile attraverso un sensore di pressione posizionato sopra il secondo collettore (2).

La pressione all'interno del circuito è regolata tramite una valvola a pistoncino comandata da un motore DC Bonfiglioli alimentato a 24 VDC.

4.3 Hardware del sistema di monitoraggio e controllo

Il sistema di monitoraggio e controllo è stato sviluppato in collaborazione con l'azienda Techcom srl, facente parte del Consorzio Temporaneo di Impresa del progetto ***Seaspoon: verso la nuova energia del mare 2***. In particolare l'azienda Techcom srl si è occupata dell'implementazione hardware e relativa installazione del sistema di monitoraggio e controllo.

L'elettronica di controllo e il relativo firmware sono stati sviluppati tenendo conto del sito di installazione, in particolare delle intrinseche difficoltà di accesso. Gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria dovevano essere minimizzati in quanto questi coinvolgevano l'utilizzo di natanti e operatori specializzati in lavori in quota.

Le due caratteristiche fondamentali del sistema sono dunque:

- robustezza
- affidabilità

Di seguito troviamo uno schema a blocchi del sistema nella sua interezza:

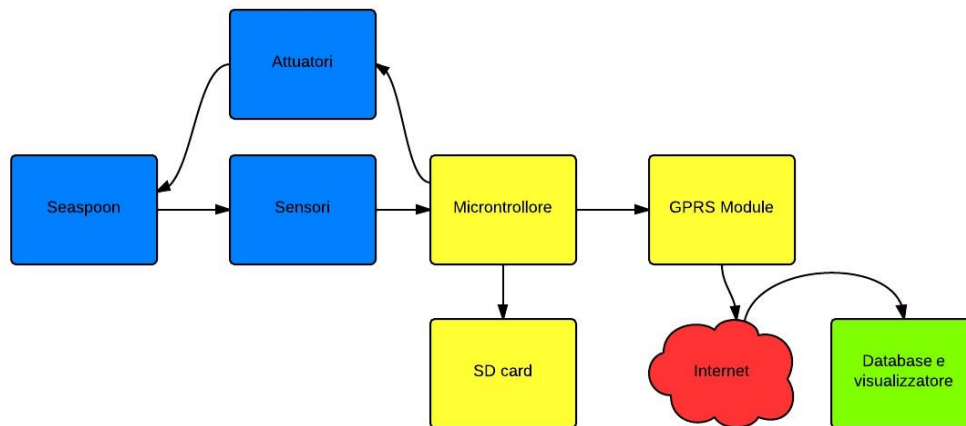


Figura 4.6 Schema

In questo diagramma si trovano tre diversi sottosistemi. In primo luogo il Seapoon, il dispositivo oggetto del monitoraggio e controllo, e per questo dotato di sensori e attuatori. I segnali trasdotti dai sensori vengono elaborati, salvati su scheda μ SD e in un secondo momento caricati attraverso su una piattaforma di storing e visualizzazione, tramite una scheda a microcontrollore.

4.3.1 Sensoristica on board

Per il monitoraggio della turbina e delle prestazioni del circuito idraulico sono stati scelti ed integrati nel sistema i seguenti sensori:

- **Encoder rotativo** assoluto per il monitoraggio rotazione delle pale sull'asse principale. Si tratta di un encoder digitale rotativo ad albero cavo monogiro con assoluto magnetico, prodotto dalla BMHS, modello 42S1. La temperatura di funzionamento del sensore è compresa tra -20° e $+85^{\circ}\text{C}$ pertanto è idoneo per l'applicazione marina ed il sensore ha un grado di protezione IP65. Il sensore ha una risoluzione di 9 bit, quindi con 256 posizioni, più che sufficiente per identificare la posizione delle pale, ed ha il punto di zero programmabile in funzione della posizione di installazione. Alimentazione 5VDC e massimo assorbimento di 100mA. Il sensore viene acquisito dalla scheda di controllo codificando 16 posizioni angolari differenti.
- **Sensore di pressione** per il circuito di pompaggio dell'olio. Si tratta di un trasmettitore di pressione OEM per integrazione industriale prodotto dalla Danfoss modello MBS 1250-3G11, progettato per applicazioni particolarmente gravose fino a temperature di 125°C e dotato di smorzatore di impulsi integrato per resistere anche a vibrazioni. Si tratta di un sensore costruito con corpo in acciaio inox pertanto idoneo anche ad applicazioni in cui potrebbe venire a contatto con acqua marina. L'uscita analogica in corrente 4-20mA permette una semplice acquisizione del sensore con la scheda di controllo progettata. Il range di misura del sensore è stato scelto in funzione dell'applicazione che prevede in condizioni operative pressioni di circuito massime dell'ordine dei 70-80 bar. In laboratorio è stato testato fino ad una pressione di circa 100bar.
- **Sensori di livello liquido** a galleggiante: sono stati montati 5 sensori di livello a galleggiante nella scatola della navicella del Seapoon per determinare il livello di eventuali infiltrazioni di acqua di mare. Si tratta di interruttori in materiale plastico prodotti dalla Sodial modello ZP4510 con resistenza di contatto 100m Ω . I sensori sono stati montati nella scatola a livelli differenti rispetto al fondo ad una distanza di circa 10cm uno dall'altro. Ogni interruttore è

montato elettricamente in parallelo ad una resistenza da $1k\Omega$ che, acquisita dalla scheda, consente di definire 5 livelli di riempimento della navicella.

- **Pompa di sentina** per l'eventuale svuotamento della scatola del motore. Si tratta di un dispositivo prodotto dalla Rule modello 800GPH ed alimentabile a 12VDC, azionabile in caso di emergenza ed in presenza di un operatore, qualora i sensori di livello dovessero riscontrare un allagamento interno. Prima di procedere con lo svuotamento è necessario azionare il braccio di posizionamento fino a portare il corpo del seaspoon in superficie, rimuovere il coperchio della scatola motore ed estrarre il tubo di svuotamento collegato alla pompa di sentina per permettere la fuoriuscita dell'acqua.



Figura 4.7 Encoder rotativo



Figura 4.8 Sensore di pressione olio



Figura 4.9 Sensori di livello acqua di mare



Figura 4.10 Pompa di sentina



Figura 4.11 Encoder rotativo nel sito di installazione

4.3.2 Sensoristica in superficie

Sul cestello della meda, quindi ad un'altezza di circa 5 metri sul livello del mare, sono stati alloggiati una serie di sensori idonei al rilevamento delle condizioni meteo-marine ed al posizionamento del Seaspoon.

Nel dettaglio:

- **Sensore di livello acqua ad ultrasuoni:** sensore ad ultrasuoni prodotto dalla ditta Maxbotix modello Maxsonar HRXL WR Series 7363 idoneo alla misura di livello di liquidi fino ad una distanza massima di 10 metri con risoluzione di 1mm ed accuratezza di 1cm circa. Il sensore misura il tempo di volo di un 'onda acustica inviata verso la superficie del mare e riflessa indietro. Il sensore integra una sonda di misura della temperatura dell'aria che viene utilizzata in tempo reale per la correzione della velocità del suono dovuta al cambiamento di densità dell'aria. Questo sensore con uscita pulse width viene acquisito alla frequenza di 5 Hz dall'elettronica di bordo e permette una accurata ricostruzione dello stato di mare. Il sensore permetterà pertanto di registrare con buona accuratezza il valore dell'altezza significativa dell'onda oltre che il livello della marea, dati fondamentali per avere un'idea delle comportamento della turbina in funzione dello stato di mare.
- Il dato sarà utilizzato anche per decidere eventuali affondamenti di emergenza, gestiti dall'operatore, in caso di condizioni meteo-marine troppo avverse, allo scopo di preservare il dispositivo. Si sottolinea che trattandosi di onde acustiche, quindi meccaniche, il segnale rilevato dal sensore può in determinate circostanze ambientali essere rumoroso, per sua natura. L'esperienza con questo tipo di sensori ci dimostra che forti venti o precipitazioni intense, così come eventuali spruzzi di acqua marina, possono temporaneamente sporcare il segnale rilevato dal sensore. E' necessario pertanto un filtraggio dei dati a valle prima di una validazione degli stessi. Tuttavia questa tecnologia è stata scelta perché rappresenta un ottimo compromesso tra qualità, robustezza e basso costo, pertanto risulta decisamente interessante anche in ottica futura.
- **Estensimetro potenziometrico a filo metallico:** collegato da un lato al cestello della meda in superficie e dall'altro lato (tramite un sistema di carrucole) al braccio di posizionamento. Il sensore permette di monitorare la quota del seaspoon rispetto al cestello di superficie. Si tratta di un sensore prodotto dalla MicroEpsilon modello WPS3000MK, già fornito in custodia IP65 in polycarbonato idoneo per applicazioni outdoor. Il filo metallico di lunghezza 3000mm è costruito con fibre di acciaio inox intrecciate garantendo resistenza meccanica e resistenza agli agenti corrosivi. Come detto il sensore ha un'uscita analogica potenziometrica con resistenza interna di 1Kohm.
- Il sensore verrà utilizzato pertanto per avere un'indicazione sul posizionamento del braccio meccanico.



Figura 4.12 Sensore di livello liquidi



Figura 4.13 Sensore di livello liquidi

Model MK120 (Measuring range 3000, 5000mm)

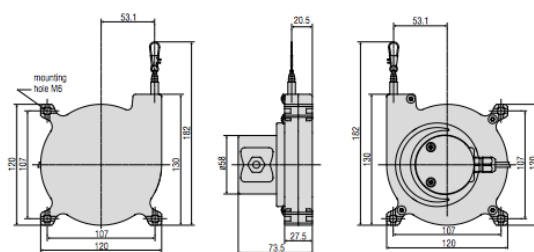


Figura 4.14 Estensimetro a filo metallico



Figura 4.15 Telecamera IP



Figura 4.16 Nella foto sono visibili l'estensimetro ed il quadro di controllo con scatola di derivazione

Vi è infine una telecamera IP a colori Full HD, grado di protezione IP67, dotata di illuminatore IR incorporato per le riprese notturne fino a 20 metri di distanza. La telecamera è stata utilizzata per monitorare in tempo reale il Seaspoon dall'alto, è stata installata sulla sommità della meda ad un'altezza di circa 5 metri sull'acqua, orientata in direzione N in modo da riuscire a riprendere il Seaspoon quando orientato per le direzioni d'onda prevalenti del sito (Sud-Est, Sud e Sud-ovest). La risoluzione massima della telecamera è 1920x1080 pixels, 25 frame per secondo. La telecamera è dotata di interfaccia Ethernet ed è stata collegata direttamente al ponte radio passando attraverso lo switch industriale posto nel quadro di controllo generale. Questa telecamera si è rivelata estremamente utile per monitorare la posizione del braccio meccanico e soprattutto l'orientamento del braccio del Seaspoon, e valutarne l'allineamento con il moto ondoso. Inoltre ha fornito informazioni qualitative sulle condizioni meteomarine del sito di interesse.



Figura 4.17 Cestello e sensoristica in superficie

In Figura 4.17 è visibile il cestello nel quale è alloggiata l'elettronica di controllo e gli apparati di rete e la sensoristica di superficie. In particolare il sensore ad ultrasuoni è cerchiato in rosso, l'IP camera in azzurro e l'antenna radio in nero.

4.3.3 Controllo della pressione del circuito idraulico

Il motore del Seaspoon, come descritto in precedenza è stato progettato per pompare olio all'interno di un circuito idraulico interamente contenuto all'interno del corpo principale del sistema, sulla punta del quale è stato posizionato anche il serbatoio dell'olio.

Si riporta nuovamente una rappresentazione schematica del circuito pneumatico:

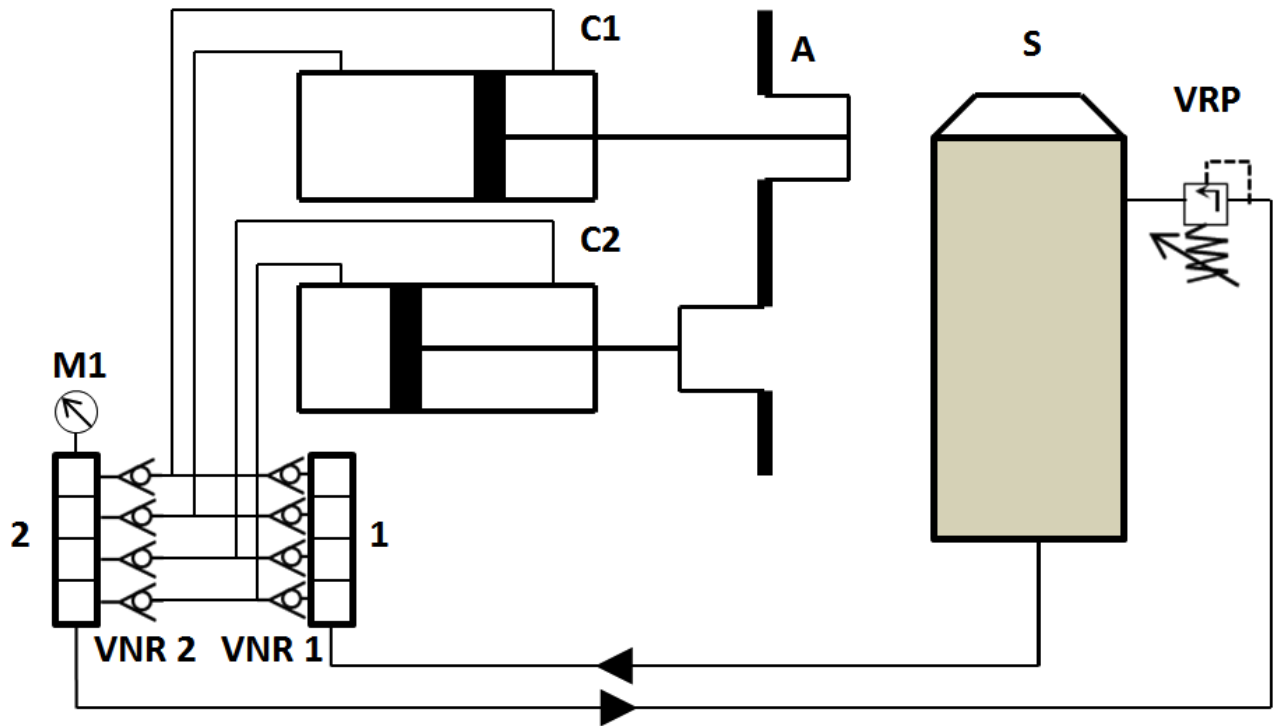


Figura 4.18 Schema circuito idraulico Seaspoon

Come illustrato precedentemente (Figura 4.18), la valvola di regolazione di pressione (VRP) permette di impostare il livello voluto di pressione all'interno dell'intero circuito.

La valvola di regolazione è una valvola a pistoncino comandata da un motore DC Bonfiglioli alimentato a 24 VDC modello BC120-24-2700-240 a sua volta controllato dall'elettronica di controllo. Il motore dunque ruoterà in direzione oraria o antioraria, a velocità costante e prefissata, per aprire o chiudere la valvola e dunque per aumentare o diminuire la pressione dell'olio. Anche se il motore richiede alimentazione 24VDC per il nostro progetto è stato utilizzato a 12VDC. La coppia ottenuta è inferiore rispetto a quella ottenibile a 12VDC ma comunque più che sufficiente per azionare la valvola.

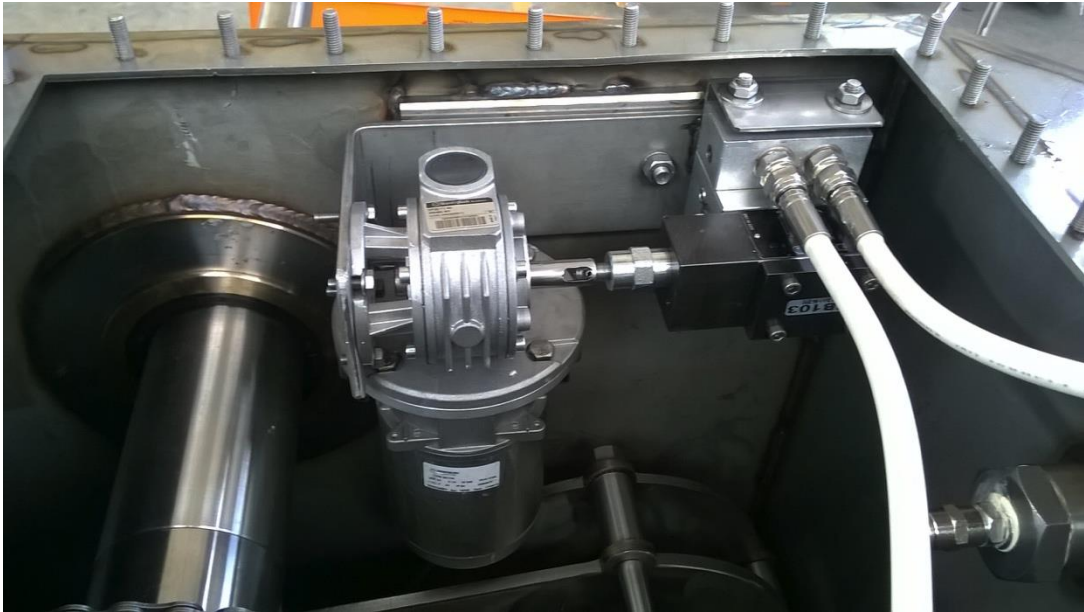


Figura 4.19 Nella foto si vedono il motore DC Bonfiglioli e la valvola che regola la pressione del circuito

4.3.4 Sistema di controllo del braccio di posizionamento

Il braccio meccanico che regola la profondità del Seaspoon rispetto alla superficie del mare, come si evince dai disegni costruttivi della sezione precedente, è costituito da due moduli paralleli incernierati sul collare di sostegno che lega l'intera struttura alla meda.

