

Capitolo 3

Progetto dell'apparato sperimentale

Come è stato detto nel capitolo precedente, è necessario caratterizzare il sito scelto dalla collaborazione NEMO per l'installazione di un telescopio Čerenkov sottomarino attraverso diversi parametri ottici ed ambientali. In questo capitolo si descriverà l'apparato che è stato realizzato durante il lavoro di tesi, discutendo delle scelte che sono state fatte in fase di progetto. Si descriveranno gli strumenti che costituiscono l'apparato e il loro funzionamento.

3.1 Strumento autonomo per misure abissali protratte su tempi lunghi

Con il lavoro di tesi si è realizzato un apparato autonomo sottomarino che eseguirà, entro breve termine, misure nel sito sottomarino di Capo Passero, a 3000 metri di profondità. Tale apparato rimarrà in profondità per tempi lunghi - dell'ordine di un anno - acquisendo dati di *biofouling*, correnti sottomarine, temperatura, conducibilità e pressione.

L'obiettivo fissato all'inizio del lavoro è stato la realizzazione di un apparato in grado di funzionare autonomamente (in inglese *stand-alone*), capace

di compiere misure e memorizzare dati a intervalli regolari per un lungo lasso di tempo. Nel capitolo precedente si è parlato dei parametri ottici e ambientali che è necessario caratterizzare con opportune misure in situ per il corretto funzionamento di un telescopio Čerenkov sottomarino. Per realizzare tali misurazioni vengono utilizzate diverse apparecchiature, ciascuna dedicata ad una particolare misura. Tutta la strumentazione che costituisce l'apparato viene gestita da un unico elaboratore elettronico centrale. Tale elaboratore ha il compito di pilotare le funzioni svolte dalle apparecchiature connesse e di gestire il salvataggio dei dati su un supporto idoneo.

Lo schema a blocchi di figura 3.1 mostra gli elementi che costituiscono l'apparato e la tipologia delle connessioni fra i diversi blocchi. Nel paragrafo successivo saranno descritti in maniera dettagliata gli strumenti che eseguono le misure di *biofouling*, di correnti sottomarine, di conducibilità elettrica, di pressione e di temperatura; sarà descritto anche il modem acustico, un'interfaccia per comunicare con l'apparato, dalla superficie del mare, quando questo è in funzione in profondità.

Single Board Computer VIPER-400-M64-F32 Arcom

Dalla figura 3.1, si osserva che tutto l'apparato viene gestito da un calcolatore, opportunamente scelto, che comunica con la strumentazione attraverso porte seriali, linee digitali di uscita e utilizzando il bus standard PC/104. Il calcolatore utilizzato è il modello VIPER-400-M64-F32 della ditta ARCOM [web10]. L'unità centrale di elaborazione VIPER è un *Single Board Computer* (SBC) compatibile con lo standard PC/104 basato su un processore a 400 MHz della Intel (si veda la figura 3.2). È stato sviluppato per funzionare in condizioni di disponibilità limitata di energia, in ambienti con spazi molto ridotti, per applicazioni nel settore delle comunicazioni. Le caratteristiche principali della scheda VIPER, rilevanti per la nostra applicazione, sono le seguenti:

- è basata su un processore a 400 MHz;
- è fornita di cinque porte seriali;

