

**G. CUPERTINO, P.A. FICHERA**

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Smart Energy  
Intelligenza Distribuita e Robotica per l'Ambiente e la Persona  
Centro Ricerche Casaccia

# VENUS

Veicolo per Navigazione Subacquea e Sorveglianza  
Struttura dello Scafo e Sistemi di Bordo – Prove Preliminari

RT/2020/12/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

G. CUPERTINO, P.A. FICHERA

Dipartimento Tecnologie Energetiche  
Smart Energy  
Intelligenza Distribuita e Robotica per l'Ambiente e la Persona  
Centro Ricerche Casaccia

# VENUS

Veicolo per Navigazione Subacquea e Sorveglianza  
Struttura dello Scafo e Sistemi di Bordo – Prove preliminari

RT/2020/12/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina [www.enea.it](http://www.enea.it)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **VENUS**

Veicolo per Navigazione Subacquea e Sorveglianza  
Struttura dello Scafo e Sistemi di Bordo – Prove Preliminari

Giacomo Cupertino, Paolo Antonio Fichera

### **Riassunto**

VENUS è un robot autonomo sottomarino interamente sviluppato nel Laboratorio ENEA – DTE-SEN-IDRA, per svolgere compiti di ricerca, monitoraggio e sorveglianza. Se ne discute la filosofia di progetto. Vengono descritte la struttura meccanica e l'architettura del sistema elettronico. Sono infine illustrati i test preliminari. I test sono stati condotti nella piscina del Laboratorio di Robotica e poi al lago di Bracciano..

**Parole chiave:** robotica sottomarina, prototipo sperimentale, processo di controllo, applicazioni robotiche, drone subacqueo, AUV.

### **Abstract**

*VENUS is an autonomous underwater robot fully developed at ENEA – DTE-SEN-IDRA Labs, to carry out search/monitoring/surveillance tasks. Design philosophy of the vehicle is discussed. Both mechanical structure and electronic system architecture are described. Preliminary tests are finally illustrated. The tests were carried out in the Robotics Labs pool and then at Bracciano lake.*

**Keywords:** *underwater robotics, experimental prototype, control process, robotics applications, underwater drone, AUV.*



## INDICE

1. Contesto applicativo	7
2. Caratteristiche Generali	8
3. Struttura Esterna	10
4. Struttura Interna	14
5. Test Sperimentali	16
5.1 Laboratorio	16
5.2 Acque libere	19
6. Considerazioni finali	23
7. Bibliografia	24



## 1. Contesto Applicativo

La Robotica Sottomarina ha da tempo un posto importante fra le attività del Laboratorio di Robotica dell'ENEA – DTE-SEN-IDRA. Lo testimoniano progetti come Sara, Melba, Tectis, Harness, e la dotazione di apparecchiature specializzate, come diversi tipi di sonar e un ROV Falcon, impiegati in attività di supporto alle suddette attività progettuali.

L'idea di realizzare un AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) di dimensioni e costi contenuti è stata una conseguenza quasi naturale di questa attitudine, stimolata peraltro dalla continua espansione del settore.

L'idea si è inizialmente sviluppata nel contesto dello studio sull'impiego di sciami di robot (*swarm robotics*) in ambiente sottomarino (Progetto Harness).

Per sciame si intende un gruppo di veicoli identici che cooperano, nello svolgimento di particolari task, secondo regole ispirate in parte al comportamento sociale di alcune specie animali.

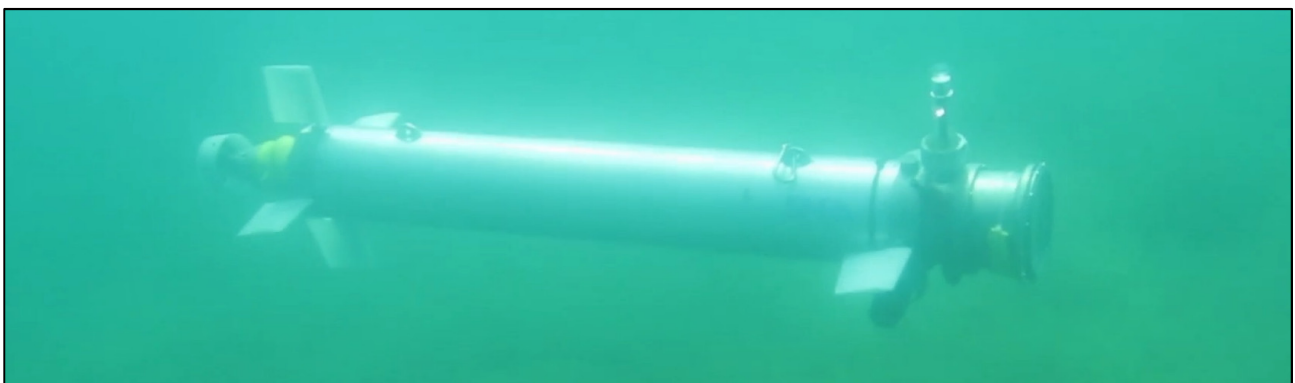
È intuitiva la maggiore efficienza con cui un gruppo di robot autonomi, strettamente coordinati, può svolgere compiti quali, ad esempio, l'esplorazione di un'estesa area di fondale marino, rispetto all'impiego di una sola unità, anche se dotata di prestazioni superiori.

La numerosità di uno swarm dipende dal tipo di task, e può essere piuttosto elevata, anche dell'ordine di decine di esemplari. Di conseguenza il singolo elemento dev'essere caratterizzato da un costo contenuto (e quindi anche da una complessità costruttiva relativamente bassa), per non rendere il progetto economicamente insostenibile.