Il movimento del braccio è comandato da un pistone con allungamento massimo di circa 70 centimetri collegato ad una centralina idraulica per applicazioni marine prodotta dalla Oildyne serie 108 alimentata a 12V con assorbimento di picco di circa 200W durante la movimentazione. L'azionamento della centralina, visibile nella Figura 4.21, e quindi la movimentazione del braccio è controllata tramite interfaccia web. Il feedback sulla posizione del Seaspoon rispetto al livello del mare viene ottenuto mediante la lettura dell'estensimetro ed in maniera qualitativa dalle immagini della telecamera.

In Figura 4.20 sono mostrate alcune immagini relative alle prove a banco del sistema di azionamento del braccio meccanico. Nella prima foto sono mostrate le componenti del braccio non ancora assemblate insieme, nelle rimanenti è mostrato il prototipo del Seaspoon in una configurazione di test, senza le pale e con i vari componenti idraulici e elettronici non ancora cablati.



Figura 4.20 - Dettagli del braccio meccanico e del sistema di movimentazione, in rosso la centralina di azionamento del braccio meccanico



Figura 4.21 Centralina di azionamento del braccio meccanico

4.3.5 Scheda a microcontrollore

Il sistema di controllo del Seaspoon si basa su una scheda a microcontrollore.

La scheda permette l'acquisizione dei dati dei sensori on-board, la trasmissione degli stessi ad un server esterno e la gestione dei controlli e della sensoristica in tempo reale.

I dati acquisiti dai sensori a bordo e da quelli sulla meda vengono trasmessi a terra tramite un ponte wireless a 5GHz realizzato con una coppia di antenne hyperlan.

L'alimentazione di tutto il sistema di posizionamento e controllo avviene tramite batterie un impianto fotovoltaico dimensionato ad hoc, costituito da una batteria AGM 12V da 55Ah ricaricata da una coppia di pannelli fotovoltaici da 80W ciascuno montati sulla parete esterna rivolta verso sud del cestello della meda marina.

In questo modo il sistema è totalmente autonomo dal punto di vista energetico e pertanto in grado di fornire dati per la campagna di test in mare.

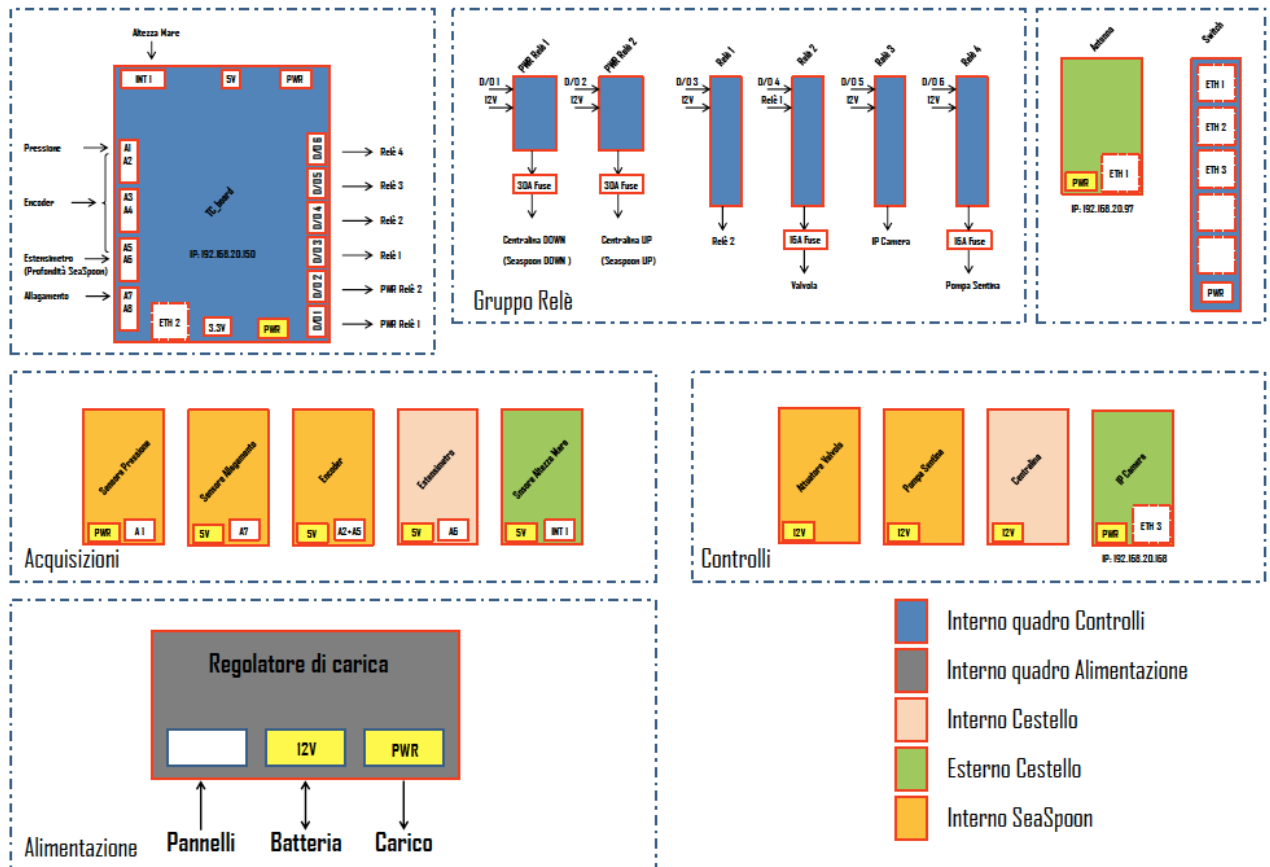


Figura 4.22 Schema generale di funzionamento del sistema di controllo del Seaspoon

La scheda si basa su un microcontrollore ATMEGA2560, prodotto dalla Atmel. Il microcontrollore dispone di una memoria Flash onboard di 256kB destinata ad ospitare il firmware, una memoria Ram da 8kB ed una EEPROM da 4kB. Si tratta di un microcontrollore dai consumi contenuti, pertanto ideale per sistemi di monitoraggio off grid.

Nel dettaglio le caratteristiche principali del microcontrollore sono le seguenti:

- Memoria flash 256kB
- Memoria Ram 8kB
- Memoria EEPROM 4kB
- Max I/O pins 84
- Controllo Bus I2C
- UART
- Controllo Bus SPI
- 16 Canali ADC
- Risoluzione canali ADC 10bits
- Temperatura di funzionamento -40/+85°C
- Tensione di alimentazione 1.5/3.3V

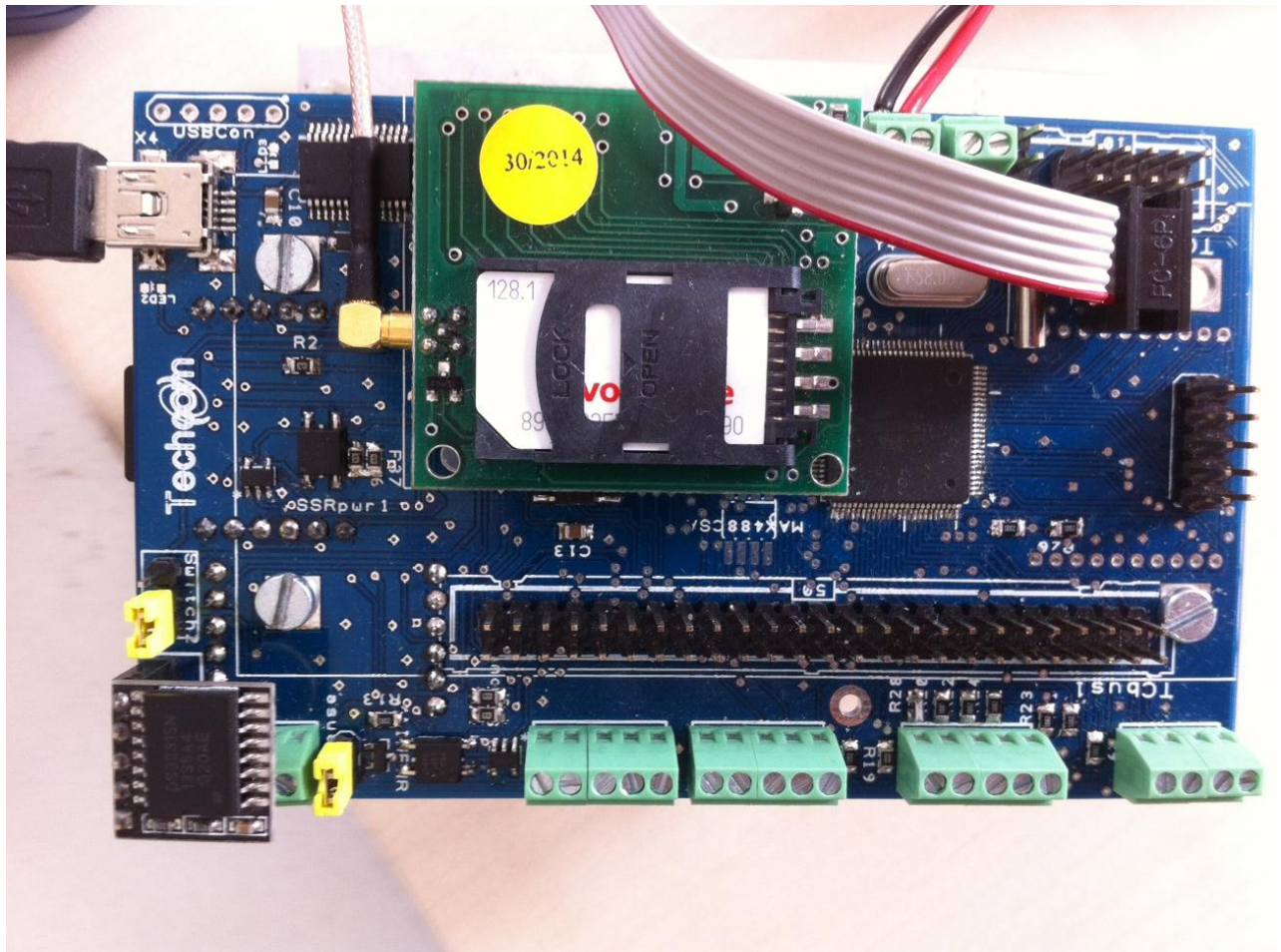


Figura 4.23 Scheda di controllo durante la fase di test in laboratorio

I consumi della scheda sono legati all'attività del microcontrollore e pertanto dipendono strettamente dalle scelte fatte in sede di programmazione del firmware.

La figura seguente riporta uno schematico a blocchi completo dei moduli presenti sulla scheda e quella successiva illustra un dettaglio delle connessioni ai pin del microcontrollore.

- Schematizzando il sistema realizzato permette la gestione dei seguenti moduli:
- Interfacce seriali RS422 e RS232 per la comunicazione, la programmazione e l'interfacciamento con sensori esterni.
- Interfaccia ethernet per la comunicazione
- Interfaccia modem (inserita ma non utilizzata alla fine a favore di quella ethernet)
- Interfaccia ISP o JTAG per la programmazione
- Modulo radio per moduli esterni tipo Zigbee (non utilizzato nel progetto)
- Modulo μ SD per aumentare lo spazio di archiviazione in locale
- Modulo LCD per connettere uno schermo utile per attività di debug
- Bus dedicato (TC_Bus1 e TC_Bus2) di espansione per remotizzare canali ADC, canali digitali e bus su schede "slave"

Oltre alla scheda principale è stata progettata e realizzata anche una scheda secondaria con la funzione di condizionamento dei segnali acquisiti dai sensori e di controllo delle linee di potenza. La presenza di “Jumper” sulla scheda, visibili in foto, servono per conferirle massima elasticità nell’acquisizione di segnali analogici.

4.3.6 Sistema di Telecomunicazione

In sede di progettazione del sistema di telecomunicazione per la postazione Seaspoon è stato necessario tenere in considerazione alcuni requisiti fondamentali tra cui:

- Mantenere contenuti i consumi energetici
- Avere larghezza di banda sufficiente per ricevere le immagini della telecamera ed i dati dei numerosi sensori in tempo reale
- Avere un canale sempre disponibile per attività di monitoraggio real time
- Avere la possibilità di intervenire tempestivamente sui controlli di posizione della turbina in caso di problemi

Tenendo conto di tutti questi fattori si è optato per un sistema di comunicazione wireless punto-punto, realizzato con una coppia di antenne Hyperlan prodotte dalla Ubiquiti. La scelta è caduta sulle antenne della serie Nanostation M ed in particolare sul modello Loco M5 con guadagno di circa 13 dBi.

Questa coppia di antenne sfrutta la tecnologia AirMax, lavora ad una frequenza di 5GHz e permette in generale di costruire ponti radio fino ad una distanza massima di 10km. La distanza reale tra la postazione Seaspoon in mare e la postazione ricevente a terra è di circa 2 km, rientrando ampiamente nel campo di funzionamento delle antenne, anche tenendo conto della perdita di qualità del segnale legata al fatto che la coppia di antenne lavora a soli 5 metri da terra o dalla superficie marina. Come si vede nell’immagine seguente durante i test di comunicazione effettuati preventivamente all’installazione definitiva si è arrivati ad una potenza di segnale di -75dbm ad una distanza di circa 1.6 miglia.

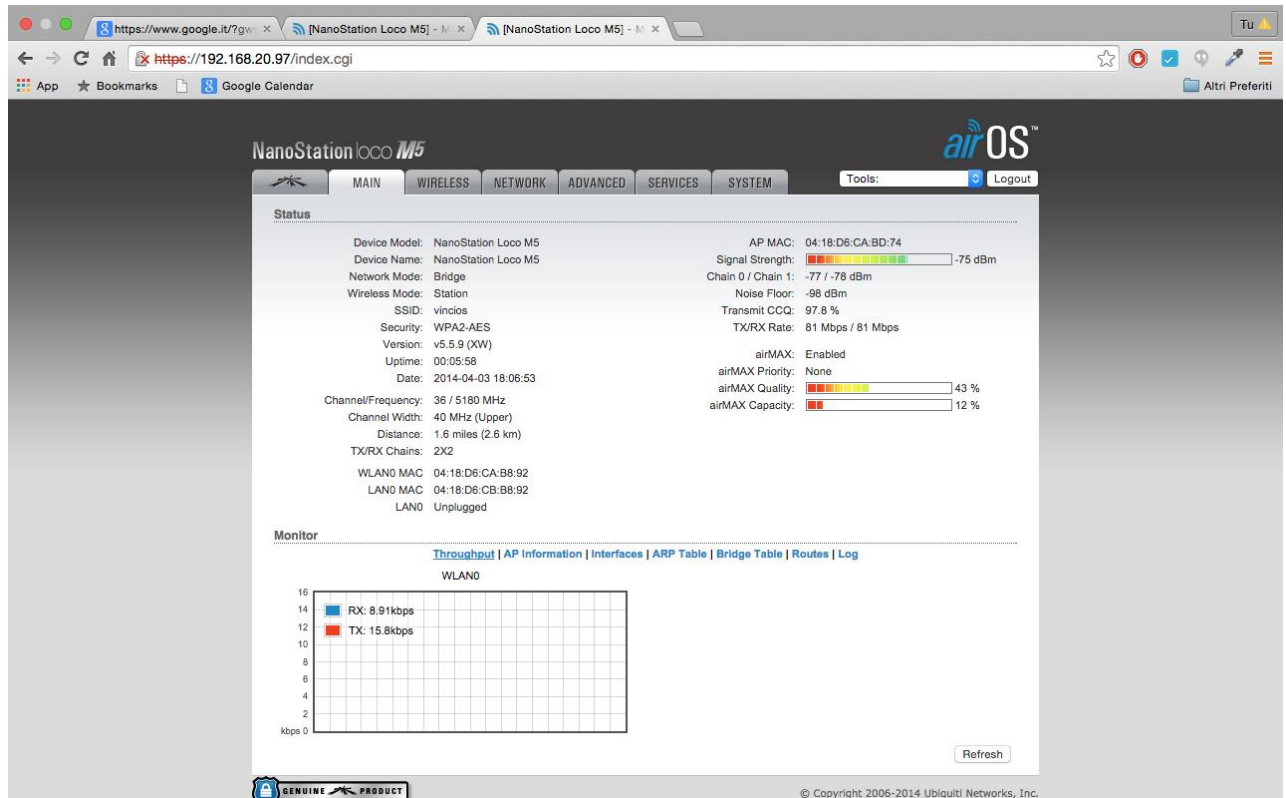


Figura 4.24 Screenshot relativo al test di comunicazione antenne wireless

Il consumo energetico dell'antenna lato Seaspoon anche in condizioni di massima potenza non supera i 5w rendendone l'utilizzo sostenibile anche con alimentazione a batteria e pannelli fotovoltaici. Le antenne sono dotate di interfaccia ethernet pertanto lato Seaspoon saranno collegate allo switch industriale posto dentro al quadro di controllo mentre lato terra saranno direttamente collegate ad un router ADSL.