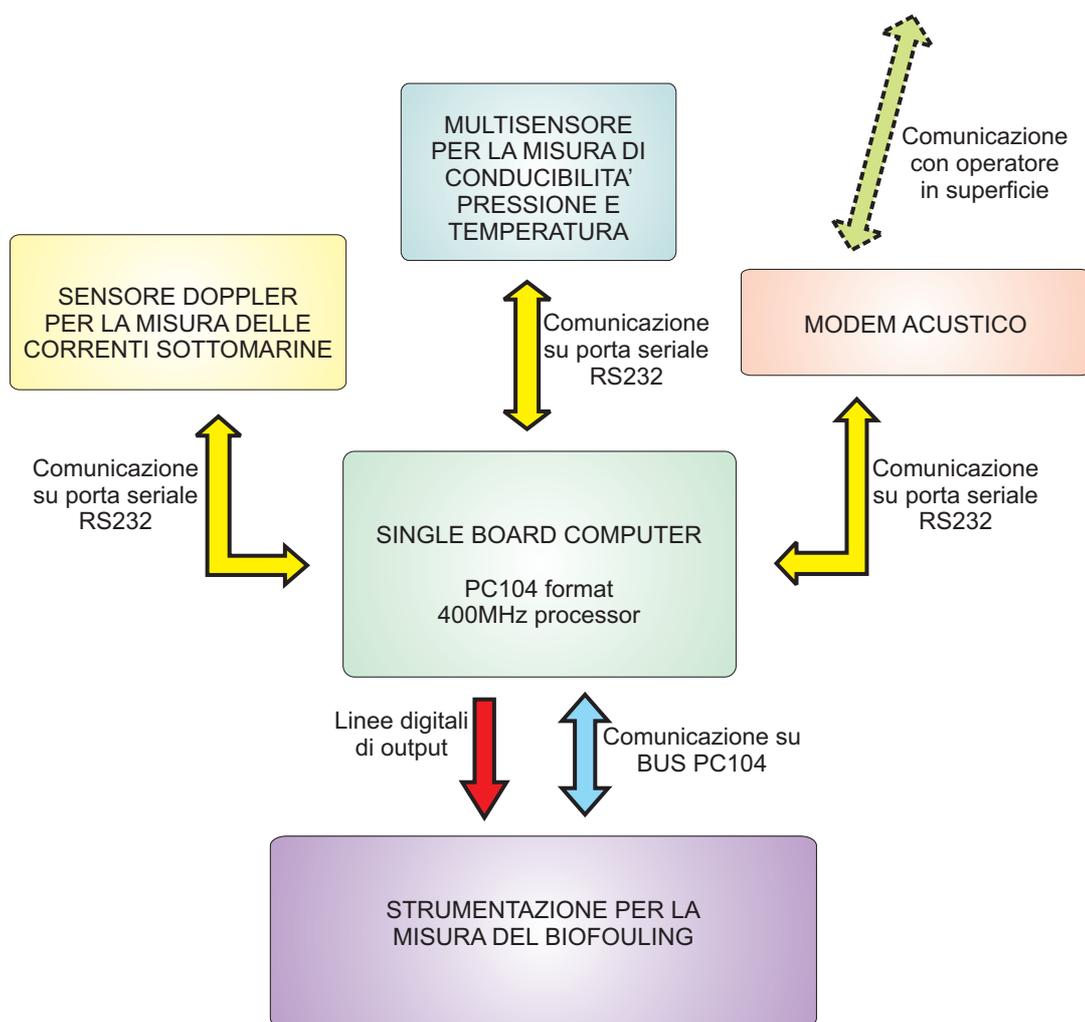


Figura 3.1: Schema a blocchi dell'apparato autonomo di misura del *biofouling* e di altri parametri ambientali.