Ciascun veicolo deve comunque essere dotato di tutte le funzionalità necessarie alla navigazione in sciame, e in particolare di un efficace sistema di comunicazione subacquea, essenziale in un sistema basato su un continuo scambio di informazioni fra i componenti del gruppo. Un avanzato sistema di comunicazione ottica è in fase di sviluppo, parallelamente al veicolo, presso il Laboratorio di Robotica.

Quelli appena esposti sono stati i criteri base seguiti nella progettazione di VENUS.

La macchina attuale (**fig. 1.1**) è il risultato di un'evoluzione che ha portato ad implementare la capacità di operare in completa autonomia, svincolandosi così dal concetto di sciame e mantenendo come punto di forza il costo di realizzazione contenuto, pur essendo dotata di notevoli capacità operative.



**Figura 1.1** – La versione attuale di VENUS durante una missione al lago

## 2. Caratteristiche generali

VENUS è un robot sottomarino, progettato per eseguire missioni autonome di ricerca, monitoraggio e sorveglianza.

È governato mediante un'elica di propulsione e sei timoni esterni (due coppie di timoni di profondità, una coppia di timoni di direzione). Non è dotato di casse di compensazione né di eliche di manovra (*thruster* trasversali): il controllo di profondità e di direzione è dinamico, e non è prevista l'operazione in *hovering*.

È dotato della sensoristica necessaria alla navigazione autonoma (bussola, profundimetro, GPS, IMU, Sonar) e può essere equipaggiato con sensori specifici per il particolare tipo di missione. Per questo secondo aspetto la dotazione fissa consiste attualmente in una coppia di *webcam*, installate frontalmente.

Il controllo interno del sistema è affidato ad una serie di *embedded-computer* intercomunicanti tramite rete *Ethernet* [2].

La supervisione da parte dall'operatore è effettuata per mezzo di una Stazione di Controllo Remota, costituita attualmente da un PC portatile.

Il collegamento fisico fra la Stazione e VENUS avviene per mezzo di un link WiFi.

L'operatore ha a disposizione due differenti interfacce grafiche, sviluppate nel corso della evoluzione del robot:

- la prima dedicata principalmente ai test dei componenti ed allo sviluppo del relativo software [2];
- la seconda dedicata alla gestione del controllo di navigazione, pertanto inglobata nel Sistema di Controllo sviluppato in ROS (*Robot Operating System*) [3].

Le principali caratteristiche di VENUS sono sintetizzate in **Tab 2.1**.

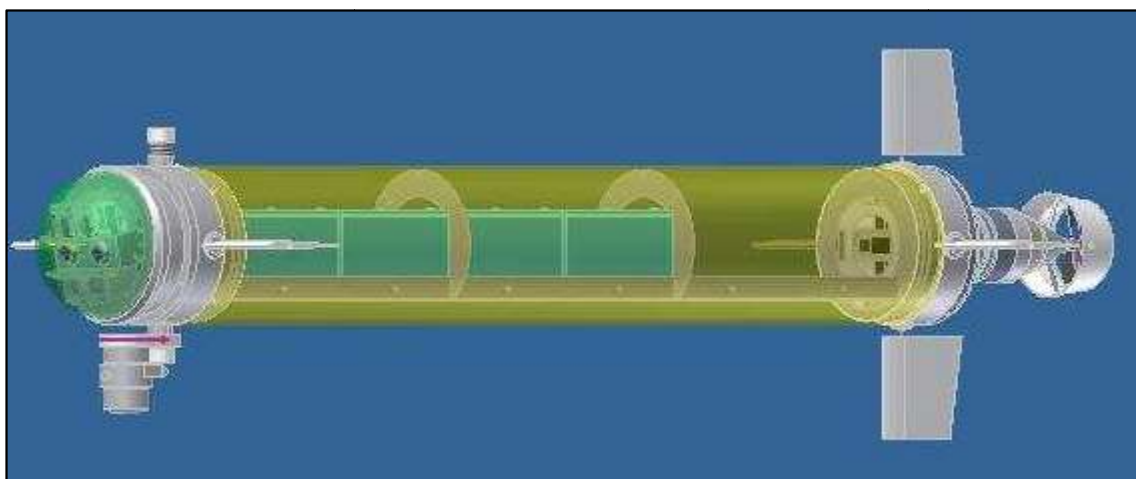
Lunghezza	1580 mm	escluso cupolino
Ingombro frontale	Ø470 mm	fuori tutto
Peso	~35kg	a secco
Velocità	2 nodi	massima
Profondità di progetto	50 m	massima
Autonomia	6-8 ore	massima
Sensori per la navigazione	Bussola	Protocollo I2C
	Profondimetro	Range max 10 Bar
	GPS	Protocollo NMEA
	IMU	USB
	Sonar	Protocollo RS-232
Equipaggiamenti specifici	Telecamere <i>fullHD</i>	USB
	Fari	6 LED in serie (18W)

**Tabella 2.1** – Riepilogo delle principali caratteristiche del VENUS

### 3. Struttura Esterna

Il progetto originale di VENUS è riportato in [1]. Nel corso dello sviluppo sono state apportate alcune modifiche, che hanno riguardato in particolare la zona anteriore, l'elica di propulsione ed una revisione generale del sistema di guarnizioni (*o-ring*) che garantiscono la tenuta stagna.

La struttura dello scafo è realizzata in lega d'alluminio, e può essere schematicamente suddivisa in tre sezioni: Testa, Coda e Corpo centrale (**Fig. 3.1**).



**Figura 3.1** – Concept meccanico del VENUS

Il Corpo centrale è ricavato da una tubazione industriale standard, in accordo con i criteri di economicità discussi nel **Cap. 1**. All'interno (**Fig. 3.1**) sono disposti i cestelli destinati all'alloggiamento delle batterie e di parte dell'elettronica, al disotto dei quali è ricavato un vano per il posizionamento e la regolazione assiale della zavorra.