Figura 4.25 Antenna Ubiquiti Nanostation M5



Figura 4.26 Posizionamento Seaspoon, Base a terra e collegamento punto-punto

4.4 Architettura software del sistema di monitoraggio e controllo

Questo paragrafo analizza l'architettura software del sistema di controllo mediante il modello **4+1 architectural view model** [15].

4.4.1 UML Use Case Diagram

In questo paragrafo verranno analizzate le funzionalità che il sistema fornisce agli utenti finali, in questo caso i ricercatori coinvolti nel progetto. Questo verrà descritto attraverso gli Use Case Diagram (UCD o diagrammi dei casi d'uso), diagrammi dedicati alla descrizione delle funzioni o servizi offerti da un sistema, così come sono percepiti e utilizzati dagli attori che interagiscono col sistema stesso.

Gli attori coinvolti nel sistema, cioè le entità che interagiscono con la scheda a microcontrollore e il relativo firmware, sono il ricercatore che monitora e controlla il Seaspoon, il Seaspoon stesso e il server FTP su cui vengono caricati i file storici.

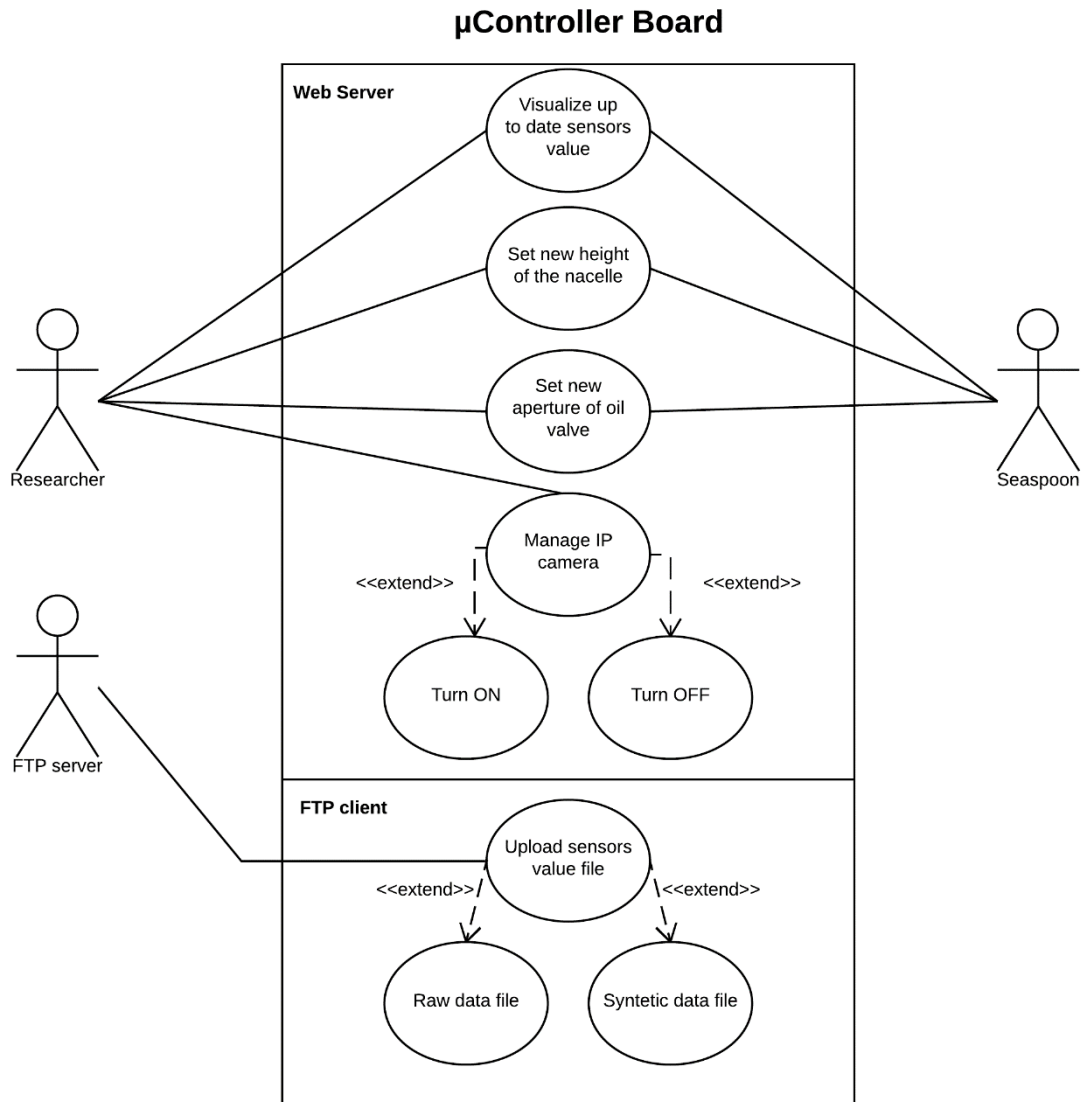


Figura 4.27 Use case Seaspoon

Come si può vedere in Figura 4.27 la scheda a microcontrollore fornisce due servizi concorrenti e distinti: un Web Server e un client FTP.

Il Web Server consente il controllo remoto del Seaspoon fornendo diverse funzionalità di monitoraggio e controllo fra cui la visualizzazione delle misure rilevate dai vari sensori (aggiornate con una frequenza di 10 Hz), il controllo dell'altezza della navicella e dell'apertura e chiusura della valvola del circuito ad olio. Inoltre consente l'accensione e spegnimento della telecamera IP, le cui immagini sono visibili attraverso il software proprietario del produttore.

Seaspoon' monitoring and control

Sensors	Controls
Posizione angolare SP: 37 °	Profondità SP
Velocità angolare SP: 2.1 rad/sec	New Set Point
Profondità SP: -0.4 m	Pressione circuito
Pressione circuito idraulico: 22.3 bar	New Set Point

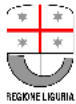




Figura 4.28 Screenshot seaspoon's webserver

In Figura 4.28 è mostrato lo screenshot della pagina AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) relativa al web server. In alto a destra del box **Controls** è visibile lo switch per l'accensione e spegnimento dell'IP camera (nel momento in cui è stato fatto lo screenshot l'IP camera era accesa).

L'FTP client, in maniera concorrente al webserver, carica due diversi tipi di file sul server FTP:

- raw data file
- synthetic data file

Il *raw data file* contiene le misure dei dati provenienti da un sottogruppo di sensori. I seguenti sensori sono campionati a 5 Hz e i relativi campioni si trovano nel *raw data file*:

- pressione circuito ad olio
- sensore di posizione
- sensore altezza onda

La potenza istantanea del Seaspoon viene ricavata grazie alle misure provenienti dai primi due sensori con l'ausilio di modello matematico sviluppato ad hoc [8]. Il sensore di altezza onda serve per correlare la potenza del Seaspoon con lo stato del mare.

Il *synthetic data file*, al contrario, riporta i dati di tutti i sensori installati. Le misure però non sono puntuali, ma rappresentative di un periodo di 10 minuti. Le misure riportate sono: numero di rotazioni delle pale del Seaspoon intorno al proprio asse principale, periodo e altezza media delle onde, livello allagamento cestello e mediana pressione olio,

I dati dei diversi *synthetic data file* sono visualizzabili attraverso il portale web denominato Jeb e sviluppato da Techcom srl. Questo portale consente di visualizzare i dati storici dei *synthetic data file* attraverso grafici e tabelle; consentendo di scegliere il periodo di interesse.

I files vengono caricati sul server FTP ogni 10 minuti, più precisamente allo 0°, 10°, 20°, 30° 40° e 50° minuto di ogni ora.

4.4.2 Deployment view

In questo paragrafo verranno mostrati i diversi componenti hardware del sistema di monitoraggio e controllo, insieme alle loro interconnessioni.

Come si può vedere in Figura 4.29 il sistema è fisicamente e logicamente diviso in due sottosistemi: la scheda elettronica e il Seaspoon, o più precisamente la sensoristica on board del Seaspoon. Oltre a questi due sottosistemi troviamo la sensoristica in superficie e tutti gli apparati di rete che consentono la connessione IP della scheda.

Il nucleo della scheda elettronica è il microcontrollore a 8 bit ATMEGA2560 di Atmel. Questo è connesso attraverso SPI (Serial Peripheral Interface) al chip W5200, un controller ethernet integrato che implementa lo stack TCP/IP. Grazie al chip W5200, anche un microcontrollore con una limitata potenza di calcolo come l'ATMEGA2560 può connettersi a reti LAN o WAN utilizzando i più diffusi protocolli di rete come TCP/IP, UDP, FTP etc.

Il protocollo I²C (Inter Integrated Circuit) connette un Real Time Clock, precisamente il circuito integrato DS3231 all'ATMEGA2560. Questo circuito integrato fornisce al microcontrollore un timekeeping autonomo, funzionante anche in caso di mancanza di alimentazione, in quanto dotato di batteria tampone.

Ultimo componente fondamentale, è lo slot μ SD, anch'esso interfacciato tramite SPI.

La velocità di rotazione del motore DC, calettato sulla valvola che regola la pressione del circuito, è controllata dalla scheda a μ C attraverso un segnale digitale modulato in ampiezza (PWM), la direzione invece è regolata da un H-Bridge comandato da tre segnali digitali secondo questa tabella della verità:

Tabella 4-1 Tabella della verità H-Bridge

EN	1A	2A	FUNCTION
H	L	H	Rotazione oraria
H	H	L	Rotazione antioraria
H	L	L	Non consentita
H	H	H	Non consentita
L	X	X	Nessuna rotazione

L'IP camera è connessa sia allo switch ethernet che al microcontrollore. Il microcontrollore, attraverso un'uscita in tensione, comanda un relè che a sua volta è connesso all'IP camera, consentendone l'accensione e lo spegnimento.

L'accesso a internet è consentito grazie alla coppia di antenne WiMax, una collegata allo switch ethernet a cui sono connessi la scheda elettronica e l'IP camera, l'altra, sulla terraferma, connessa a un router a sua volta connesso a Internet.

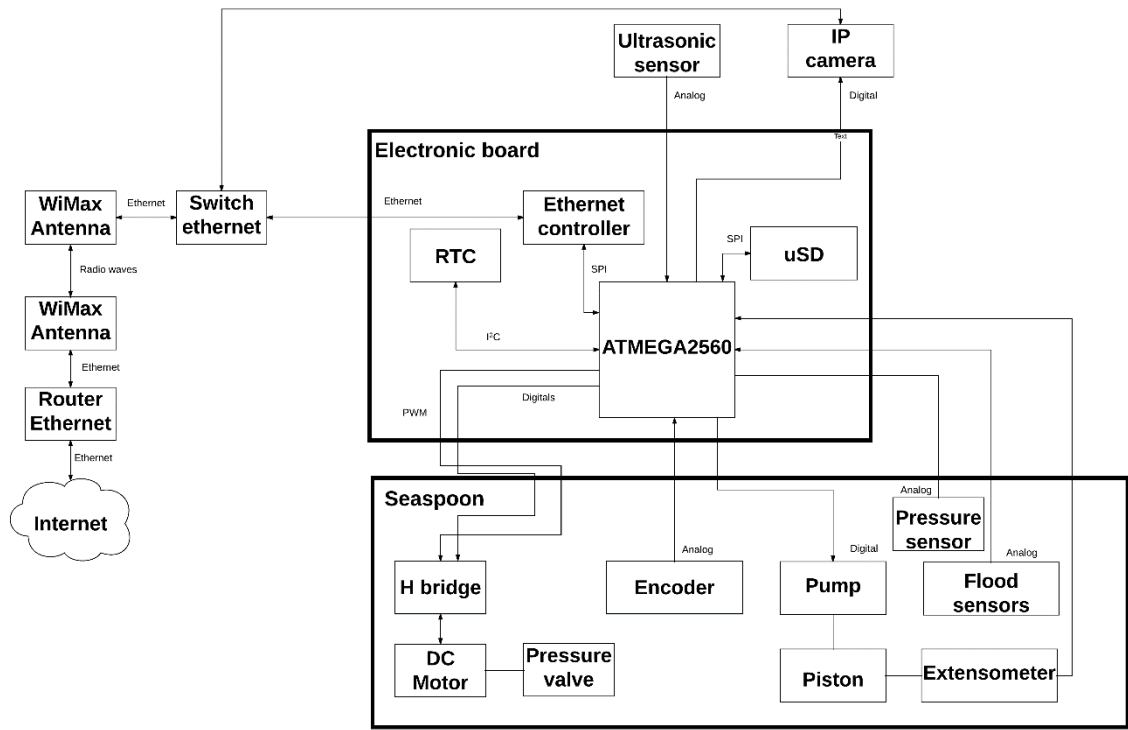


Figura 4.29 Deployment view del sistema di monitoraggio e controllo

4.4.3 Logical view

La vista logica riguarda la funzionalità che il sistema fornisce agli sviluppatori che collaborano al progetto. I diagrammi UML utilizzati per rappresentare la vista logica includono diagrammi di classe e diagrammi di stato.

Le classi implementate per la gestione e l'upload dei file sono cinque.

Due di queste costituiscono una semplice interfaccia con gli apparati di rete, siano essi modem GPRS o ethernet.

La classe Ethernet dispone di due metodi pubblici:

- uploadFTP
- sendNTPpacket

Il primo metodo gestisce l'upload dei due tipi diversi di file, mentre sendNTPpacket consente di ricevere tramite il protocollo di Network Time Protocol (NTP) di ricevere l'ora esatta in modo da sincronizzare l'RTC della scheda a intervalli prefissati. La classe è inoltre amica delle classi Ethernet e IPAddress sviluppate al di fuori del progetto in un contesto Open Source.

La classe TimeManager consente l'interfaccia con il Real Time Clock (RTC) ds3231:

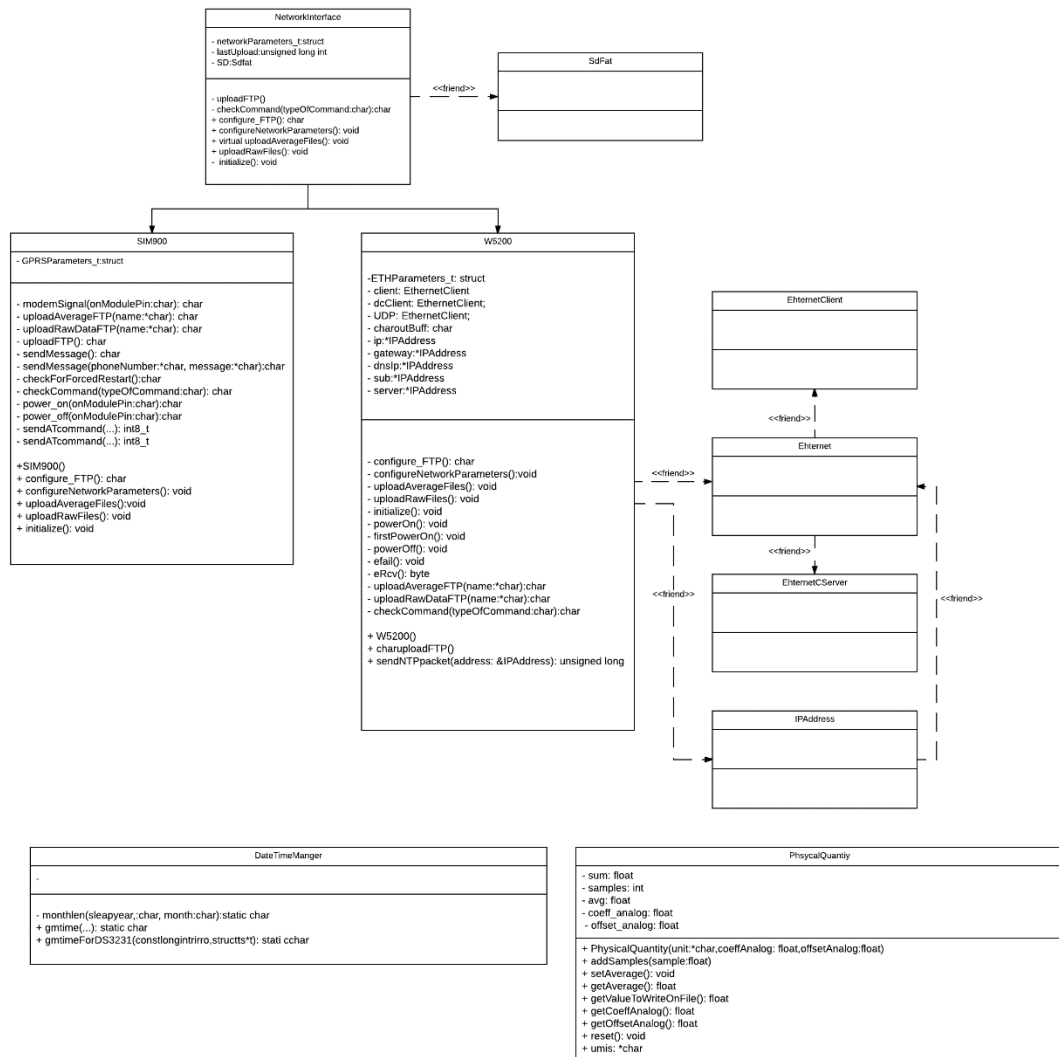


Figura 4.30 Diagramma delle classi relativo al firmware

Per quanto riguarda la logica del firmware, in Figura 4.31, è mostrato il diagramma degli stati del *main process*. Successivamente all'inizializzazione del watchdog, degli interrupts, delle periferiche, del Wiznet 5200 e della micro SD, il firmware entra in un loop infinito che serve le richieste di connessioni al web server e l'upload dei file tramite FTP. In caso di deadlock, segmentation fault o molto più genericamente *freezing* del loop, il watchdog resetta il microcontrollore.