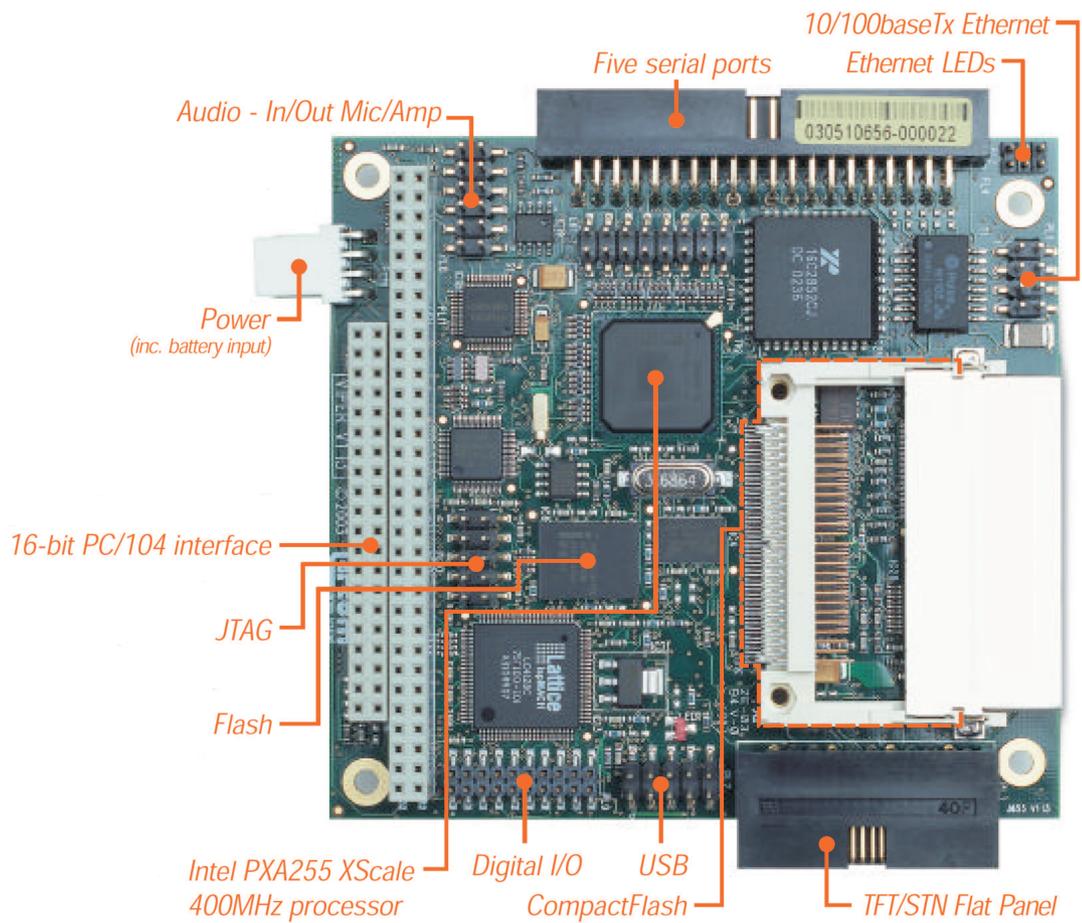


Figura 3.2: Scheda VIPER-400-M64-F32 della ARCOM, dimensioni 96 mm×91 mm. Sono evidenziati i componenti principali.

- è dotata di una porta *Ethernet*;
- rende disponibili all'utente otto linee digitali di ingresso e altrettante linee di uscita (*General Purpose I/O* - GPIO);
- supporta le memorie *Compact Flash* (CF);
- permette espansioni attraverso il bus dello standard PC/104;
- monta un sistema operativo *Linux*;
- ha dimensioni e peso contenuti: 96 mm × 91 mm per 96 grammi;
- i suoi consumi sono assai ridotti: 320 mA a 5 V (1.6 W) quando è accesa, 40 mA a 5 V (200 mW) in pausa (o *stand-by*, in inglese).

I consumi molto ridotti e il buon numero di connessioni disponibili rendono idonea la scheda VIPER ad essere utilizzata per la gestione di un apparato che deve funzionare in maniera autonoma e in condizioni di permanenza prolungata in un ambiente dove la disponibilità di energia elettrica è limitata in quantità. L'apparato sarà alimentato, durante il periodo di presa dati nel sito sottomarino, da batterie; in queste condizioni, è fondamentale limitare l'energia richiesta da ogni singolo componente per il proprio funzionamento, e altresì stimare accuratamente l'energia necessaria.

Escludendo la strumentazione per la misura del biofouling di cui si parlerà nel dettaglio in seguito, il *Single Board Computer* gestisce le periferiche attraverso la comunicazione bidirezionale su porta seriale RS232, come mostrato in figura 3.1. È stato necessario sviluppare un'opportuna applicazione software che, eseguita in un ambiente Linux, permettesse lo svolgimento di tale comunicazione. È stato utilizzato il linguaggio di programmazione C per sviluppare tutte le applicazioni necessarie.