Sulla sommità del corpo centrale sono saldati due golfari di sollevamento, mentre alle due estremità sono ricavate le sedi per gli *o-ring* che permettono l'accoppiamento stagno con le sezioni di Testa e di Coda.

Queste ultime sono costituite ciascuna da diversi elementi, ricavati mediante lavorazione di un tondo pieno alle macchine a controllo numerico e dotati di accoppiamenti standardizzati. La struttura così ottenuta presenta un buon grado di modularità, cosa che ha permesso l'inserimento di nuovi elementi quando se ne è presentata l'esigenza.

La sezione di Testa (**Fig. 3.3a**) è costituita da tre elementi cilindrici, di diametro pari a quello del corpo di VENUS, all'interno dei quali è distribuita l'elettronica di controllo (**Cap. 4**). La Testa alloggia rispettivamente, procedendo da prua verso poppa (schema in **Fig. 3.2**):

- la coppia di *webcam* in dotazione a VENUS, appaiate su un piano orizzontale, ed un gruppo di sei fari a LED;

- le penetrazioni stagne per il cilindro porta antenne (sulla parte superiore) e per il connettore stagno di ricarica batterie (superiormente, inclinato a 45°, sulla destra in senso di marcia), oltre a due altre penetrazioni a disposizione;
- le penetrazioni stagne per gli assi delle pinne costituenti la coppia di timoni di profondità anteriori, oltre a due altre penetrazioni a disposizione, una delle quali è attualmente utilizzata per il collegamento del sonar.

Si noti che il secondo elemento descritto, inizialmente non previsto, è stato aggiunto in seguito, a conferma della validità della progettazione modulare.

Il primo elemento è chiuso, fronte marcia, da un disco trasparente in plexiglas di opportuno spessore, che consente l'acquisizione video da parte delle *webcam* e l'illuminazione della scena da parte dei fari a LED.

Il disco è fissato mediante una corona di bulloni, e la tenuta stagna è garantita da un *o-ring* frontale.

Tra l'ottica di ogni telecamera e il disco in plexiglas è collocata, in intimo contatto, una lente neutra, annerita lungo tutta la superficie perimetrale parallela al fascio di luce da intercettare, che garantisce l'assenza di riflessi e fasci spuri che andrebbero a danno della corretta acquisizione video.

Tra le due telecamere sono situati due led RGB (Red-Green-Blue), deputati rispettivamente a segnalare lo stato di carica delle batterie e a dare una indicazione di massima sullo stato complessivo del sistema.

Insieme all'inserimento del secondo elemento della Testa, il disco di plexiglas costituisce la principale modifica fra quelle citate in apertura. Come si può vedere in **Fig. 3.1**, la Testa aveva in origine forma emisferica, per migliorare l'idrodinamica del veicolo; ciò andava però a scapito della qualità delle acquisizioni video, che presentavano un certo grado di distorsione. Sfruttando l'imbullonatura del disco di plexiglas è tuttora possibile montare una calotta emisferica, che però viene allagata, per minimizzare la variazione di assetto e non disturbare le riprese video.

La sezione di Coda (**Fig. 3.3b**) è anch'essa costituita da tre elementi, che alloggiavano rispettivamente, procedendo sempre verso poppa (schema in **Fig. 3.2**):

- le penetrazioni stagne per gli assi delle pinne costituenti la coppia di timoni di direzione e la coppia di timoni di profondità posteriori (elemento cilindrico di diametro pari a quello del corpo di VENUS);
- il motoriduttore e l'alloggiamento per il trasduttore di pressione (elemento cilindrico di diametro ridotto, dotato di pronunciata alettatura di raffreddamento);
- il supporto dell'asse dell'elica (elemento conico).

L'accoppiamento motoriduttore–elica è realizzato mediante giunto magnetico stagno.

L'elica di propulsione è in bronzo ed ha sostituito quella in ABS, installata nella prima versione di VENUS.

L'elica è intubata in un anello di materiale plastico (ugello), fissato all'elemento conico mediante quattro distanziatori. L'ugello è deputato ad incanalare in maniera più efficiente il fluido sull'elica, per migliorarne il rendimento idrodinamico.

Le sei pinne hanno profilo alare simmetrico e sono realizzate in materiale plastico. Ciascuna di esse è calettata su un alberino in acciaio, supportato da cuscinetti a sfere alloggiati nelle penetrazioni dello scafo sopra descritte. Gli assi sono azionati da *step-motor*.

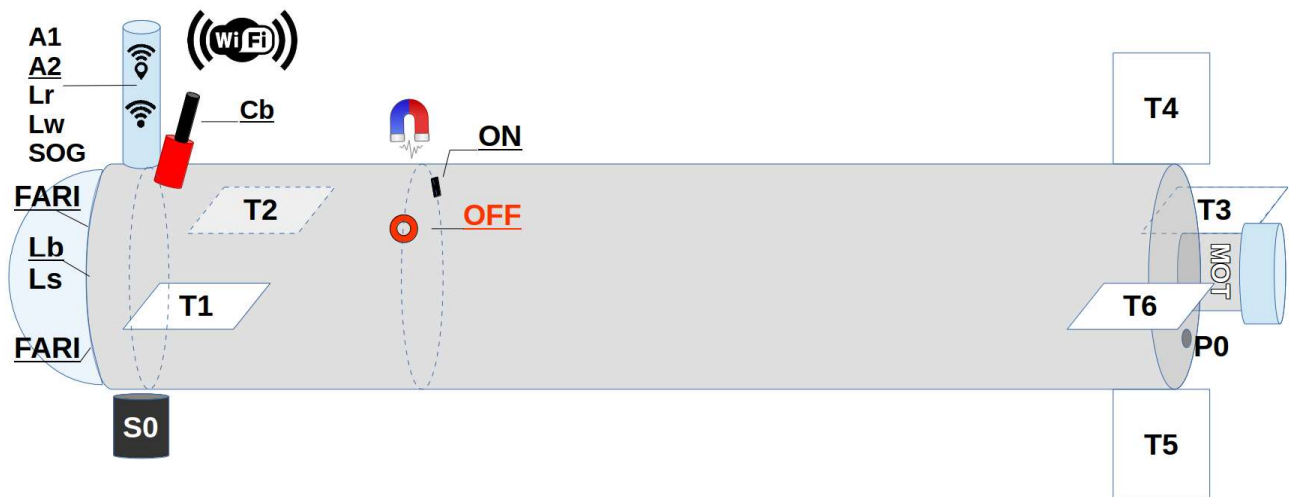
Le pinne sono manovrabili indipendentemente e possono assumere posizioni in un intervallo che va da  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Il range di funzionamento viene però limitato da software, per impedire configurazioni idrodinamicamente non corrette.