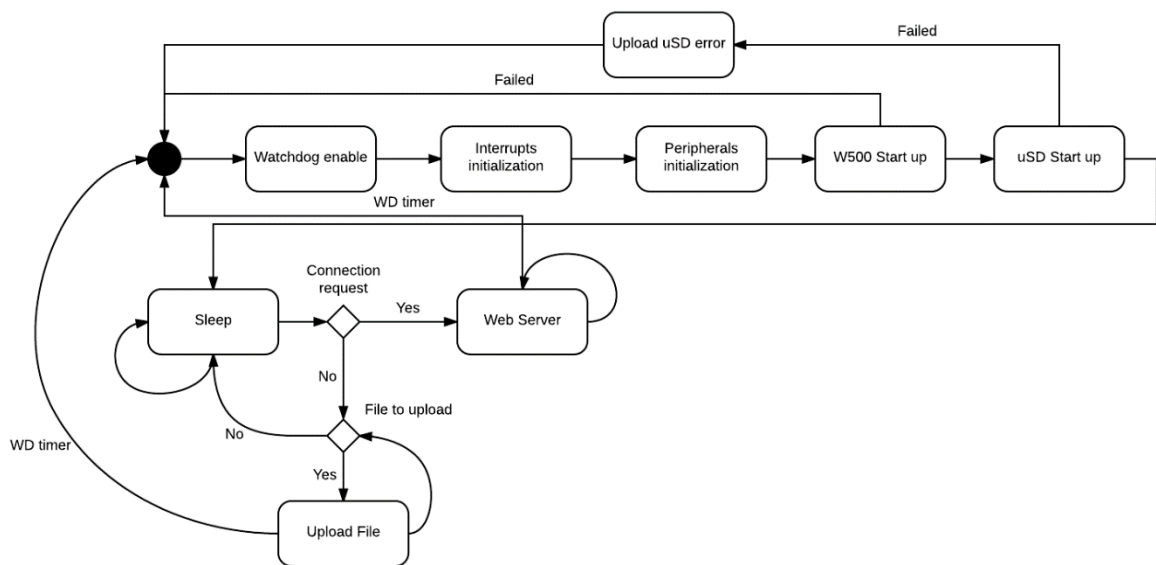


Figura 4.31 Diagramma degli stati del processo principale

Altri processi e interrupt handler svolgono le seguenti funzioni:

- campionamento sensori
- controllo ciclo chiuso attuatori
- salvataggio dei campioni su uSD
- timekeeping

Questi processi e interrupt handler comunicano con il processo principale tramite variabili statiche condivise.

4.4.4 Process view

È composto principalmente da diversi processi concorrenti e cooperanti:

- processo principale
- processo controllo motore elettrico
- processo controllo altezza del Seaspoon
- processo campionamento sensore altezza onde

4.4.4.1 Processo principale

Il *processo principale*, con una frequenza massima di 20 Hz, gestisce il web server e, consequenzialmente, salva i dati di misura su μ SD, procedendo anche al trasferimento degli stessi, tramite protocollo FTP, al server di archiviazione e visualizzazione dati.

Il web server è sviluppato in HTML/CSS/AJAX, quest'ultimo è l'acronimo di Asynchronous JavaScript and XML, ed è una tecnica di sviluppo software per la realizzazione di applicazioni web interattive (Rich Internet Application). Lo sviluppo di applicazioni HTML con AJAX si basa su uno scambio di dati in background fra web browser e server, che consente l'aggiornamento dinamico di una pagina web senza esplicito ricaricamento da parte dell'utente. Funzione, quest'ultima,

fondamentale, in quanto i dati relativi ai sensori vengono inviati al client con una frequenza di 10 Hz.

Il codice HTML/CSS/AJAX è salvato su μ SD, e inviato tramite Ethernet al client, di seguito un flow chart:

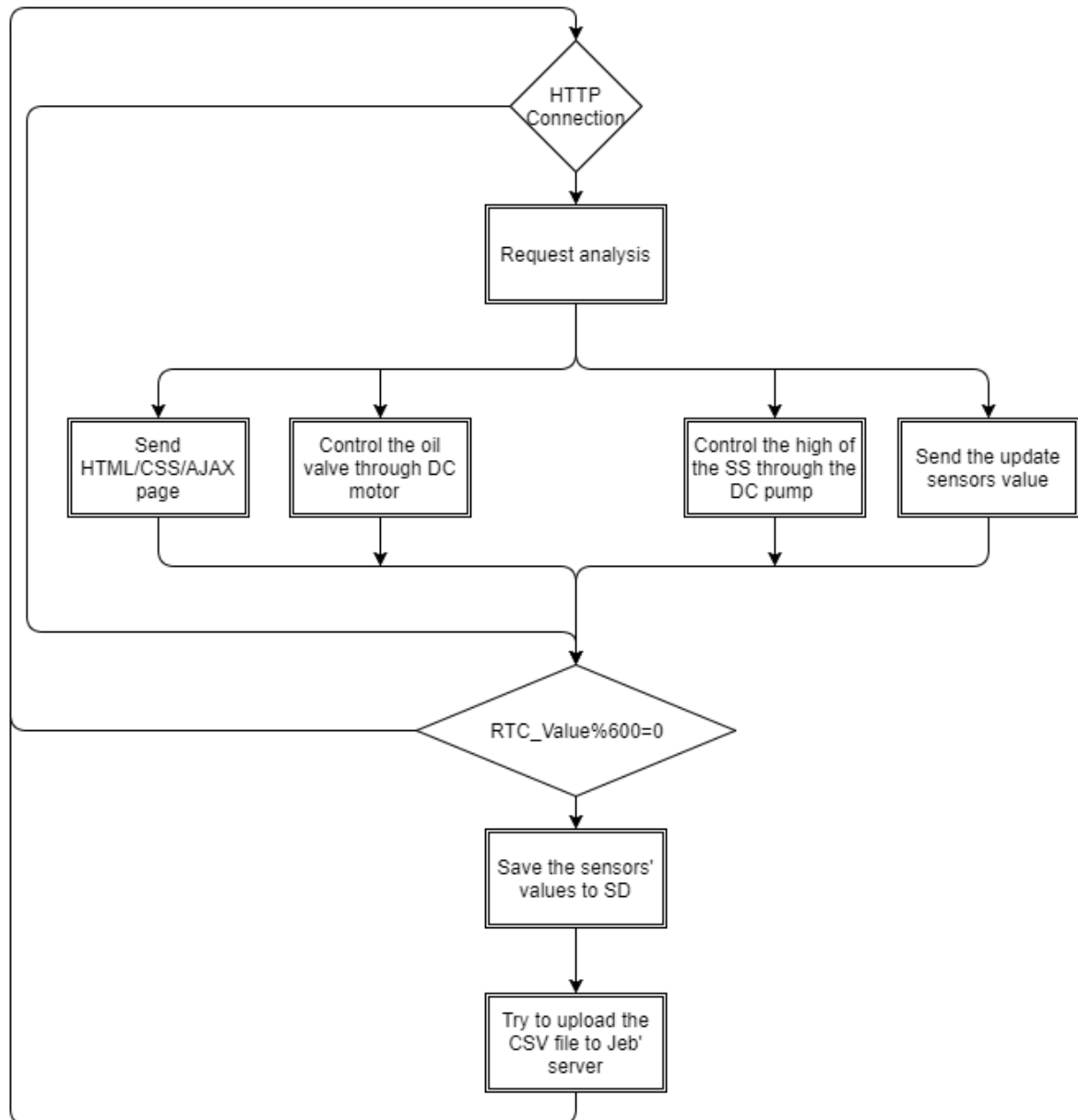


Figura 4.32 Flow chart relativo al processo principale

In Figura 4.32 è riportato il flow chart sintetico del *processo principale*, questo processo monitora la porta 80 in attesa di una richiesta http, in caso di esito positivo, la analizza e attua le relative procedure per soddisfarla. La richiesta può consistere in una HTTP request, in questo caso la pagina HTML/CSS/AJAX viene letta dalla μ SD e inviata al client. Diversamente, la richiesta potrebbe essere o una richiesta di attuazione di uno dei due controlli o una richiesta di aggiornamento dei valori misurati (il client invia questa richiesta in maniera automatica, senza l'intervento dell'utente). Servite queste richieste il processo controlla che l'attuale UNIX time (secondi passati dal 1° Gennaio

1970) sia divisibile per 600, nel qual caso salva i dati registrati nei 10 minuti precedenti, in due differenti file, uno riassuntivo del periodo trascorso ed uno con i dati grezzi con tempo di campionamento 10 Hz. Successivamente i due file vengono trasferiti tramite protocollo FTP, al server di visualizzazione, se il processo va a buon fine i file vengono cancellati, altrimenti no, in modo tale che siano presenti per il successivo tentativo.

4.5 Installazione in mare aperto

Il Seaspoon è stato installato in mare aperto nel settembre 2015, a circa 1,6 km dalla costa di Genova: le operazioni sono consistite nell'installazione di una meda elastica e del relativo sistema di ancoraggio del Seaspoon alla meda stessa. La meda elastica è stata fissata sul fondo del mare grazie all'utilizzo di una nave dotata di verricello e un sistema di pulegge. Tutte le operazioni sono state condotte da subacquei qualificati che hanno lavorato a 36 m di profondità. Successivamente, il Seaspoon è stato fissato alla meda elastica tramite due flange. Le movimentazioni in acqua del Seaspoon sono state possibile grazie all'utilizzo di un pallone ad aria. Tutte queste operazioni sono schematicamente rappresentate in Figura 4.33

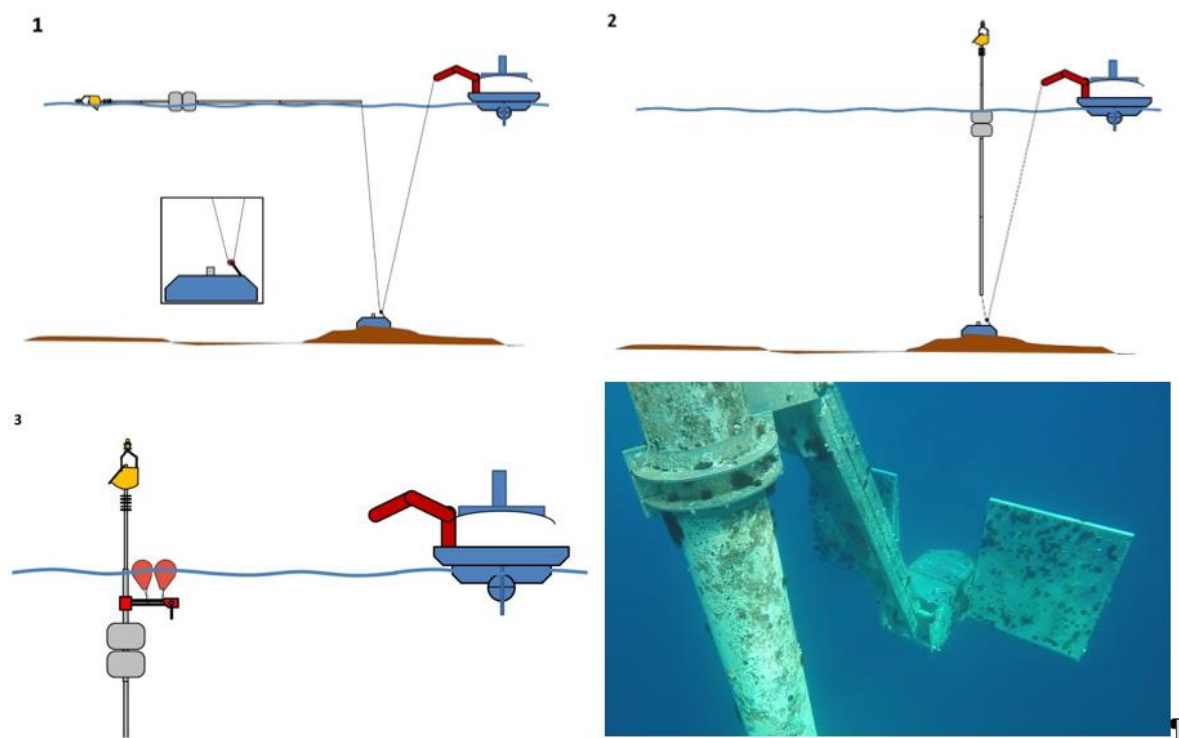


Figura 4.33 Le fasi di installazione in mare aperto del Seaspoon (1-3) e una fotografia dell'installazione reale

4.6 Analisi dati campagna sperimentale

Come ampiamente illustrato precedentemente, una volta che il prototipo è stato installato sulla meda elastica, le azioni di controllo e acquisizione dei dati sono state eseguite da remoto.

I dati acquisiti che consentono di analizzare le prestazioni di Seaspoon sono riassunti in questo paragrafo. La campagna sperimentale qui discussa è relativa al periodo da ottobre 2015 a gennaio 2016.

Considerando la frequenza di acquisizione dei dati a 5 Hz, un totale di $52 \cdot 10^6$ campioni sono stati analizzati.

Per descrivere con precisione le condizioni del mare, sono stati elaborati i dati provenienti dal sensore a ultrasuoni. L'altezza d'onda significativa e il suo periodo di picco sono stati ottenuti grazie alla Trasformata di Fourier veloce(FFT).

La Figura 4.34 riporta la distribuzione di frequenze dell'altezza d'onda relative sia all'intero periodo e sia al solo dicembre 2016, in base alla scala del mare di Douglas. Il 3 ° quartile del periodo complessivo è pari a 42,3 cm, mentre per dicembre è 114,9 cm, il più alto nei mesi considerati.

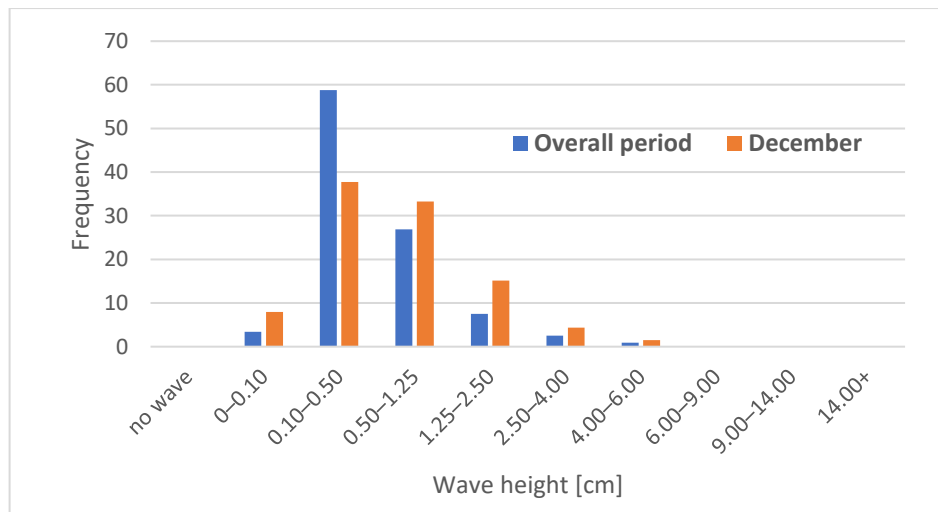


Figura 4.34 Distribuzione di frequenze relativa all'altezza dell'onda

La *scattered matrix* relativa all'occorrenza dei diversi tipi d'onda in funzione del loro periodo e altezza è riportata in Figura 4.35. L'81% delle onde ha un periodo compreso tra 2,5 secondi e 8,5 secondi e altezza inferiore a 1m (riquadro rosso).