L'interfaccia seriale RS-232

L'interfaccia seriale RS232 permette lo scambio di dati tra dispositivi digitali, utilizzando un protocollo seriale di tipo asincrono. Per *seriale* si intende che i

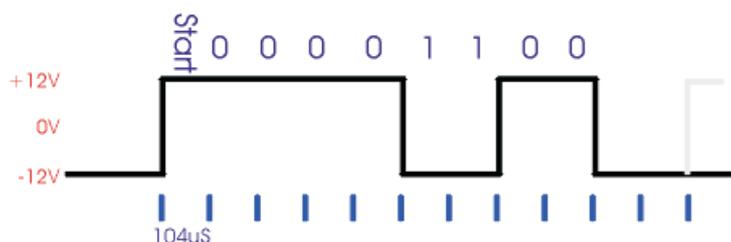


Figura 3.3: Rappresentazione idealizzata del segnale trasmesso su una linea RS232. Baud rate = 9600, viene trasmesso il valore binario 00001100.

bit che costituiscono l'informazione sono trasmessi uno alla volta su una sola linea elettrica; *asincrono* significa che i dati sono trasmessi senza l'aggiunta di un segnale di clock, il segnale comune che permette di sincronizzare la trasmissione con la ricezione.

L'unità di misura della velocità di trasmissione è il *baud rate*. Il baud rate indica il numero di transizioni al secondo che avvengono sulla linea; nel caso di trasmissione binaria, ed è tale la trasmissione seriale RS232, il baud rate coincide col numero di bit trasmessi al secondo sulla linea. Lo standard RS232 permette una trasmissione *full-duplex*: tale termine indica che la trasmissione è bidirezionale e contemporanea. Ciò implica l'utilizzo di due linee distinte per la trasmissione contemporanea dell'informazione digitale nei due sensi: una dedicata alla ricezione del segnale (*Rx*) e una alla trasmissione (*Tx*). In aggiunta alle linee Rx e Tx è necessaria una linea di massa (*GND*) a cui sono riferite le tensioni presenti.

La tensione di uscita per un trasmettitore RS232 è compresa, in valore assoluto, tra 5 e 25 V. Un segnale positivo, tipicamente +12 V, rappresenta lo "0" logico; un segnale negativo, -12 V, rappresenta l'"1" logico. In figura 3.3 è mostrato un esempio di trasmissione seriale a 9600 baud rate: ogni bit è trasmesso attraverso un valore positivo o negativo di tensione di durata $T = \frac{1}{9600}s = 104\mu s$.

Lo standard di comunicazione seriale RS232 prevede anche altre linee, oltre alle già citate Rx, Tx e GND, utilizzate per il controllo hardware della comunicazione. Nel nostro caso, tutte le connessioni agli strumenti dell'apparato sono gestite senza utilizzare controlli di tipo hardware del flusso dati.

Tutte le connessioni RS232 si intenderanno formate dalle sole linee Rx, Tx e GND.

In appendice A è mostrato come esempio il codice di un programma che gestisce le comunicazioni su porta seriale. Tramite tale applicazione è possibile pilotare una predefinita porta seriale, settando le impostazioni di porta in maniera compatibile con la strumentazione collegata (velocità di Baud rate, controllo di flusso dati, bit di stop, controllo parità). Il programma definisce dei codici di errore che vengono utilizzati per verificare l'avvenuta comunicazione con la periferica connessa. Viene definito, inoltre, un tempo di attesa massima per la lettura su porta seriale (in inglese *time-out*): tramite tale parametro è possibile gestire correttamente le situazioni di mancata trasmissione dati. Il programma in appendice A utilizza due sotto-programmi (o *routine*) per eseguire la scrittura e la lettura su porta seriale. La routine "scrittura_seriale" invia sulla porta seriale, indirizzata da un opportuno puntatore, una stringa di caratteri di lunghezza fissata, che la routine riceve dal programma principale (*main*); la routine "lettura_seriale" attende, per un tempo fissato dal *time-out*, un flusso di caratteri di lunghezza variabile e restituisce al programma principale la stringa letta su porta seriale e la lunghezza di tale stringa. Tramite queste due routine e attraverso il settaggio di tutti i parametri è possibile gestire le comunicazioni della scheda VIPER con tutte le periferiche connesse su porte seriali.