Riguardo alla tenuta stagna, i punti di tenuta stagna di VENUS possono essere classificati in tre gruppi:

- a tenuta fissa, con flange ad accoppiamento frontale: accoppiamenti fra i diversi elementi costituenti la Testa e la Coda, incluso quello fra disco di plexiglas e primo elemento della Testa;
- a tenuta fissa tangenziale (innesto): accoppiamenti del Corpo centrale con Testa e Coda;
- a tenuta radiale (rotante): penetrazioni degli assi dei timoni.

L'asse dell'elica di propulsione non è dotato di tenuta rotante, in quanto, come già osservato, l'accoppiamento motoriduttore–elica è realizzato mediante giunto magnetico stagno. La componente interna di quest'ultimo (fissata all'asse del riduttore) è chiusa da un copri-giunto la cui tenuta ricade nel primo gruppo.

Vengono di seguito elencati in dettaglio i componenti esterni del robot, con l'ausilio della **Fig. 3.2**.



**Figura 3.2** - Quadro di insieme del VENUS: disposizione sensori ed attuatori

Nel cilindro porta antenne sono collocati:

- *A1*: antenna WiFi;
- *A2*: modulo GPS con antenna integrata sul chip;
- *Lw*, *Lr*: LED di segnalazione della corretta sequenza di collegamento dei due connettori (lato alimentatori) del cavo esterno per la carica delle batterie;

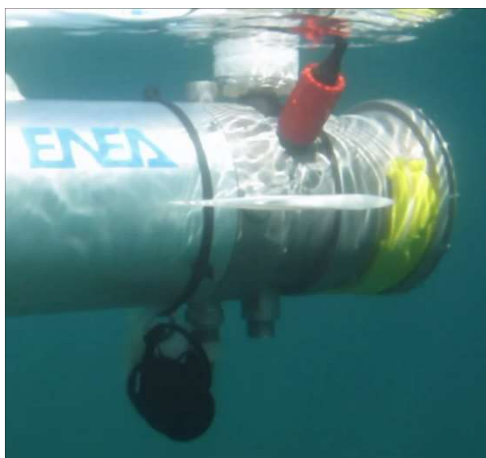
- *SOG (Segnalazione Oggetti Galleggianti)*: gruppo di LED bianchi per la segnalazione della posizione del veicolo e la visualizzazione di un insieme di informazioni sullo stato di funzionamento dello stesso (LED acceso fisso: veicolo spento o guasto; LED lampeggiante: stato operativo);

Nella testa sono collocati:

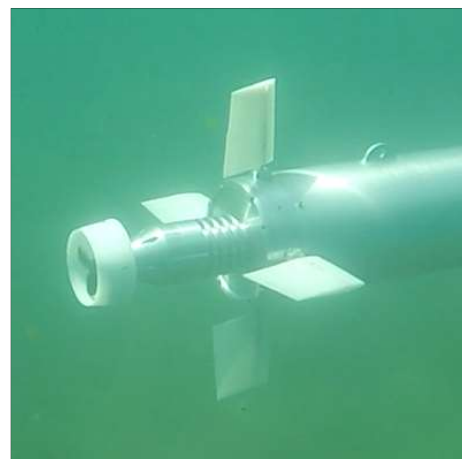
- *FARI*: sei fari a LED
- *Lb, Ls*: LED stato di carica batterie/stato del sistema (*Ls* acceso: presenza di allarmi).

Nel corpo centrale ed in coda al veicolo, procedendo da prua verso poppa, sono situati:

- *S0*: sonar panoramico. Collocato inferiormente al vessel è configurabile in modalità panoramica (montaggio secondo il piano di giacenza orizzontale al veicolo, **Fig. 3.2** - scansione completa su tutti i 360° disponibili) o come profilatore di fondale (montaggio secondo il piano di giacenza verticale al veicolo, **Fig. 3.3a** - scansione parziale su un range di 180°). In entrambi i casi il sonar è impiegabile anche ai fini dell'*obstacle avoidance*;
- *Cb*: connettore multipolare stagno per la carica delle batterie. Come indicato in precedenza (*Lw/Lr*), il cavo esterno di ricarica è dotato, dal lato della connessione con gli alimentatori, di due connettori distinti.
- "*I*" rossa, "*O*" nera: serigrafie in corrispondenza alla coppia di interruttori magnetici interni (rispettivamente *ON* e *OFF*); azionati dall'esterno per mezzo di un magnete, provvedono all'accensione e allo spegnimento dell'elettronica del sistema;
- *T1 – T6*: timoni;
- *P0*: trasduttore di pressione (*profondimetro*)
- *MOT*: propulsore elettrico *brushless trifase*.