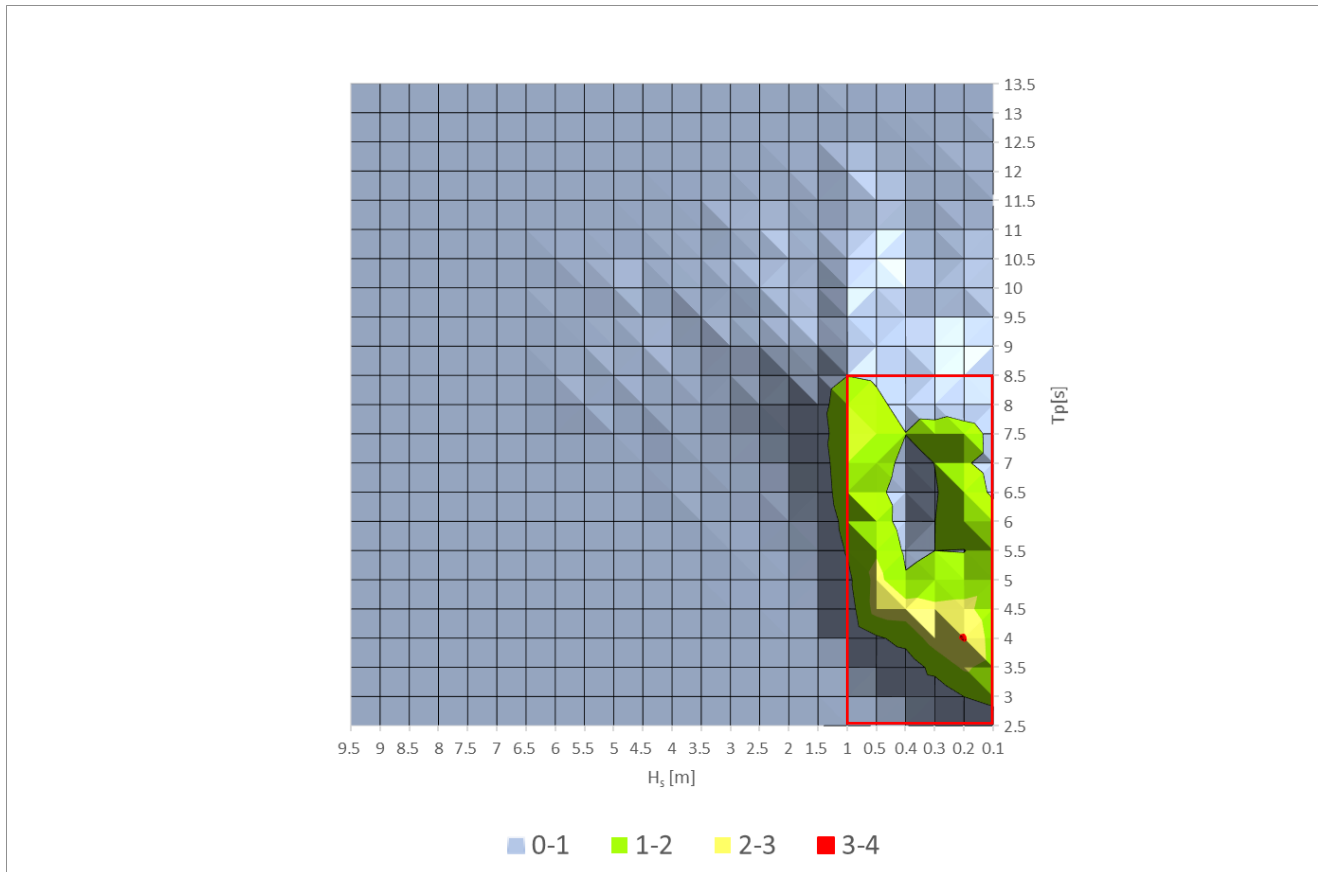


Figura 4.35 Distribuzione statistica dei diversi stati di mare da Ottobre 2015 a Gennaio 2016

Per quanto riguarda la potenza generata dal Seaspoon in funzione dell'altezza dell'onda, in Figura 4.36 è riportato il relativo grafico a dispersione. Questo grafico mostra il rapporto tra la potenza in uscita del Seaspoon e la potenza massima di Seaspoon registrata durante la campagna sperimentale (power ratio).

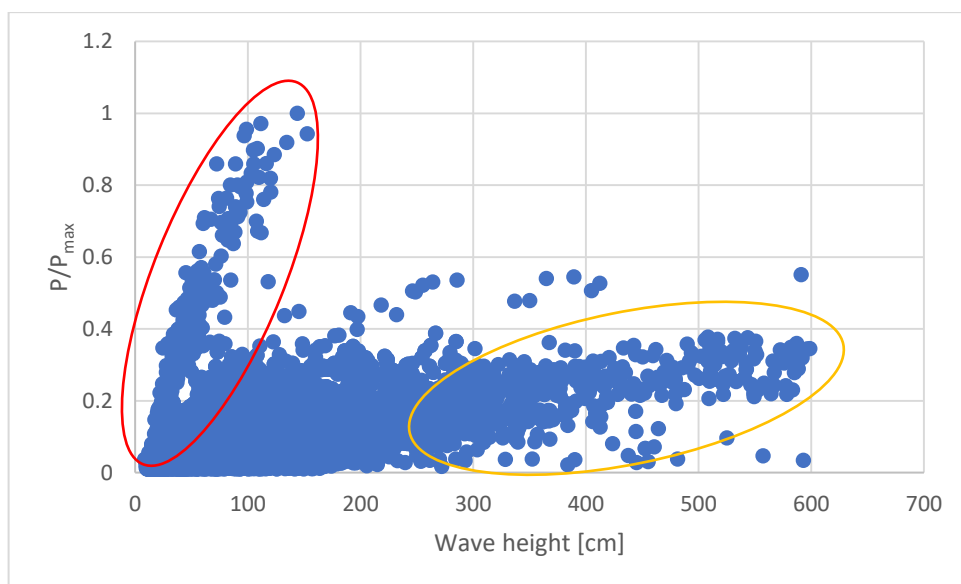


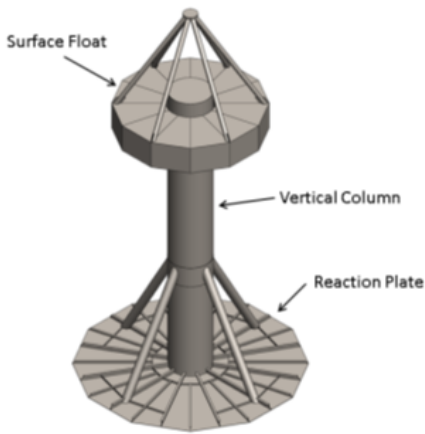
Figura 4.36 Produzione di potenza in funzione dell'altezza dell'onda

Complessivamente, esiste una moderata correlazione lineare tra la potenza in uscita del Seaspoon e l'altezza dell'onda, con un coefficiente di correlazione di Pearson pari a 0,55. La non forte potrebbe essere causata da fattori non considerati, ad esempio la presenza di correnti marine che agiscono come un rumore casuale (la corrente di mare non è stata misurata), ciò si riflette nel fatto che vi sono rapporti di potenza inferiori a 0,2 indipendentemente dall'altezza d'onda. Tuttavia, ci sono anche due cluster ben visibili, evidenziati in rosso e giallo. Il cluster rosso indica che nel caso in cui l'altezza dell'onda non superi i 2 m d'altezza esiste una forte correlazione lineare tra l'altezza d'onda e la produzione di energia, con il massimo globale in corrispondenza di 152 cm di altezza d'onda. Nel cluster evidenziato di giallo, non esiste una chiara correlazione tra altezza d'onda e produzione di energia, e la potenza è sempre inferiore al 40% della potenza massima.

Un'altra considerazione sul cluster giallo è legato alla potenza erogata dal Seaspoon, che rimane costantemente nell'intervallo del 20-40% della potenza nominale, indipendentemente dall'altezza delle onde. Questa è una caratteristica distintiva del Seaspoon, diverso dagli altri WEC, che tendono ad aumentare la potenza in uscita aumentando lo stato del mare [17]. Questo aspetto può rappresentare un duplice vantaggio per il Seaspoon: in primo luogo, la sollecitazione meccanica sull'albero non aumenta con lo stato del mare e, in secondo luogo, le sue prestazioni sono ottimali a stati marini moderati, ideali per le applicazioni di energy harvesting.

La potenza generata di altri WEC aumenta tipicamente con il contenuto energetico delle onde. A questo proposito, un confronto interessante può essere effettuato con un tipico WEC di tipo point absorber [18]. Il point absorber considerato è caratterizzato da un galleggiante superficiale che si traduce con un moto ondoso relativo a una boa verticale a colonna, che si collega a una piastra di reazione sotto la superficie, come mostrato in Figura 4.37, a sinistra.

Basandosi su [18], è stato condotto un confronto tra la potenza misurata del Seaspoon e la potenza potenzialmente prodotta dal generico point absorber, utilizzando gli stessi spettri d'onda misurati durante la campagna di test. L'indicatore utilizzato per confrontare i due dispositivi è il rapporto tra la potenza meccanica non dimensionale (P / P_{max}) estratta dal Seaspoon e la potenza non dimensionale dal generico point absorber (Figura 4.37, a destra). In Figura 4.37 a destra, i numeri più alti di uno denotano una maggiore produzione di energia del Seaspoon rispetto al point absorber. È chiaro che le prestazioni operative ottimali del Seaspoon vengono raggiunte in condizioni di mare poco mosso/mosso, dove mostra una capacità di produzione di energia superiore. Per altezze d'onda superiori a quelle di progetto, il generico point absorber mostra una maggiore produzione di energia. Pertanto, questo confronto conferma il netto vantaggio del Seaspoon per le applicazioni di energy harvesting, in condizioni di mare moderate.



Tp [s] Hs [m]							
	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5
0.25	12.60	16.80	31.50	16.80	7.35	7.35	5.25
0.75	12.60	7.82	5.73	5.08	2.63	1.91	1.98
1.25	3.33	3.23	2.37	1.85	1.58	1.09	1.26
1.75	2.33	2.52	1.10	1.05	0.81	1.13	-
2.25	1.25	1.28	1.06	0.75	0.52	0.58	-
2.75	-	0.87	0.43	0.68	0.37	0.55	-
3.25	-	0.63	0.42	0.50	0.36	0.35	-
3.75	-	0.57	0.40	0.38	0.38	0.35	-
4.25	-	-	0.31	0.30	0.31	0.31	-
4.75	-	-	0.25	-	0.28	0.28	-
5.25	-	-	0.25	-	0.23	0.24	-

Un indicatore qualitativo dell'operatività del Seaspoon è il rapporto tra le ore di funzionamento in cui il Seaspoon ha prodotto energia e le ore totali (Figura 4.38). Nonostante il dispositivo sperimentale sia in grado di produrre olio pressurizzato a portate massiche molto basse, è stato deciso di trascurare le ore in cui la potenza di Seaspoon è inferiore al 5%: tali ore sono state considerate come non operative. Il tempo operativo di Seaspoon viene confrontato con un pannello fotovoltaico (PV) ideale, durante lo stesso periodo e soggetto alle stesse condizioni meteorologiche. I dati di una stazione meteorologica, forniti da un sensore di radiazione solare di una stazione meteorologica collocata a pochi chilometri in linea d'aria dal Seaspoon [9], sono stati utilizzati per stimare le prestazioni del sistema fotovoltaico. L'impianto fotovoltaico è stato considerato funzionante ogni volta che la radiazione solare è superiore a 0 W/m². La Figura 4.36 mostra che, a parte ottobre, le ore operative del Seaspoon sono il doppio o triplo dell'orario operativo del PV, raggiungendo una media del 70% contro il 30%.

Figura 4.37 Point absorber generico (sinistra) e relativa comparazione con il Seaspoon (destra)

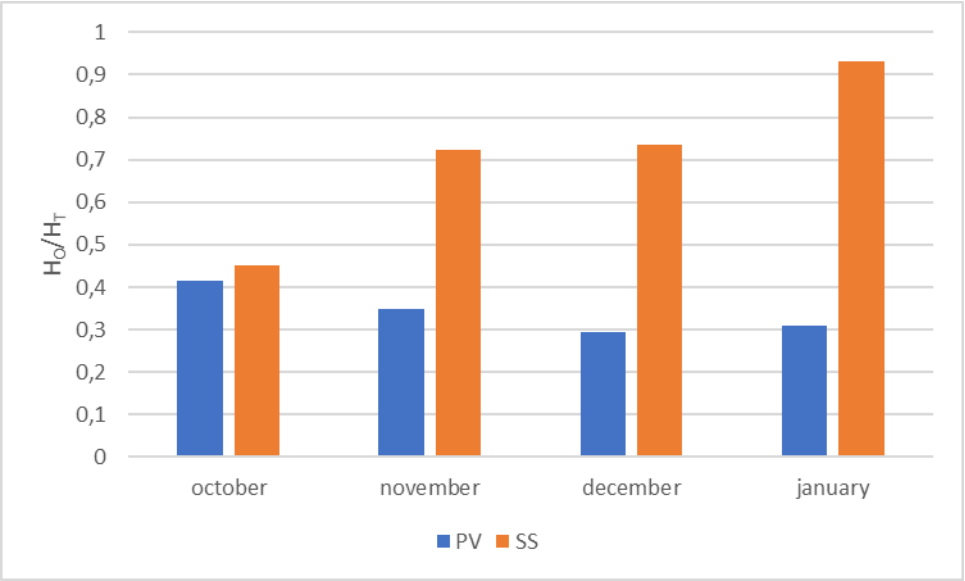


Figura 4.38 Confronto delle ore di funzionamento (rispetto alle ore totali) tra il Seaspoon e un PV ideale, durante la campagna di test

Per completezza, la Figura 4.39 mostra il fattore di utilizzo del Seaspoon e del sistema fotovoltaico durante la campagna di test. Il fattore di utilizzo è definito come il rapporto tra l'energia prodotta e l'energia che sarebbe stata prodotta se il sistema avesse funzionato in modo continuo al carico nominale. Sono preferibili fattori di utilizzo elevati, in quanto mostrano un buon sfruttamento delle capacità del sistema. Durante la campagna di test, la produzione di energia del Seaspoon è buona, mostrando fattori di utilizzo in media del 10%, contro valori inferiori al 4% per il fotovoltaico.

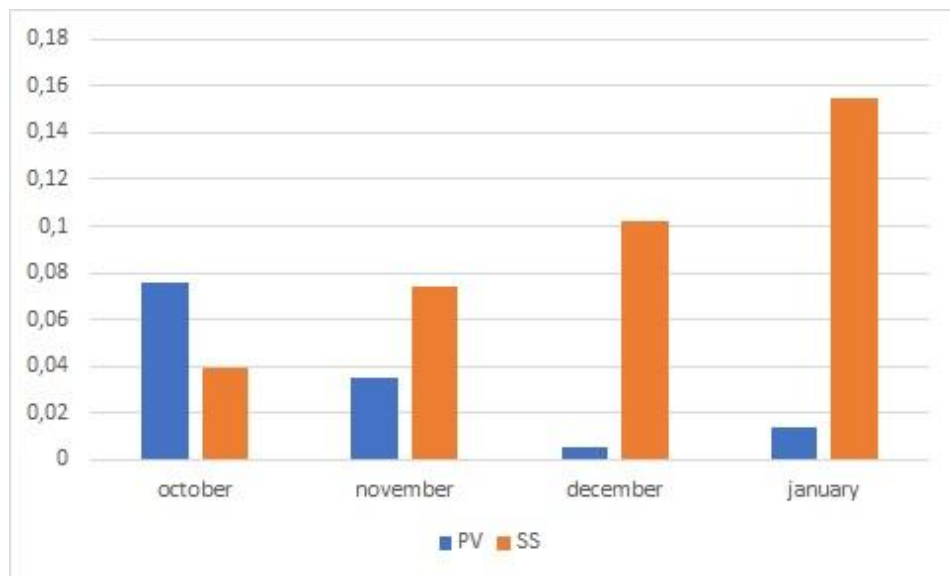


Figura 4.39 Confronto dei fattori d'utilizzo tra il Seaspoon e un PV durante la campagna di test

Un altro parametro interessante è la correlazione tra il movimento delle due pale e il movimento orbitale delle onde. Analizzando questo parametro è chiaro che le pale hanno avuto un problema di equilibratura: difatti, le due pale possedevano un assetto positiva in acqua, tendendo quindi al galleggiamento. La Figura 4.40 mostra la posizione sugli assi verticali delle pale del Seaspoon, ottenuta dai dati dell'encoder, insieme al segnale proveniente dalla misurazione dell'altezza delle onde. Come mostrato, le due pale non sono in grado di ottenere una rotazione completa, quindi il movimento registrato rappresenta solo una parte della traiettoria circolare, di circa 180° , considerando le pale in posizione ascendente a 1, in posizione discendente a -1 e parallelo agli assi x a 0. Tuttavia, è evidente che il sistema funziona in fase con le onde.