Il programma in appendice A è un esempio di comunicazione sulla porta seriale COM3: vengono settate inizialmente le impostazioni di porta (baud rate = 4800, 2 bit di stop, controllo di flusso disabilitato, 2 secondi di *time-out*); successivamente viene inviato un carattere su porta seriale (routine "scrittura_seriale") e in risposta si attende la ricezione di una stringa formata da tre caratteri (routine "lettura_seriale"). Come si mostrerà più in seguito, attraverso tale applicazione è possibile eseguire tutte le operazioni indispensabili alla comunicazione con le periferiche connesse tramite porta seriale.

3.2 Gli strumenti collegati alla stazione

Gli strumenti connessi tramite porta seriale al *Single Board Computer* sono un correntometro doppler, un multisensore di temperatura, pressione e conducibilità ed un modem acustico. Essi sono stati assemblati e testati singolarmente presso i laboratori del Dipartimento di Fisica; è stata verificata la funzionalità della loro gestione tramite l'elaboratore centrale SBC. In questo paragrafo ogni strumento è descritto nei suoi dettagli.

3.2.1 Correntometro Doppler 3820R Aanderaa

Per misurare le correnti sottomarine viene usato il correntometro doppler (*Doppler Current Sensor - DCS*) 3820R della Aanderaa mostrato in figura 3.4 [web11].

Il correntometro in questione, che può funzionare fino ad una profondità di 6000 metri, utilizza il principio dello spostamento Doppler come base per le sue misure. Il DCS 3820R trasmette impulsi acustici di una frequenza fissata (2 MHz) nell'acqua in cui è immerso. Propagandosi nel mezzo, i pacchetti acustici possono incontrare del particolato o piccole bolle d'aria presenti nel mezzo che riflettono una porzione dell'energia acustica. I trasduttori presenti sul correntometro rivelano l'energia diffusa all'indietro da una massa d'acqua localizzata in una regione compresa fra 0.4 e 2.2 metri di distanza e analizzano tali pacchetti acustici per trovare eventuali variazioni nella frequenza (si veda la figura 3.5). La rivelazione di un aumento della frequenza viene interpretato come un movimento del particolato verso il sensore; viceversa, una diminuzione della frequenza indica che il particolato si allontana dal sensore (effetto Doppler).

Il DCS viene utilizzato in posizione verticale; emette i pacchetti acustici nel piano ortogonale alla verticale, lungo due direzioni ortogonali tra loro in entrambi i versi: il correntometro emette, dunque, quattro serie di pacchetti acustici nel piano parallelo all'orizzontale. Dopo aver eseguito la lettura di una bussola interna allo strumento, il correntometro è in grado di determinare la direzione e il modulo della velocità della corrente, avendo misurato le componenti lungo due direzioni orizzontali ortogonali fra loro. Il correntome-



Figura 3.4: Correntometro Doppler 3820R della Aanderaa. Sono mostrate le dimensioni principali.