(a)

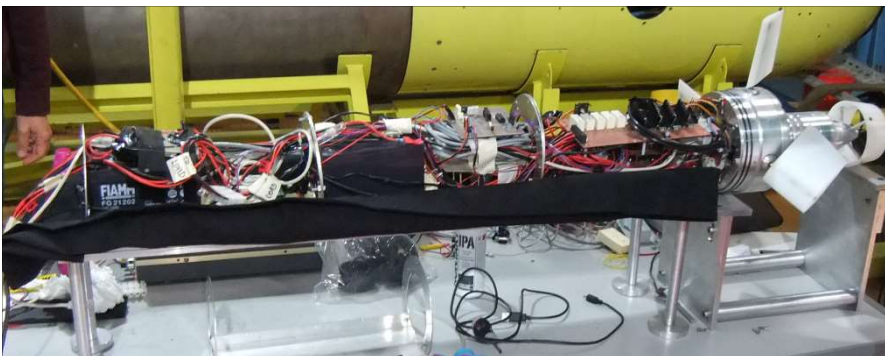


(b)

**Figura 3.3** – Dettagli costruttivi della prua (a) e della poppa (b)



- *Scheda sensori n.1 [S-SENSI]*, deputata a raccogliere i dati provenienti dai sensori di bordo necessari al controllo di navigazione e ad attuare i movimenti sulle pinne;
- *Bussola elettronica [COMPASS]*, dispositivo digitale che legge la direzione di marcia del veicolo rispetto al nord secondo un angolo compreso tra 0 e 359,9°;
- *Scheda di controllo della navigazione [S-GUM]*, che si occupa del *processing* di tutti i dati inerenti alla navigazione, inclusi quelli provenienti dall'IMU, tramite *computer-embedded [eC1]*, nonché di monitorare la temperatura e l'umidità interna [H0]; si interfaccia con gli attuatori delle pinne e con la scheda di controllo del propulsore a bordo della [S-MOT];
- *Unità di misura inerziale [IMU]*, sensore a nove assi (accelerometri, giroscopi e magnetometri) a rilevazione multipla sui tre assi cartesiani ( $x$ ,  $y$  e  $z$ );
- *Scheda di controllo motore [S-MOT]*, gestisce il propulsore, noti opportuni parametri (direzione di marcia, velocità di rotazione, frenatura motore), restituendo alla scheda di controllo della navigazione [S-GUM] eventuali anomalie o allarmi;
- *Scheda di interconnessione [S-CONN]*, realizza i collegamenti finali del sensore [P0] e degli attuatori esterni [T1, T2, T3, T4, T5 e T6] con tutta l'elettronica che raccoglie i dati e gestisce i movimenti necessari alla navigazione ([S-SENSI]);
- *Scheda di testa [S-HEAD]*, si interfaccia con tutte le periferiche connesse a prua, occupandosi al contempo del *processing* dei dati diversi dalla navigazione tramite *computer-embedded [eC2]* e provvedendo alla comunicazione con l'operatore esterno mediante WiFi [2];
- *Schede di supporto fari [LED1 e LED2]*, svolgono una triplice funzione: rendere disponibili le piste per la corretta alimentazione dei LED, offrire supporto meccanico alle lenti che aprono il flusso luminoso del singolo LED e garantire una continua dissipazione termica tra *pad* termico del singolo LED e struttura metallica del vessel;
- *Modulo di rilevazione della posizione globale [GPS]*, che fornisce le coordinate di latitudine e longitudine, quando in vista dei satelliti (quindi solo a veicolo emerso) al *computer-embedded* a cui è collegato [eC2];
- *Webcam [Left / Right]*, videocamere a regolazione automatica e ad alta risoluzione che consentono la cattura di singoli fotogrammi stereoscopici o la registrazione di video in *full-HD*.



**Figura 4.2** – Elettronica prototipale

## 5. Test Sperimentali

### 5.1 Laboratorio

Il Laboratorio di Robotica è dotato di una piscina lunga 7 m, larga 2,4 m e profonda circa 1 m, già impiegata per caratterizzare mini AUV [4].

Nonostante le limitate dimensioni non consentano di effettuare significativi test di navigazione per un veicolo delle dimensioni di VENUS, la piscina è stata usata per condurre i primi test su assetto statico e funzionamento dei dispositivi di bordo. Si è inoltre dimostrata utile per le prove di impermeabilità immediatamente successive ad ogni apertura/chiusura del veicolo (interventi di modifica o manutenzione) e per dei brevissimi lanci in immersione, effettuati per verifiche preliminari dell'assetto dinamico o a fini dimostrativi.

L'assetto statico di VENUS è, da progetto, lievemente positivo, per la semplice considerazione che in questo modo la riemersione del robot è garantita anche in caso di arresto del motore per avaria.

La determinazione esatta dell'assetto è particolarmente delicata perché, non essendo il veicolo dotato di casse di compensazione (**Cap. 2**), le fasi di immersione ed emersione sono governate esclusivamente dalle spinte che agiscono sui timoni di profondità, i cui effetti idrodinamici sono a loro volta dipendenti dalla superficie delle pinne e dalla spinta del motore. Tali azioni devono essere in grado di vincere la spinta positiva (*buoyancy*) a riposo del veicolo, che pertanto dev'essere la minima possibile compatibilmente con le esigenze di sicurezza appena ricordate. Una *buoyancy* elevata comporterebbe l'aumento della superficie delle pinne e/o della potenza richiesta al motore.