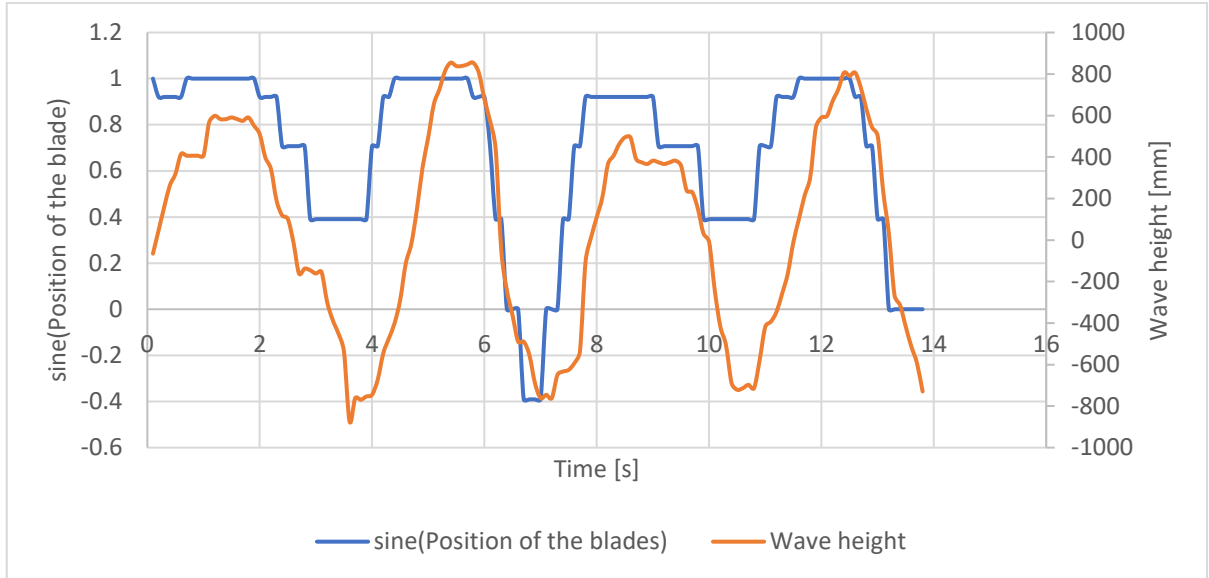


Figura 4.40 Comparazione fra posizione angolare e altezza onda

Un altro risultato interessante è stato la conferma del funzionamento passivo di auto-orientamento, rispetto al fronte d'onda in arrivo. È stato dimostrato che con onde di bassa altezza il Seaspoon giace in una posizione di equilibrio (Figura 4.41 a sinistra), che corrisponde alla direzione Nord-Est: questo è probabilmente dovuto alla non perfetta verticalità della meda elastica, che tende a piegare su un lato, a causa del peso del Seaspoon. D'altra parte, con mare grosso (Figura 4.41 a destra), il Seaspoon si allinea con la direzione di propagazione dell'onda; è stato osservato che la direzione dell'onda più frequente è la direzione Nord, con vento proveniente dal Sud-Ovest [20].

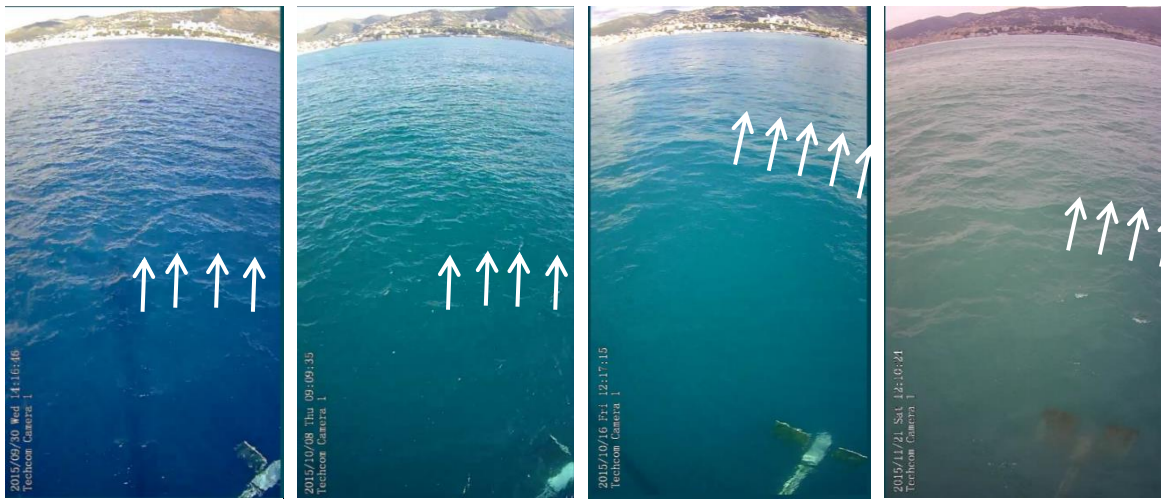


Figura 4.41 Immagini registrate dall'IP camera installata sul Seaspoon: le frecce indicano la propagazione del fronte d'onda. L'altezza delle onde aumenta da sinistra a destra

Nelle prime due immagini non ci sono onde significative (sotto i 30 cm), quindi il Seaspoon si trova nella sua posizione di equilibrio, quindi, come presentato nelle due immagini a destra, con onde significative (oltre 150 cm), il Seaspoon si avvicina nella stessa direzione della propagazione dell'onda.

Un parametro fondamentale per valutare le prestazioni di Seaspoon è l'efficienza, ovvero il rapporto tra la potenza generata dal Seaspoon e la potenza disponibile a onda [21]. La potenza disponibile, espressa in kW / m, è calcolata come:

$$P_{potential} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64 \pi}$$

Dove ρ è la densità dell'acqua, g è la gravità, H è l'altezza dell'onda e T è il periodo dell'onda.

Una semplice definizione di efficienza η , dove L_{wave} rappresenta il fronte d'onda effettivamente coinvolto, uguale alla larghezza del Seaspoon è la seguente:

$$\eta = \frac{P_{generated}}{P_{potential} \cdot L_{wave}} = \frac{\bar{p} \cdot \bar{Q}}{P_{potential} \cdot L_{wave}}$$

Dove $\bar{p}$ è la pressione media dell'olio e $\bar{Q}$ è la portata media dell'olio, entrambi considerando un ciclo d'onda.

L'efficienza raggiunge il massimo in condizioni di mare basso (intorno a 0,22m di altezza d'onda), dove il movimento di flapping è efficace nel catturare l'energia dell'onda. Prima, l'energia del moto ondoso non è sufficiente a consentire lo spostamento delle pale. Negli stati di altezza delle onde più alte, la riduzione dell'efficienza è probabilmente dovuta alla spinta positiva delle pale, che impedisce l'intera rotazione delle pale. Inoltre, la corrente dell'acqua di mare (non misurata) potrebbe anche influenzare la possibilità di raggiungere la piena rotazione, poiché si somma vettorialmente al moto orbitale.

In Figura 4.42 è riportato un grafico dell'efficienza adimensionale rispetto all'altezza dell'onda

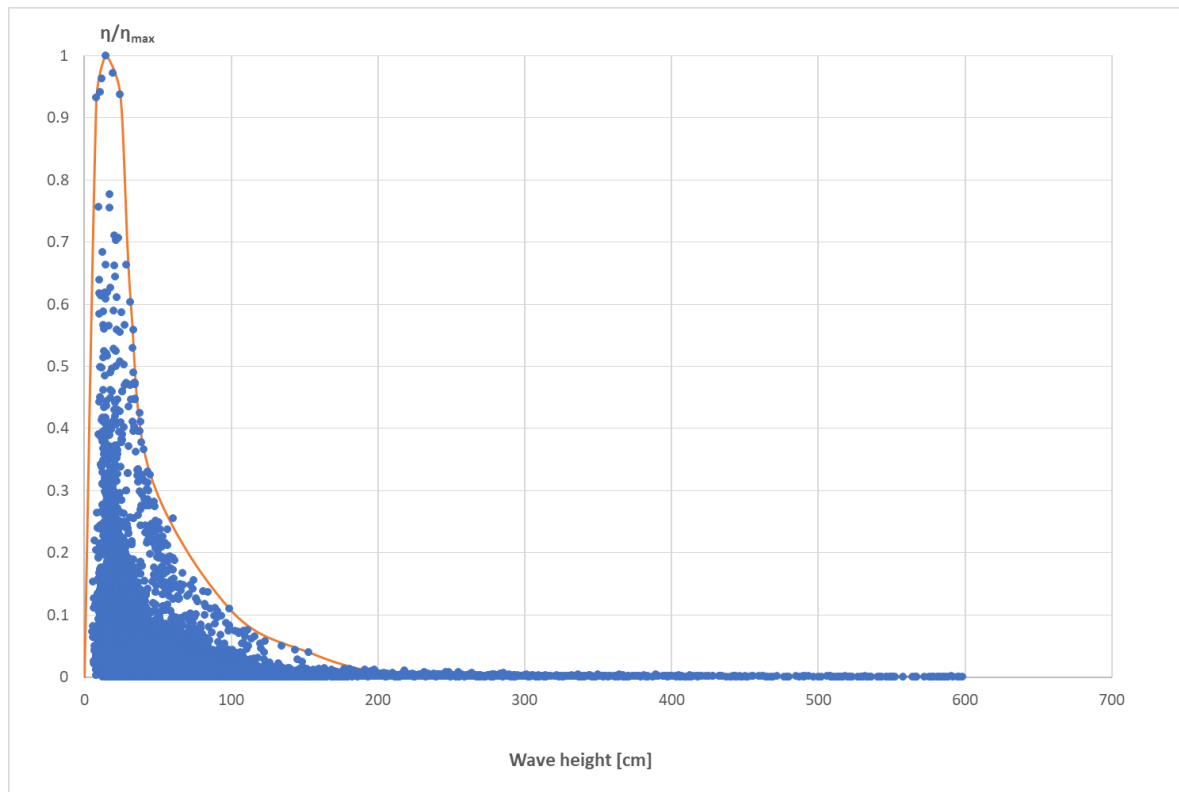


Figura 4.42 Efficienza in funzione dell'altezza d'onda

4.7 Conclusioni

È stato illustrato il sistema di monitoraggio e controllo di un WEC innovativo. Sono stati inoltre discussi i dati relativi alla campagna in mare aperto, iniziata nell'ottobre 2015 e terminata nel gennaio 2016, con l'obiettivo di valutare qualitativamente e quantitativamente le sue performance in condizioni meteomarine reali.

Il sistema di monitoraggio e controllo, lato firmware/software, è stato sviluppato ex-novo con l'obiettivo di avere un sistema resiliente. L'obiettivo è stato raggiunto in quanto il sistema è stato sempre raggiungibile da remoto, acquisendo e inviando i dati relativi ai vari sensori in continuo senza interruzione alcuna.

5 MONITORAGGIO E CONTROLLO DI LEVEL SET

In quest'ultimo capitolo viene descritto il sistema di monitoraggio, orientato al controllo, di un test rig innovativo, che verrà utilizzato per dimostrare le potenzialità di un controllore per i sistemi numerici "level set". Si tratta di un lavoro di ricerca di base, nel quale si è contribuito principalmente alla messa a punto del dimostratore sperimentale ed al suo sistema di acquisizione e monitoraggio dei dati. Il test rig per lo studio dei level set, o "fronti", è stato realizzato mediante l'ausilio di un ferro fluido immerso in soluzione trasparente, il tutto attuato tramite un campo magnetico variabile.

La scopo della realizzazione del test-rig e del relativo sistema di monitoraggio è la validazione del modello sviluppato in MATLAB che implementa l'algoritmo di controllo di level sets.

5.1 Introduzione

Un ferro fluido è una sospensione colloidale di particelle magnetiche in un liquido inerme.

Le dinamiche relative all'evoluzione della forma assunta dal ferrofluido dipendono a cascata dal campo magnetico e dalle equazioni di Navier-Stokes. La soluzione relativa al primo problema può essere affrontato analiticamente, questo non è possibile per quanto riguarda le equazioni di Navier-Stokes, che possono essere risolte numericamente.

La descrizione del moto dell'interfaccia tra l'acqua e il ferrofluido viene effettuata utilizzando i level set methods. I level set methods sono un metodo molto popolare per descrivere l'evoluzione di superfici e forme [22]. Nel caso specifico si vuole studiare l'evoluzione della superficie formata dal ferro fluido (di colore nero) sotto l'influenza di campi magnetici generati da elettrocalamite. Il ferro fluido è immerso in un liquido trasparente e immiscibile col ferro fluido stesso.

Consideriamo una frontiera, sia essa una curva chiusa in due dimensioni o una superficie in tre dimensioni, che separa una regione da un'altra. Ipotizziamo che questa curva/superficie si muova in una direzione normale a sé stessa con una funzione di velocità conosciuta F . L'obiettivo dei level set methods è tracciare il movimento di questa interfaccia (Figura 5.1).

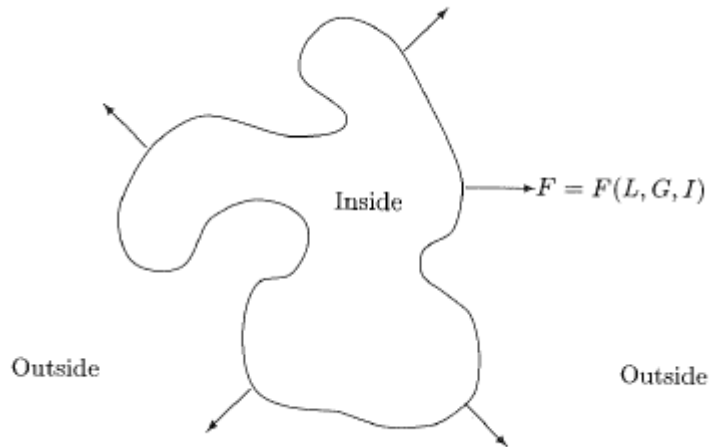


Figura 5.1 Propagazione di una curva data una funzione di velocità F , normale alla curva stessa [7]

Come illustrato in [7] una possibile soluzione al problema è quello di vincolare la propagazione dell'interfaccia (di n variabili) con l'evoluzione di una funzione Φ di $n+1$ variabili attraverso un problema ai valori iniziali tempo variante. Ad ogni istante, il fronte sarà dato dal set di livello zero della funzione tempo variante Φ (Figura 5.2). A titolo d'esempio dunque se si vuole studiare l'evoluzione di una curva in 2D, Φ sarà una superficie in 3D.

Le equazioni differenziali che descrivono il problema sono le seguenti:

$$\phi_t + F|\nabla\phi| = 0$$

$$\text{dato } \phi(x, t = 0)$$

Queste sono le equazioni di level set date da Oscher e Sethian [23]. Per certe forme di funzioni di velocità F si ottengono delle equazioni standard di Hamilton-Jacobi.

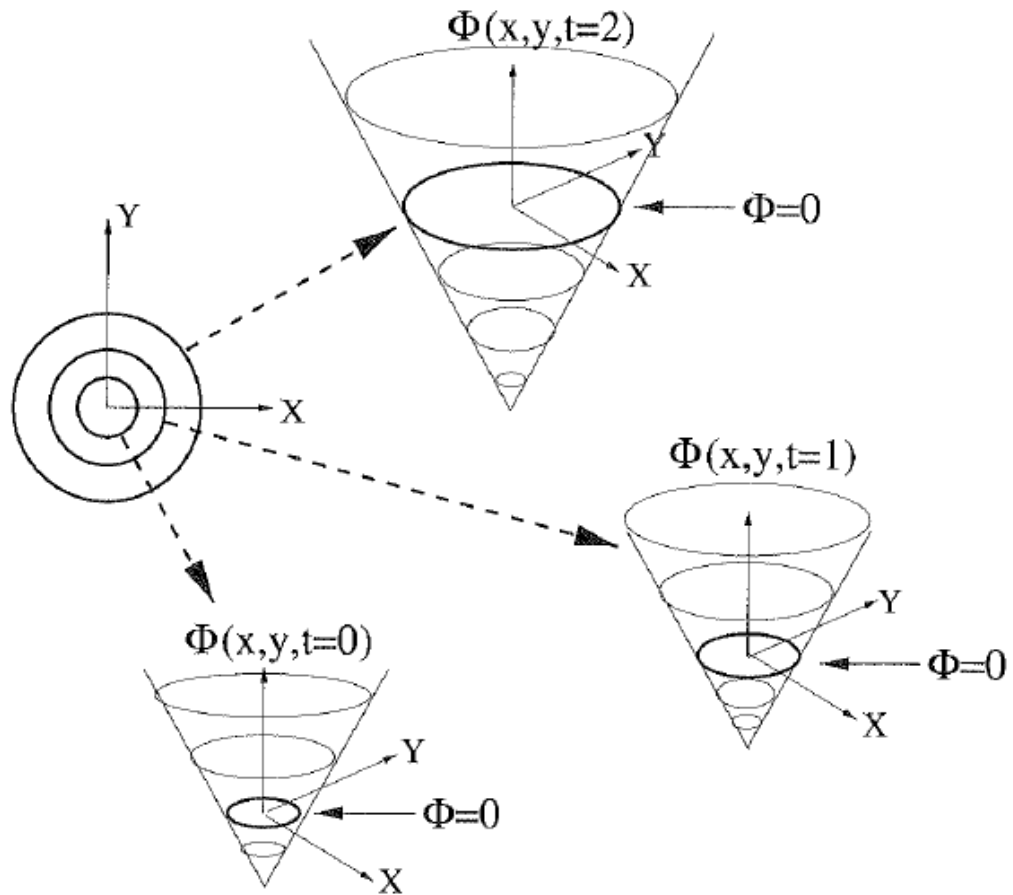


Figura 5.2 Trasformazione del moto di un fronte in un problema ai valori iniziali

Lo scopo del progetto chiamato “New Approach to the Optimal Control of Level Sets Generated by Partial Equations to Bridge the Gap Between Computational Mathematics and Control of Complex Systems” e finanziato dall’Air Force Office of Scientific Research è l’implementazione di un controllo ottimo di level sets.