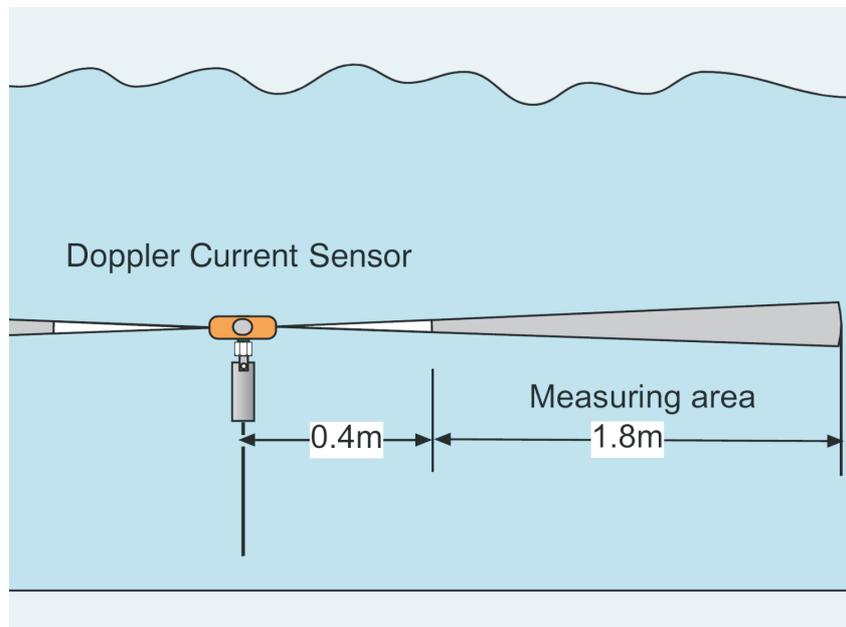


Figura 3.5: Il DCS 3820R della Aanderaa rivela l'energia acustica diffusa all'indietro in un raggio compreso fra 0.4 e 2.2 metri di distanza.

tro utilizzato non misura la componente verticale delle correnti sottomarine, ma tale aspetto è trascurabile in quanto le correnti sottomarine sono sempre quasi-orizzontali: la componente verticale è, almeno per il nostro studio, quasi sempre trascurabile.

Il DCS è dotato di un inclinometro interno, che misura l'inclinazione rispetto alla verticale: la presenza di correnti sottomarine può spostare lo strumento dalla sua posizione originaria. In tal caso, è necessario conoscere l'inclinazione al fine di ricostruire correttamente la componente orizzontale della corrente sottomarina.

Si elencano di seguito le proprietà principali del correntometro 3820R:

- l'intervallo del modulo delle correnti misurabili è compreso fra 0 e 300 cm/s;
- la deviazione standard sulla misura del modulo della velocità è di 0.55 cm/s;

- la direzione della corrente è data rispetto al nord nell'intervallo tra 0 e 360°, con un'accuratezza di 5° per un'inclinazione compresa tra 0 e 15°, con un'accuratezza di 7.5° per un'inclinazione compresa tra 15 e 35°;
- l'inclinazione rispetto alla verticale è misurata nell'intervallo tra -35 e 45°, con un'accuratezza di 1.5°;
- emette pacchetti acustici della durata di 1 ms, di frequenza 2 MHz, con un consumo durante la fase di trasmissione pari a 25 W;
- deve essere alimentato con tensione continua tra 7 e 14 V;
- interfaccia seriale standard RS232.

Il correntometro comunica su porta seriale i dati acquisiti in due modalità: solo se interrogato (*Polled Output*) oppure ad una fissata frequenza di misura (*non Polled Output*) senza necessità di inviare una richiesta dati. Questa seconda modalità viene utilizzata, ad esempio, quando si vuole tenere sotto controllo la corrente sottomarina con continuità, avendo a disposizione un'alimentazione esterna. Il nostro caso è invece quello di un apparato stand-alone alimentato da un pacco batterie che deve acquisire dati per tempi dell'ordine di un anno. Come già detto, è necessario limitare i consumi di tutte le apparecchiature connesse. A tal fine, si utilizzerà la modalità *Polled Output*: si acquisiranno i dati ad intervalli regolari per tempi brevi, ad esempio ogni ora, solo dopo una previa richiesta da parte del *Single Board Computer*; il correntometro rimarrà in una modalità di basso consumo (o *stand-by*) senza emettere pacchetti acustici per la maggior parte del tempo. Nel capitolo 4 si descriverà in dettaglio il ciclo di acquisizione dati del DCS e nel capitolo 5 si mostrerà la stima dei consumi di tale strumento.

3.2.2 Multisensore Ocean Seven 316 CTD Idronaut

Il multisensore Ocean Seven 316 CTD mostrato in figura 3.6 della Idronaut viene utilizzato per le misure di conducibilità, temperatura e pressione (in inglese *Conductivity Temperature Depth* - CTD). Per maggiori informazioni