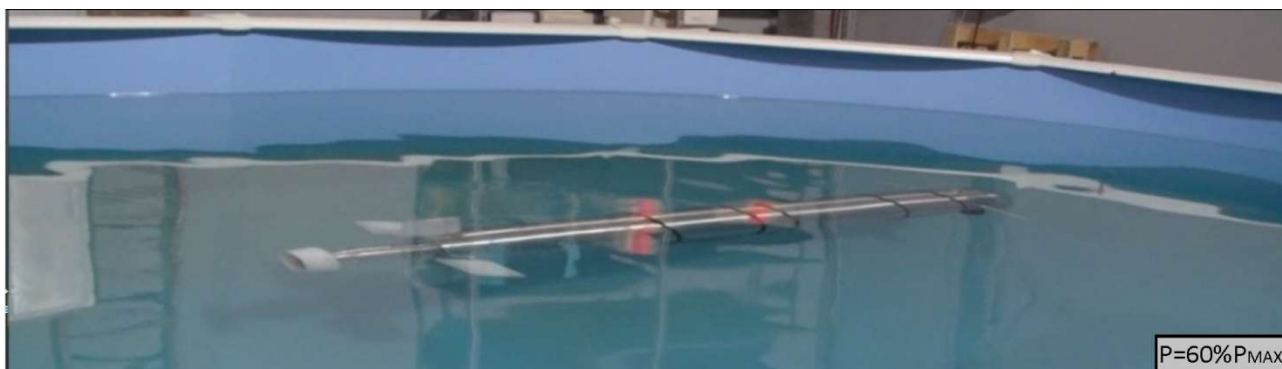
Per ottenere l'assetto desiderato si è proceduto inserendo inizialmente, all'interno del *vessel*, una zavorra minima determinata da calcoli di prima approssimazione basati sul volume e sul peso del veicolo, e procedendo quindi all'aggiunta di pesi esterni (fissati mediante le fascette nere visibili in **Fig. 5.1**) fino al raggiungimento di una condizione soddisfacente. Particolare cura è stata posta nella disposizione assiale della zavorra, in quanto la facilità di immersione è fortemente influenzata dal bilanciamento fra prua e poppa (vedi anche [3]). La zavorra aggiunta è stata infine spostata all'interno dello scafo, rispettando la disposizione assiale.

È da notare che, nelle successive prove in acque libere (lago di Bracciano), si è osservata una positività del veicolo leggermente superiore. Ciò ha richiesto uno zavorramento di qualche decina di grammi maggiore, al fine di ottenere lo stesso comportamento statico e dinamico osservato in piscina.

Il raggiungimento di una corretta regolazione assiale dell'assetto è stato confermato dall'esecuzione di diversi lanci nei quali il robot si è brevemente immerso: col veicolo non bilanciato in maniera ottimale è infatti impossibile ottenere l'immersione nei ridotti spazi a disposizione. L'influenza del bilanciamento è stata confermata, in diverse occasioni, dalle prove in acque libere.

In piscina si riesce ad effettuare prove della durata complessiva di una decina di secondi e l'immersione completa si ottiene dopo circa 7 secondi, a due terzi del percorso, come riscontrabile in **Fig. 5.1**.

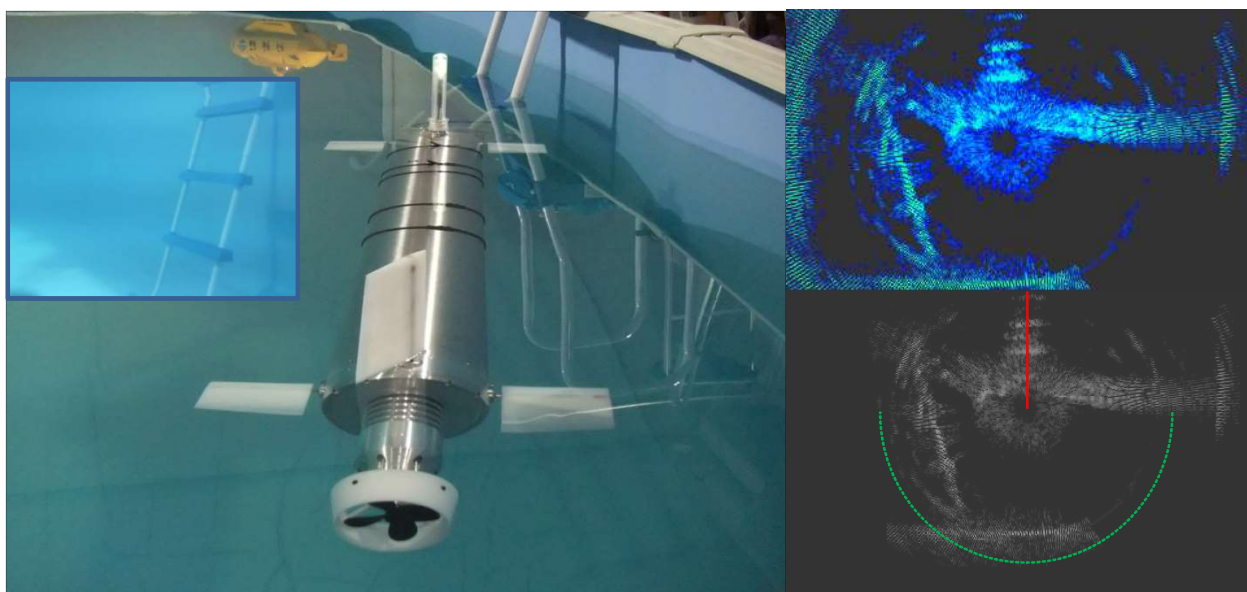
La potenza richiesta al motore, con lo zavorramento e l'assetto impostati, non dev'essere inferiore al 60% della massima.



**Figura 5.1** – Fotogramma relativo all'istante in cui il VENUS risulta completamente immerso

Nelle prove in piscina è stato verificato il corretto funzionamento dell'elettronica di bordo, nonché del collegamento WiFi con la Stazione di Controllo remota (**Cap. 2**).

In **Fig. 5.2** sono riportati due differenti profili acustici del sonar ed una acquisizione ottica della telecamera sinistra relativa alla stessa inquadratura.