Lo studio del moto di interfacce trovano applicazioni in molti campi, come fisica, chimica, fluidodinamica computazionale, e elaborazione delle immagini [22]. Nonostante questi metodi siano stati studiati estensivamente per simulare il movimento di interfacce, sono disponibili solo pochi risultati sulla possibilità di controllarli [23] [24]. La principale difficoltà nel controllare l'interfaccia tra due fluidi consiste nella necessità di occuparsi sia della fisica del processo sia di un'appropriata descrizione dell'interfaccia.

È stato sviluppato¹ un modello dinamico che permette di descrivere l'evoluzione nello spazio e nel tempo dell'interfaccia tra l'acqua e il ferrofluido date le intensità di corrente dei diversi elettromagnetiche.

In Figura 5.3 si possono vedere alcuni frame di una simulazione del modello dinamico in vari istanti.

¹ A. Alessandri , P. Bagnerini , M. Gaggero , L. Mantelli

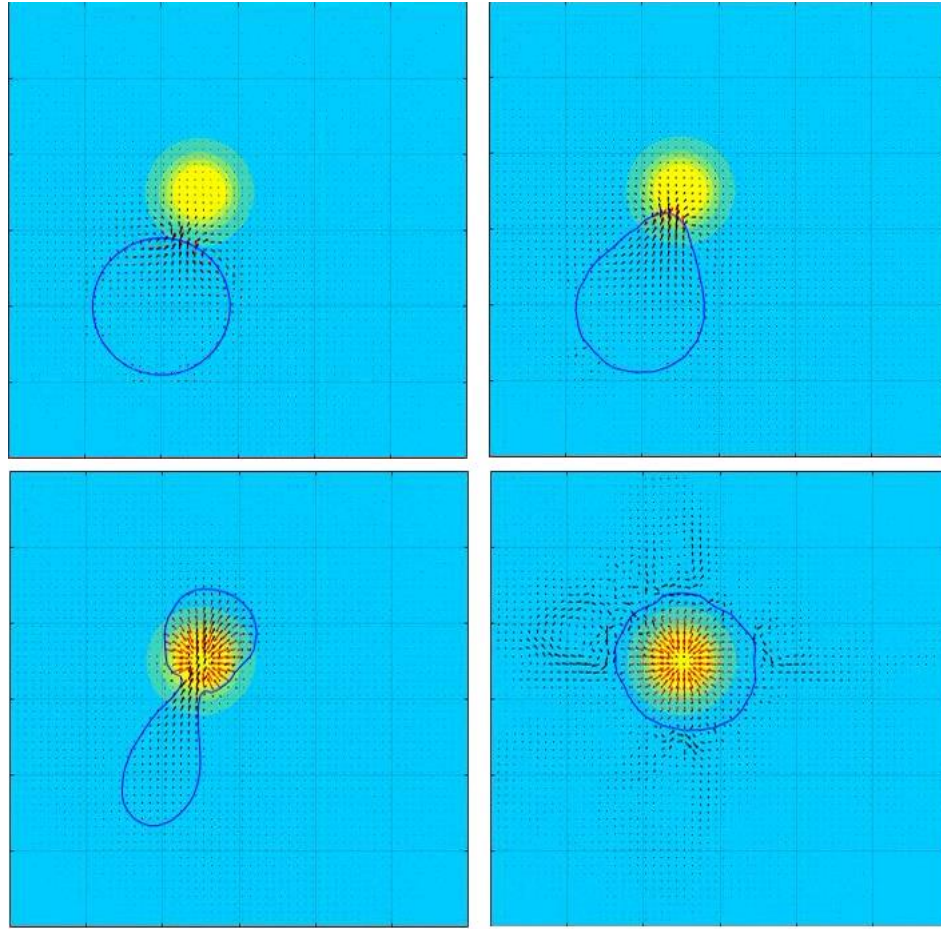


Figura 5.3 Frame di una simulazione del modello dinamico

Il modello basato sulle equazioni di Navier-Stokes, che descrivono la fisica del processo, e sui level set methods, che descrivono l'interfaccia, risulta essere molto esigente dal punto di vista computazionale.

Per rendere il modello computazionalmente meno oneroso è stata implementata una black box, basata su reti neurali, che approssima le equazioni di Navier-Stokes e dei level set utilizzando opportuni approssimatori non lineari. L'obiettivo è il calcolo degli input di controllo ottimo in Real-time, senza richiedere la soluzione numerica online delle due PDE.

I dati provenienti dal modello MATLAB basati sulla risoluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes e level set sono stati utilizzati per l'addestramento della rete neurale

Lo scopo del monitoraggio del test rig è ottenere dati sperimentali utili per l'addestramento della rete neurale al pari dei dati ottenuti dal modello dinamico in MATLAB.

5.2 Test rig ferrofluido

Il test rig è stato sviluppato in collaborazione con l'azienda Techcom srl.

Il test rig è un sistema in cui il movimento di un ferro fluido, di colore nero, confinato in un contenitore quadrato, è influenzato dal campo magnetico di una matrice di elettrocalamite.

Lo scopo del test rig è studiare il comportamento del ferro fluido in presenza di campi elettromagnetici variabili. In altre parole, il test rig consente la propagazione di un'interfaccia; per interfaccia si intende il confine tra due regioni spaziali occupati da materia differente, o da materia in differenti stati. Nel caso in oggetto le due differenti materie sono il ferro fluido (nero) e il liquido trasparente formato da una miscela di acqua e sale.

Un ferro fluido è un liquido in cui le nanoparticelle ferromagnetiche sono sospese in un liquido di trasporto (in questo sistema si tratta di un olio minerale polare leggero). La dimensione delle particelle impedisce la loro attrazione poiché le forze inter-magnetiche sono basse rispetto a quelle di Van der Waals del tensioattivo. Il ferro fluido è miscelato con una miscela di acqua satura di sale che, essendo polare, fornisce una separazione totale tra i due fluidi. La densità complessiva è quasi uguale a quella dei singoli componenti impedendo dunque la stratificazione. Un telaio di legno tiene le diverse componenti del sistema unite, un contenitore di vetro ospita i due fluidi e un PCB (Printed Circuit Board) per pilotare i magneti.

Per la generazione dei campi elettromagnetici variabili sono state utilizzati elettrocalamite commerciali (Figura 5.4), i 1000G@12V erogabili sono sufficienti alla manipolazione del ferro fluido. Il design finale è composto da una matrice 6x6 dei suddetti elettromagneti.

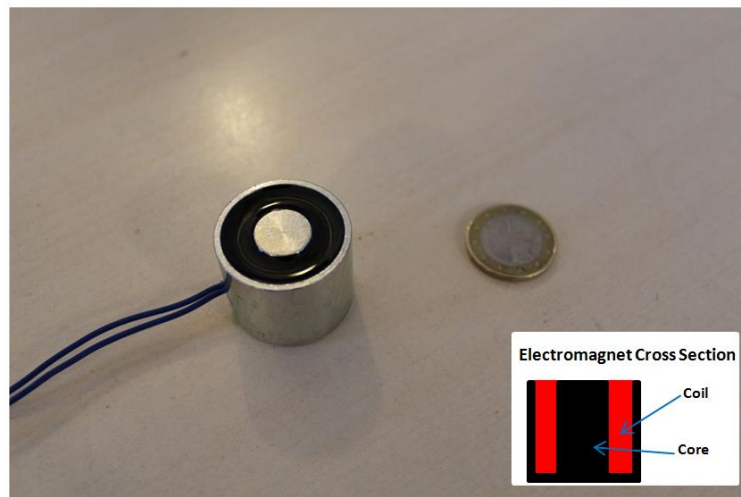


Figura 5.4 Elettrocalamite

5.3 Electronic driver Design

Il sistema è alimentato da un alimentatore esterno a 12V. Il controllo di ciascuna elettrocalamita è manuale, il circuito, schematizzato in Figura 5.5, è in grado di pilotare il magnete sia in modalità pseudo-analogica che in modalità digitale.

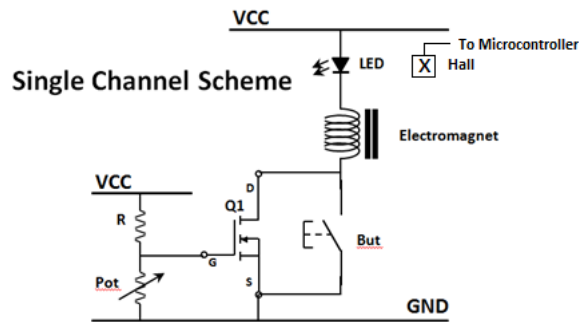


Figura 5.5 Schematico driver elettrocalamita

Le modalità di controllo delle elettrocalamite sono due. La prima è attraverso il potenziometro denominato *Pot*. Cambiando la posizione della slitta del potenziometro (Figura 5.5), il valore di tensione sul gate del transistor *Q1* cambia, pilotando il flusso di corrente attraverso l'elettromagnete. Questa opzione controlla in modo continuo la corrente mentre, in parallelo con il transistor, il pulsante *But* bypassa il transistor *Q1*. Un sensore effetto Hall (LEM LTS6NP 6A), consente la rilevazione della corrente assorbita da ciascun elettromagnete.

Per tenere insieme le trentasei elettrocalamite, i trentasei driver e i diversi cablaggi, è stato necessario costruire un telaio meccanico. Il telaio, in legno, è stato concettualmente diviso in due parti e le cablature sono state progettate per scorrere sotto gli elettromagneti fino all'area riservata ai driver. Di seguito sono riportati i passaggi dai disegni ai controlli del banco di prova finale.

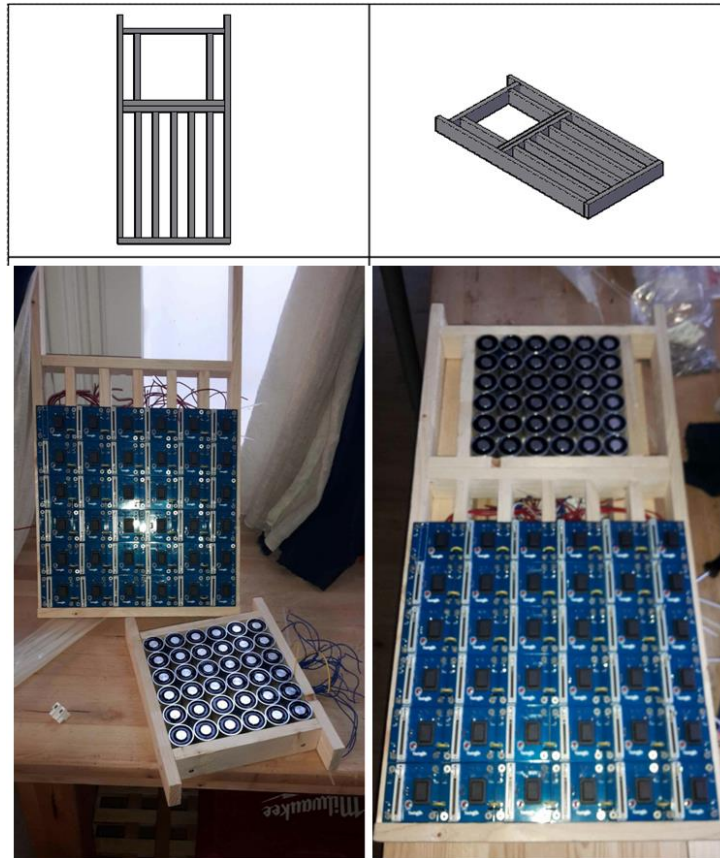


Figura 5.6 Telaio meccanico e assemblaggio finale

La progettazione della superficie di contenimento del ferro fluido ha attraversato due diverse fasi.

In principio si è tentato di sviluppare un contenitore quasi-2D, al fine di minimizzare gli effetti della gravità sulla dinamica del ferro fluido. Come si può notare in Figura 5.7, due lastre di vetro sono state poste ad una distanza di 3 mm .

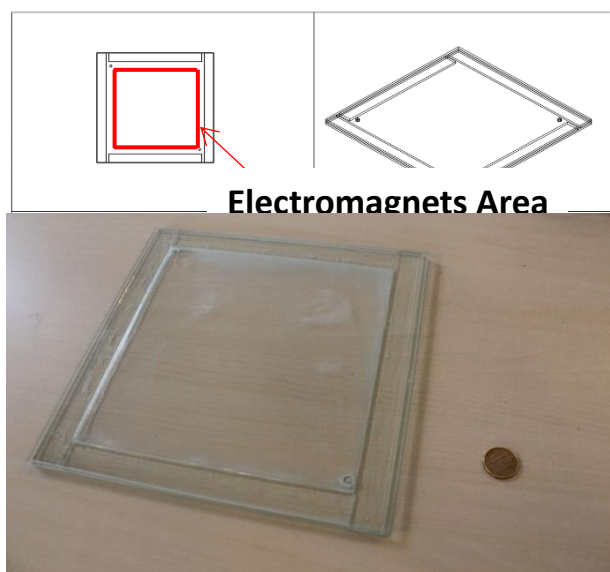


Figura 5.7 Contenitore quasi 2D

L'obiettivo era quello di avere un risultato più simile possibile a quello simulato, quindi avere un movimento del ferro fluido in sole due dimensioni. Il risultato non è stato soddisfacente in quanto il ferro fluido aderiva alle due superfici al suo passaggio, inficiando completamente la dinamica del ferro fluido e la sua interazione con i campi elettromagnetici. La possibile spiegazione di questo effetto sono le forti forze di superficie di Van der Waals che sono presenti nelle molecole di ferro fluido che spingono il liquido verso il vetro.



Figura 5.8

Dopo aver fallito l'approccio quasi-2D, al fine di minimizzare l'adesione fra ferro fluido e superficie, si è deciso di procedere con un nuovo layout che avesse una sola superficie di contatto con il ferro fluido stesso. Così come per il primo, il design è partito dai disegni.

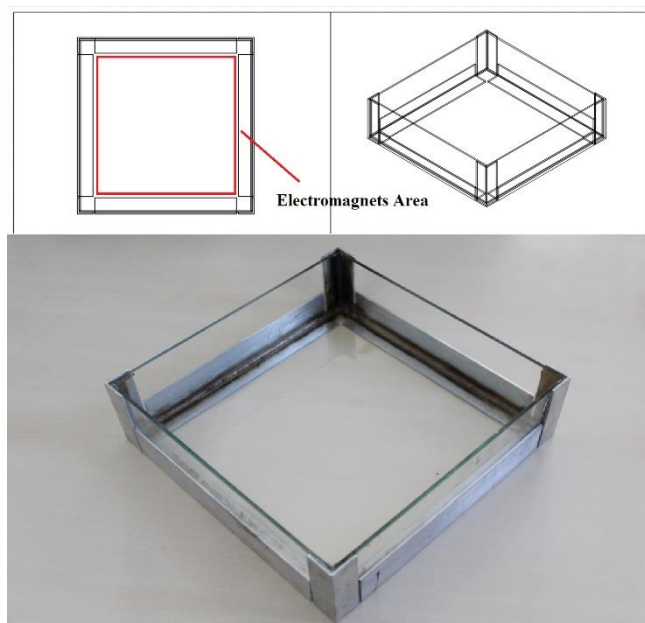


Figura 5.9 Contenitore senza coperchio

In Figura 5.9 viene mostrato il nuovo layout senza vincoli in altezza.

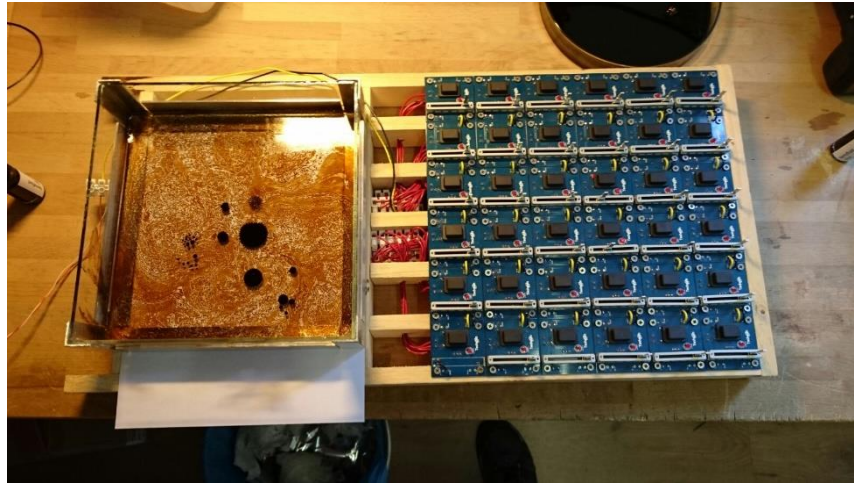


Figura 5.10 Setup finale

5.4 Sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio e controllo del test rig è formato essenzialmente da una videocamera digitale, una scheda elettronica Arduino UNO e circuiti integrati basati su sensori effetto Hall che trasducono la corrente passante nelle diverse elettrocalamite in tensione.

Sono stati sviluppati due differenti algoritmi, lato microcontrollore e lato elaboratore.

Il primo campiona, con una frequenza di 30 Hz, i valori corrispondenti alle correnti assorbite dalle elettrocalamite e li invia, tramite la porta di comunicazione seriale RS232, al PC.

Il secondo acquisisce sia le immagini provenienti dalla telecamera sia i valori acquisiti tramite RS232. Le immagini e i dati dei sensori sono salvati con una TAG relativa al tempo di acquisizione in modo da mantenere la corrispondenza temporale.