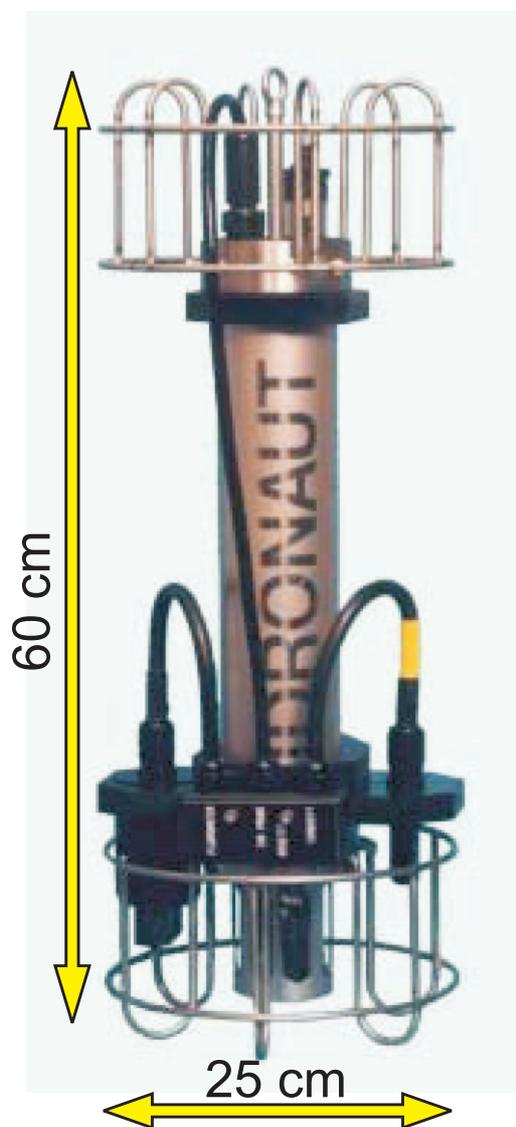


Figura 3.6: CTD Ocean Seven 316 della Idronaut. Si mostrano le dimensioni principali.

si può consultare [web12]. La comunicazione con il CTD avviene tramite porta seriale RS232. Si descrivono brevemente i sensori di cui è dotato lo strumento.

Il sensore di pressione è un manometro capace di generare un segnale lineare d'uscita, con una risoluzione di 2 dbar su un intervallo di misura di $0 \div 7000$ dbar.

Il sensore di temperatura è un termometro costituito da una resistenza di platino, inserita in un alloggiamento d'acciaio. L'intervallo di misura è di $-3 \div +50$ °C, con risoluzione di 0.0007 °C; il tempo di risposta è molto basso, ~ 50 ms.

Il sensore di conducibilità è una cella unica con sette anelli di platino posti nelle aperture di un tubo di quarzo. L'anello centrale è eccitato con una corrente alternata che fluisce verso entrambi gli anelli più esterni. Le due coppie di anelli adiacenti rivelano la differenza di tensione dovuta alla conducibilità elettrica dell'acqua. La conducibilità è misurata nell'intervallo di $0 \div 64$ mS/cm, con una risoluzione di 0.001 mS/cm.

La salinità è stata storicamente definita come la quantità di sali, misurata in grammi, contenuta in un chilogrammo di acqua. La determinazione diretta della salinità di un'acqua naturale, effettuata attraverso la misura della concentrazione di tutti i sali in essa disciolti, non può essere considerata come un metodo analitico pratico. Si ricorre ad un metodo indiretto basato sulla misura della conducibilità, della pressione e della temperatura, e sul confronto di tali parametri con quelli di una soluzione di riferimento. La salinità si ricava utilizzando l'algoritmo di calcolo, qui non riportato per brevità, definito in [FOF83].

3.2.3 Modem acustico

Il *Single Board Computer* viene connesso, tramite porta seriale RS232, al modem acustico ATM-877 della Datasonic, mostrato in figura 3.7. Il modem acustico sottomarino permette la comunicazione fra la strumentazione installata in profondità e una base operativa in superficie, permettendo una trasmissione di dati bidirezionale con un baud rate massimo di 2400 bit al



Figura 3.7: Modem acustico sottomarino ATM-877 Datasonic.

secondo, senza dover ricorrere ad una connessione via cavo. Il modem acustico è dotato di un trasduttore direzionale che è progettato per applicazioni in fondali marini, fino a 6000 metri di profondità.