**Figura 5.2** – Acquisizioni ottiche (particolare a sinistra) e acustiche (riquadri a destra)

Le acquisizioni acustiche sono visualizzate per mezzo dell'interfaccia sviluppata da M. Martinelli [5], che opera sulla Stazione di Controllo Remota. Sono raffigurate le due possibili colorazioni visualizzabili (quella in gradazioni di blu risulta di più immediata lettura rispetto a quella in gradazioni di grigio, in quanto vengono meglio evidenziati gli echi a maggiore intensità).

La configurazione meccanica del sonar (*S0* in **Fig. 3.2**) è quella relativa al montaggio come profilatore di fondale, collocato quindi secondo il piano di giacenza verticale del veicolo (**Cap. 3, Fig. 3.3a**), ma senza la limitazione della scansione ad un range di  $180^\circ$  (quindi non solo secondo l'arco verde di 1 m di raggio tratteggiato in **Fig.5.2**, ma estesa a tutti i  $360^\circ$ ).

In entrambe le immagini acustiche acquisite, sono ben visibili il fondo della piscina in basso, il profilo della scala sulla sinistra, il timone del veicolo sulla destra e le riflessioni della struttura del vessel in alto. La verticale evidenziata in rosso, con origine sull'asse di rotazione del trasduttore del sonar, evidenzia la direzione di minore distanza tra sonar e vessel, lungo la quale si presentano le riflessioni multiple.

## 5.2 Acque libere

Un primo gruppo di prove nel lago di Bracciano ha riguardato le verifiche di tenuta stagna del vessel. Le prove effettuate in piscina, infatti, pur valide per la verifica dell'assenza di difetti grossolani, non possono essere ritenute altrettanto valide in ambiente operativo, a causa della maggior pressione esercitata sulle tenute con l'aumentare della profondità.

Le prove si sono concentrate sui tre gruppi di tenute descritte nel **Cap. 3**, essendo le parti strutturali di VENUS (elementi di Testa e Coda, Corpo Centrale) ampiamente dimensionate per le profondità di progetto.

Partendo da questa considerazione si è inoltre realizzato, a partire dalla stessa tubazione standard (**Cap. 3**), un corpo di pressurizzazione lungo circa 0.5 m (**Fig. 5.3**), parecchio più corto di quello di progetto.

Questa soluzione ha notevolmente facilitato l'esecuzione delle prove. Queste sono state infatti effettuate calando a mano lo scafo, per mezzo di due cime fissate ai golfari di sollevamento, fino ad una profondità di circa 40 m.



**Figura 5.3** – Vessel 'ridotto' per le prove di tenuta

Nelle prime prove si sono avuti copiosi ingressi d'acqua. Si è allora proceduto ad una radicale revisione delle tenute dei primi due gruppi, verificandone la rispondenza alle normative sulle dimensioni degli *o-ring* e delle relative sedi, ed effettuando le necessarie modifiche nell'Officina meccanica del Laboratorio (F. Marianecchi).

Discorso a parte richiedono le tenute del terzo gruppo (penetrazioni alberini pinne). Quelle attualmente montate sono caratterizzate da una limitata resistenza alla pressione differenziale. La loro sostituzione con tenute dalle caratteristiche adeguate avrebbe comportato il rifacimento degli alberini, con conseguente aumento del relativo diametro e necessaria riprogettazione delle pinne, nonché l'allargamento delle penetrazioni nello scafo. Queste operazioni sono state rinviate ad una versione successiva del veicolo.

Le prove successive alle modifiche hanno comunque permesso di stabilire l'assenza di infiltrazioni d'acqua fino a profondità di 25 m circa, quota al di sotto della quale la tenuta non è più garantita. A profondità di 40 m l'infiltrazione è certa.

Le attuali tenute sulle penetrazioni delle pinne costituiscono il principale limite al raggiungimento delle profondità di progetto di VENUS. Si tratta comunque di un problema ben noto e risolvibile.

Le prove di navigazione di cui si dà conto in [3], peraltro effettuate con un margine di sicurezza molto ampio (profondità entro i 10 m), non hanno mai evidenziato problemi di tenuta.

In una seconda fase, dopo aver effettuato le verifiche e le regolazioni di cui al §5.1, sono iniziati i test in acque libere del VENUS nel suo assetto definitivo, con lo scopo di verificarne il comportamento in un possibile ambiente operativo (Fig. 5.4)



**Figura 5.4** – Lago di Bracciano – ambiente operativo per le prove in acque libere

La prima sessione di prove si è svolta, in data 04/04/2016, in uno specchio d'acqua in prossimità di Trevignano, col supporto della Società Hydra Ricerche, che ha fornito le barche appoggio ed un operatore subacqueo per l'effettuazione di riprese video e la gestione di eventuali emergenze.



**Figura 5.5** –Una delle prime prove nel lago di Bracciano

La procedura di test prevedeva l'esecuzione di una sequenza di traiettorie preimpostate, secondo una modalità caratterizzata dall'assenza di retroazione di direzione e profondità (a loop aperto; i relativi controlli non erano stati ancora sviluppati – vedi [3]).

La modalità in oggetto consiste nell'impostare una serie di tratti, prefissando, per ciascuno di essi, l'inclinazione delle singole pinne ed il tempo di esecuzione. I tratti vengono eseguiti consecutivamente.

Per ogni tratto, la potenza del propulsore era stata fissata, una volta per tutte, al 60% della massima.