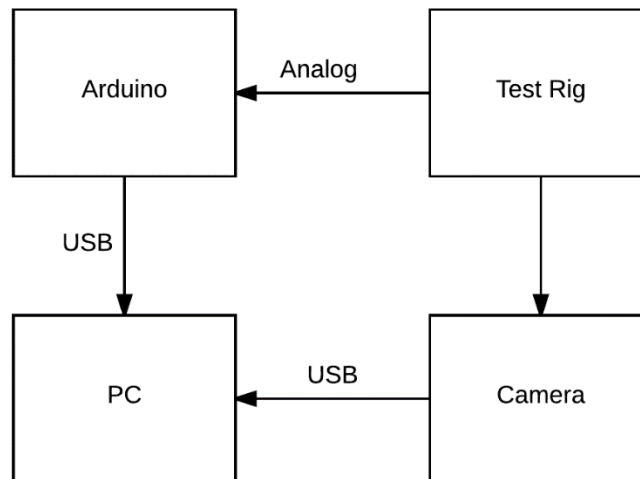


Figura 5.11 Deployment view test rig ferrofluido

Le immagini devono essere processate in modo da essere compatibili con i dati provenienti dal modello MATLAB. L'applicativo è stato sviluppato in Python ed è basato sulla libreria software per il trattamento d'immagine e la visione artificiale OpenCV (Open Source Computer Vision).

La fase di inizializzazione dell'applicativo consente di selezionare l'area relativa alla sola area di interesse, la vasca contenente il ferrofluido (Figura 5.12).

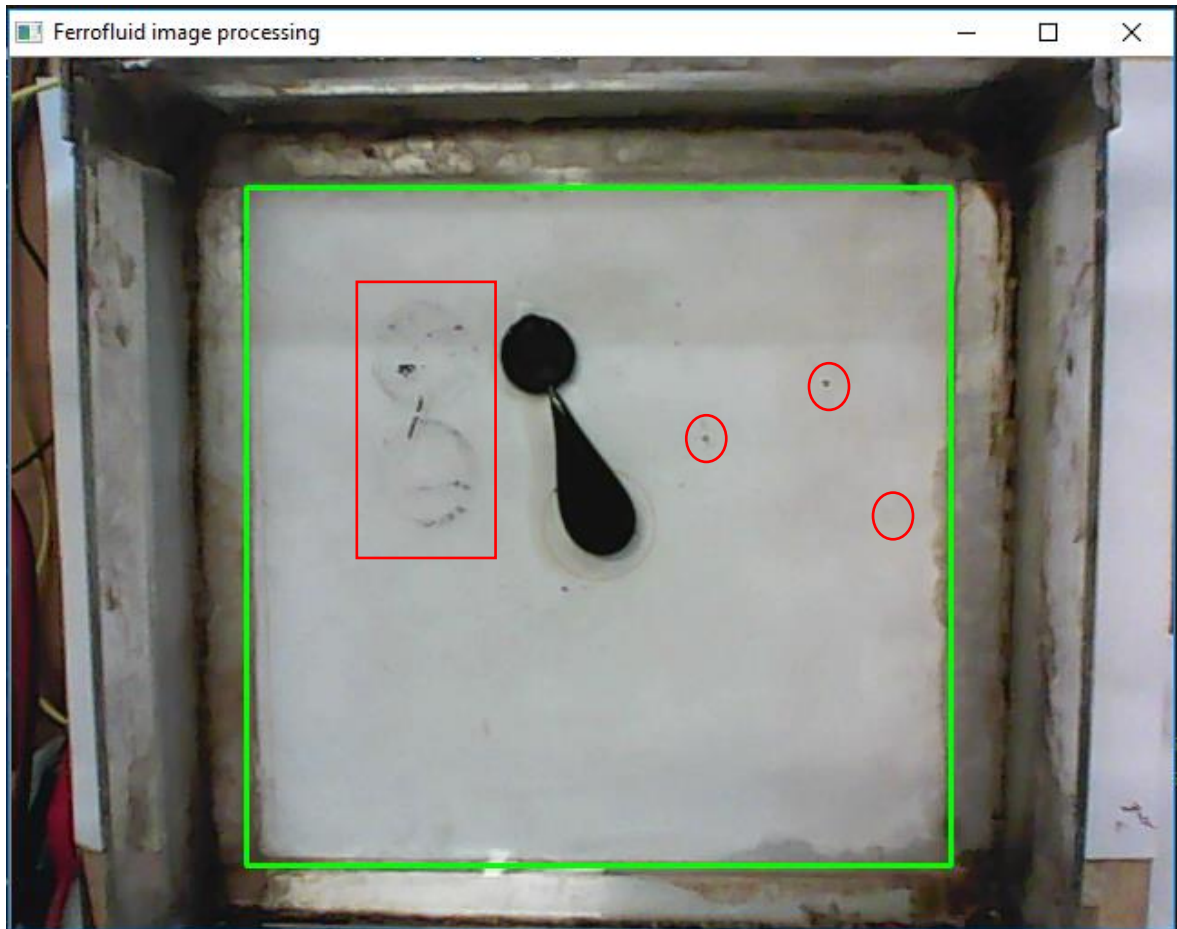


Figura 5.12 Interfaccia per la selezione dell'area d'interesse

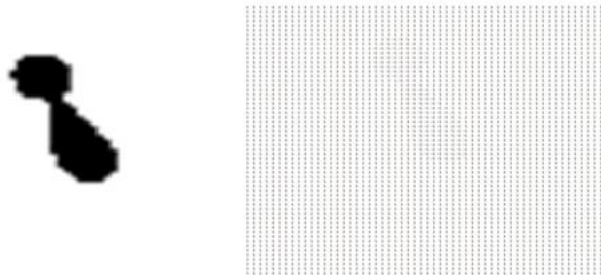


Figura 5.13 Immagine 60x60 pixels, matrice binaria

A seguito della selezione dell'area d'interesse, il programma analizza le immagini relative ad una singola prova, elaborando la sola area selezionata precedentemente.

L'elaborazione d'immagine viene eseguita sul singolo frame, consentendo di passare da un'immagine come quella in Figura 5.12 ad una matrice binaria di 60x60 elementi costituita da soli 1 (area in cui non è presente il magnete) e -1 (area dove è presente il magnete). In Figura 5.13 vengono riportati gli ultimi due step dell'algoritmo, a sinistra l'immagine bi-colore 60x60 pixels, a destra la matrice numerica.

Come si può vedere in Figura 5.13 l'algoritmo elimina il rumore presente nell'immagine di partenza Figura 5.12, in rosso), causati da residui di ferrofluidi non coinvolti nelle prove imputabili a prove precedenti. Questo avviene grazie all'utilizzo di diversi filtri, quali filtri di Canny [26] e gaussiani.

Queste informazioni, insieme ai dati relativi alla corrente circolante nel singolo elettromagnete consentono di istruire, in maniera identica ai dati ricavati dal modello dinamico in MATLAB®, la rete neurale black box.

5.5 Conclusioni

È stato sviluppato un sistema di monitoraggio di un test rig innovativo per lo studio del moto di un'interfaccia bi-dimensionale costituita da un ferrofluido soggetta a campi elettromagnetici variabili.

Il sistema di monitoraggio è costituito da un PC connesso a un microcontrollore ed una webcam. Le immagini acquisite dalla webcam sono trattate in modo da ottenere una matrice booleana, utilizzata per istruire una rete neurale black box che approssimi le equazioni di Navier-Stokes e dei level set tramite opportuni approssimatori non lineari.

6 Conclusioni

Diverse applicazioni di monitoraggio e controllo sono state progettate e implementate principalmente in sistemi energetici, attraverso altrettante tecnologie hardware e software. In un caso il controllo ha incluso un algoritmo di ottimizzazione sviluppato ad hoc. Le tecnologie hardware comprendono schede a microcontrollore, DCS, data logger commerciali e PC, quelle software i linguaggi di programmazione C, C#, C++ e Python.

Gli scenari applicativi annoverano la ricerca di base, la ricerca applicata, il settore civile e industriale.

L'obiettivo dei diversi sistemi di monitoraggio e/o controllo sono molteplici:

monitoraggio di un sistema energetico per condurre un'analisi a posteriori delle sue performance

controllo di un sistema energetico per massimizzare la relativa produzione di energia elettrica

monitoraggio e controllo da remoto di un sistema energetico innovativo per valutarne le performance in linea e a posteriori

monitoraggio di un test rig innovativo per l'estrazione di dati e l'addestramento di una rete neurale, successivamente utilizzabile per lo sviluppo del relativo controllo

L'analisi delle performance dell'ottimizzatore idroelettrico proseguono, in questo caso l'obiettivo è confermare l'incremento della produzione di energia elettrica sul lungo periodo.

Lo sviluppo del WEC innovativo Seaspoon e del relativo sistema di monitoraggio e controllo prosegue nell'ambito del progetto denominato **Sea Wham, Seaspoon Wave HARvesting by Microturbine, Sviluppo e sperimentazione di stazione di ricarica off-shore per sistemi navali autonomi tramite convertitore di energia dal moto ondoso e microturbina** finanziato dal ministero della difesa in quanto PNRM (Piano Nazionale Ricerca Militare) in collaborazione con il CSSN (Centro di Supporto e Sperimentazione Navale) di La Spezia e ISME (Interuniversity Center of Integrated Systems for the Marine Environment).

Lo sviluppo del test rig di level set proseguirà con l'implementazione di un sistema di controllo che attui le elettrocalamite in funzione dell'interfaccia voluta con lo scopo di validare il sistema di controllo sviluppato in MATLAB.

La presente tesi di dottorato ha affrontato, sia dal punto di vista della ricerca applicata sia da quello della ricerca di base, l'applicazione di tecnologie di monitoraggio e controllo al campo dei sistemi energetici. Le potenzialità della "information technology" nell'impianistica è in continua evoluzione e, nel tempo, sarà richiesta una sempre maggiore familiarità degli operatori con concetti quali "Digital twins", "Cyberphysical systems", "Artificial intelligence". La presente tesi ha affrontato diversi concreti aspetti legati a tali tecnologie del futuro, da un punto di vista molto applicativo e pratico, risolvendo, sul campo, molti problemi di interoperabilità e interfacciamento di software e hardware differenti. Proprio quest'ultimo aspetto, l'interoperabilità, è un elemento chiave per la diffusione delle tecnologie digitali in ambito industriale: a questo proposito, la presente tesi, senza pretesa di generalità, offre però spunti per soluzioni funzionali che potranno essere replicate ad impianti di taglie ben più elevate di quelle analizzate qui.

7 Conclusion

Several monitoring and control applications have been designed and implemented mainly in energy systems, using several hardware and software technologies. In one case the control included an ad hoc optimization algorithm. The hardware technologies include microcontroller boards, DCS, commercial data loggers and PCs. The software programming languages used are C, C #, C ++ and Python.

The application scenarios include basic research, applied research and the civil and industrial sector.

The goal of the various monitoring and control systems are multiple:

- monitoring an energy system to conduct an ex-post analysis of its performance
- control of an energy system to maximize the relative production of electricity
- monitoring and remote control of an innovative energy system to evaluate its performance in line and subsequently
- monitoring of an innovative test rig for data extraction and training of a neural network, subsequently usable for the development of the relative control

The analysis of the performance of the hydroelectric optimizer continues, in this case the objective is to confirm the increase in the production of electricity over the long term.

The development of the innovative Seaspoon WEC and the related monitoring and control system continues in the project called Sea Wham, Seaspoon Wave HARvesting by Microturbine funded by the Ministry of Defense as PNRM (National Military Research Plan) in collaboration with the CSSN (Naval Support and Experimentation Center) of La Spezia and ISME (Interuniversity Center of Integrated Systems for the Marine Environment).

The development of the level set test rig will continue with the implementation of a control system that activates the electromagnets according to the desired interface with the aim of validating the control system developed in MATLAB.

The present PhD thesis dealt with the application of monitoring and control technologies in the field of energy systems, both from the applied and basic research' point of view. The potential of "information technology" in plant engineering is constantly evolving and, over time, it will require a greater familiarity of operators with concepts such as "Digital twins", "Cyberphysical systems", "Artificial intelligence". This thesis dealt with several concrete aspects related to these technologies of the future, from a very applicative and practical point of view, solving, in the field, many problems of interoperability and interfacing of different software and hardware. Precisely this last aspect, interoperability, is a key element for the diffusion of digital technologies in the industrial field: in this regard, the present thesis, without any claim to generality, offers suggestions for functional solutions that can be replicated to sizes much higher than those analysed here.

8 Bibliografia

- [1] S. G. B. R. B. Allen, «Dynamic programming in hydropower,» *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1986.
- [2] R. A. D. G. R. Dean, «Water wave mechanics for engineers and scientists,» *World scientific publishing Co.*, 2000.
- [3] M. J. a. P. G. Tucker, *Waves in Ocean Engineering*, ISBN 9780080435664, First Edition, Elsevier , 2001.
- [4] A. T. L. Di Fresco, «The Seaspoon innovative wave energy converter,» in *Oceans - San Diego*, 2013.
- [5] A. T. L. Di Fresco, «Energy conversion of orbital motions in gravitational waves: Simulation and test of the Seaspoon wave energy converter,» *Energy Conversion and Management*, 2014.
- [6] A. T. ., S. B. ., E. G. ., M. G. L. Di Fresco, «Off-shore wave energy harvesting: A WEC-microturbine system: Harvesting and storing energy for off-shore applications,» in *OCEANS 2015 - Genova*, 2015.
- [7] J.A. Sethian, *Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision and Materials Science*, Cambridge University Press, 1999.
- [8] V. d. B. R., «Sustainability of biomass electricity systems-- an assesment of costs, macro-economic and enviromental impascts in Nicaagua, Ireland and the Netherlands,» *Utrecht University*, 2000.
- [9] T. WC, «Renewable energy technologies, in World Energy Assesment,» 2000.
- [10] H. Tuy, «Monotonic Optimization: Problems and Solution Approaches».
- [11] S. Lasdon, «GRG2 - An All FORTRAN General Purpose».
- [12] S. Lasdon, «Programming, Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear».
- [13] C. Kao, «Performance of several nonlinear programming software packages on microcomputers,» *Comput. Oper. Res.* 25, 1998.
- [14] A. Waren, «Design and Use of the Microsoft Excel Solver».
- [15] T. 4. V. M. o. architecture, «P.B. Kruchten,» *IEEE Software*, vol. 12, n. 6, 1995.

- [16] A. T. Alberto Vannoni, *Tesi di laurea triennale in Ingegneria Meccanica: Analisi e monitoraggio di un prototipo di wave energy converter*, 2016.
- [17] CarbonTrust, «Variability of UK Marine Resources,» *Environmental Change Institute; Oxford*, 2005.
- [18] M. P. R. M. L. Y.-H. Y. A. C. A. F. K. H. D. M. V.S. Neary, «Methodology for Design And Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies,» Sandia National Laboratories Report, March 2014.
- [19] *I dati sono forniti dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova*, http://www.dicca.unige.it/meteo/text_files/dati/.
- [20] S. Bozzi, «Wave energy farm design in real wave climates: The italian offshore,» *Energy*, vol. 122, pp. 378-389, 2017.
- [21] R. D. G. R. Dean, «Water wave mechanics for engineers and scientists,» *World scientific publishing Co. ,* 2000.
- [22] J. Sethian, «Level Set Methods and Fast Marching Methods, 2nd ed.,» *Cambridge: Cambridge University Press,*, 1999.
- [23] S. a. S. J. Osher, «Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithm Based on Hamilton-Jacobi Formulations,» *Journal of Computational Physics*, n. 79, 1988.
- [24] P. B. a. M. G. A. Alessandri, «Optimal control of level set dynamics,» in *Proc. American Control Conf*, 2014.
- [25] P. B. a. M. G. A. Alessandri, «Extended Kalman filtering to design optimal controllers of fronts generated by level set methods,» in *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, 2016.
- [26] J. Canny, «A computational approach to edge detection,» *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.

Conferences and journal publication

Conference

Title: Flow rate optimization for hydropower plants

Authors: Bongiovì, A.¹ ; Santamaria, V.² ; Vigato, F.³ ; Braggio, L.⁴

Affiliation: ¹ABB ; ²UNIGE ; ³AGSM ; ⁴CCC

Source: 13th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2016/MFPT 2016,

Title: The seaspoon wave energy converter: Performance characterization of different blade geometries

Authors: Roncallo F¹.; Reboli T¹.; Santamaria V¹.; Canepa E.¹; Traverso T.¹

Affiliation: ¹UNIGE

Source: OCEANS 2017, Aberdeen

Title: Black-box Modeling and Optimal Control of a Two-phase Flow by Using Navier-Stokes Equations and Level Set Methods

Authors: A. Alessandri¹, P. Bagnnerini¹, M. Gaggero², L. Mantelli¹, V. Santamaria¹, A. Traverso¹

Affiliation: ¹UNIGE, ²CNR

Source: 2018 American Control Conference, Milwaukee

Journal

Title: The Seaspoon wave orbital motion converter: prototype development and open sea installation

Authors: Roncallo F.¹.; Santamaria V.¹; Traverso T.¹, Carraro C.²;

Affiliation: ¹UNIGE, ²Techcom srl

Journal: submitted to Renewable Energy