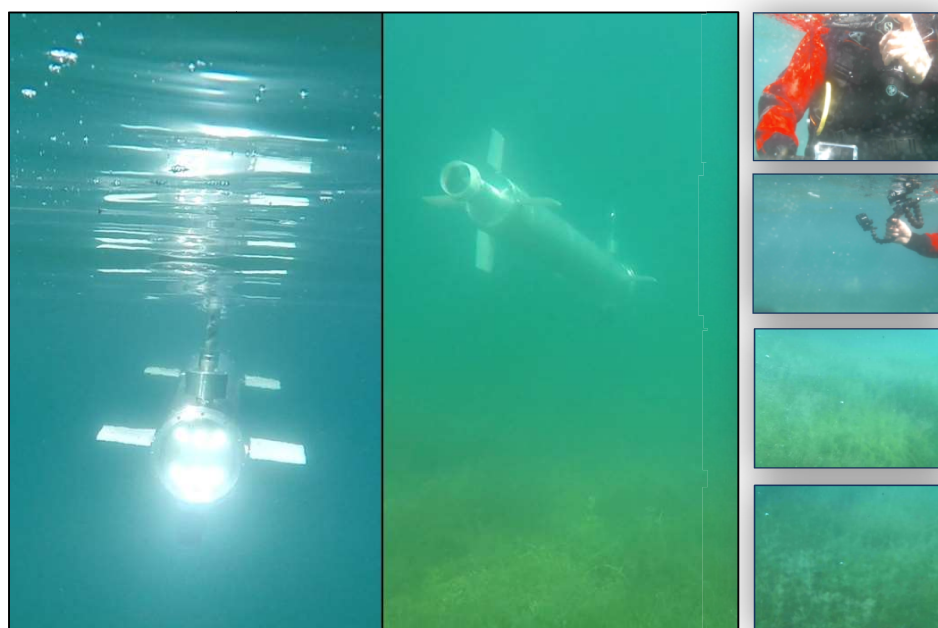
I lanci di prova sono stati gestiti mediante la prima delle interfacce grafiche citate nel **Cap. 2**, dalla Stazione di Controllo Remoto installata su una delle barche appoggio.

Alla riemersione del mezzo, dopo ciascun lancio, è stato effettuato il download delle registrazioni delle telecamere di bordo e dei dati della bussola.

Le varie fasi di test sono state filmate dall'operatore subacqueo di Hydra, dotato di *action-cam*. Le riprese video sono state confrontate, a posteriori, con i dati registrati dai sensori di bordo in corrispondenza delle varie traiettorie effettuate nel corso dei test.

È stato possibile effettuare diverse immersioni a qualche metro di profondità, che hanno confermato, in condizioni operative, quanto emerso nei test in piscina riguardo all'assetto del veicolo ed al corretto funzionamento dei suoi componenti.

In **Fig. 5.6** si riportano due inquadrature riprese dall'operatore esterno e, nei riquadri piccoli sulla destra, alcuni fotogrammi acquisiti dalle telecamere a bordo del veicolo.



**Figura 5.6** – Prime immersioni al lago di Bracciano

Un'importante osservazione conseguente alle prove effettuate riguarda il collegamento WiFi, che perde di affidabilità passando dalla piscina al lago; il limite massimo, infatti, oltre il quale non è possibile spingersi col collegamento è di circa 30 m nelle condizioni più sfavorevoli (presenza di moto ondoso, coppia di dispositivi WiFi collocati in posizioni reciproche sfavorevoli) e questo probabilmente a causa delle riflessioni delle onde radio sulla superficie dell'acqua (vedi anche [6]).

## 6. Considerazioni finali

Sono stati presentati la genesi e lo sviluppo di VENUS, sistema robotico sottomarino interamente progettato dal Laboratorio di Robotica dell'ENEA – DTE-SEN-IDRA, con lo scopo di svolgere in autonomia compiti di ricerca, monitoraggio e sorveglianza subacquea.

Il veicolo è stato realizzato nel Laboratorio di elettronica e nell'officina meccanica interni, ad eccezione di quei componenti meccanici non realizzabili con i macchinari a disposizione, la cui costruzione è stata pertanto affidata ad officine esterne.

Nel presente documento sono state illustrate la struttura meccanica del veicolo, l'architettura del sistema elettronico ed i relativi sensori/attuatori installati per la navigazione e per lo svolgimento delle missioni previste.

Sono stati descritti, inoltre, i test di funzionamento *preliminari*, condotti sia nella piscina del Laboratorio che in acque libere, e le azioni correttive del progetto da esse derivate.

Si ritiene che queste prime prove sperimentali dimostrino la fattibilità del progetto nel rispetto delle specifiche iniziali, con particolare riguardo ai criteri di semplicità costruttiva, economia e modularità enunciati in apertura.

Gli aspetti di programmazione e funzionamento sono estesamente trattati in [2] e [3], dove vengono illustrati rispettivamente la programmazione dei dispositivi interni e lo sviluppo del Sistema di Controllo.

In tali documenti vengono inoltre descritte le prove di funzionamento in acque libere che mostrano la capacità di VENUS di soddisfare agli obiettivi progettuali.

## 7. Bibliografia

- [1] F. Cavallini – “Small AUV – VENUS (Veicolo per la Navigazione sUbacquea e la Sorveglianza)”, ENEA – Febbraio 2010
- [2] G. Cupertino – “VENUS – Veicolo per Navigazione Subacquea e Sorveglianza – Programmazione di Base - Test Preliminari” – ENEA, 2020
- [3] P. A. Fichera – “VENUS – Veicolo per Navigazione Subacquea e Sorveglianza – Sistema di Controllo – Prove Sperimentali”, ENEA, RT/2020/9/ENEA, Maggio 2020
- [4] G. Cupertino, R. Dell’Erba, G. Sagratella – “A procedure to estimate the hydrodynamic parameters of an autonomous under water vehicle (AUV)”, EAI/ENEA n. 1-2/2011 – Gennaio - Aprile 2011
- [5] M. Martinelli – “Integrazione di sensori sonar per underwater SLAM” – Tesi di Laurea, Università ‘La Sapienza’ - Roma, 2012
- [6] S. Chiesa, S. Taraglio – “Sistema sperimentale per l’utilizzo di sonar subacquei”, ENEA, RT/2020/3/ENEA, Febbraio 2020

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
luglio 2020