Il SBC, che gestisce tutte le periferiche e riceve i dati relativi alle misure eseguite, trasferisce tali dati sulla memoria interna del modem. Periodicamente, un operatore che si porta nel punto in cui è installato l'apparato autonomo sottomarino può richiedere, tramite un opportuno modem di superficie, i dati raccolti dal modem. Si crea una comunicazione, attraverso la trasmissione di pacchetti acustici, tra il modem di profondità, connesso all'apparato, e un modem di superficie. Ad intervalli regolari, per esempio ogni mese, sarà possibile dunque interrogare il modem di profondità per avere i dati relativi alle misure effettuate dall'ultima comunicazione.

Esistono molti fattori che limitano le comunicazioni acustiche sottomarine. Attenuazioni del segnale sono dovute principalmente all'assorbimento del suono in acqua e alle interferenze legate alle riflessioni sul fondale marino e sulla superficie. Il modem acustico ATM-877 utilizza in fase di trasmissione delle tecniche di ridondanza, attraverso le quali è possibile eliminare gli errori dai dati trasmessi, a discapito della velocità effettiva di trasmissione.

Il modem acustico utilizza un'alimentazione esterna a +21 V (per la trasmissione e ricezione attraverso trasduttore acustico) e un'alimentazione a +6 V da batterie interne (per la gestione della comunicazione su porta seriale).

3.3 L'apparato di misura del *biofouling*

Per stimare l'andamento del *biofouling* nel sito sottomarino di Capo Passero è stato realizzato un apparato originale. Tale apparato intende rivelare la

variazione di trasparenza di una sfera Benthos simile a quelle utilizzate per contenere i PMT rivelatori di luce Čerenkov del telescopio di NEMO. Si vuole stimare tale variazione di trasparenza attraverso la misura della quantità di luce, proveniente da una sorgente nota esterna alla sfera Benthos, che riesca ad illuminare dei sensori posti all'interno della sfera stessa. L'apparato sarà dunque costituito essenzialmente da due parti: una sorgente luminosa controllata e una serie di rivelatori di luce posti all'interno di una sfera di vetro Benthos.

La figura 3.8 mostra schematicamente l'apparato di misura del *biofouling*. La sorgente luminosa è costituita da due LED blu, montati in un tubo di materiale plastico. All'interno di questa struttura, i LED sono alloggiati frontalmente a due "finestre" di vetro, due aperture nel cilindro di materiale plastico poste in corrispondenza della sfera di vetro, che consentono alla luce emessa dai LED di raggiungere la superficie della sfera Benthos. All'interno della sfera Benthos sono alloggiati 14 circuiti stampati fotorivelatori (*Photodiode Amplifier* - PHD), costituiti da un fotodiodo di silicio e da un amplificatore operazionale. I fotorivelatori sono applicati, tramite dei supporti adesivi, alla superficie interna della sfera e, attraverso del gel di silicone, sono accoppiati otticamente con la superficie interna della sfera. Sono posizionati inoltre due PHD di riferimento in prossimità dei due LED. La figura 3.9 mostra un dettaglio della superficie interna della sfera; i fotorivelatori sono stati fissati saldamente e la superficie dei fotodiodi è orientata verso l'esterno della sfera.

I 14 fotorivelatori applicati all'interno della sfera sono posti a differenti angoli rispetto alla verticale. La posizione di ogni PHD può essere identificata univocamente utilizzando le coordinate sferiche θ e ϕ (la terza coordinata r è superflua in quanto tutti i rivelatori sono posti su una superficie sferica). L'angolo θ , come è mostrato in figura 3.8, è stato fissato con la convenzione di porre $\theta = +90^\circ$ per il fotorivelatore rivolto verso l'alto, $\theta = 0^\circ$ per il PHD posto sull'orizzontale (o all' "equatore" della sfera), $\theta = -90^\circ$ per il fotorivelatore rivolto verso il basso. Dieci dei quattordici fotorivelatori sono stati posti sull'arco di cerchio meridiano individuato dal piano che contiene anche la sorgente luminosa ($\phi = 0^\circ$ per convenzione), equispaziati in angolo

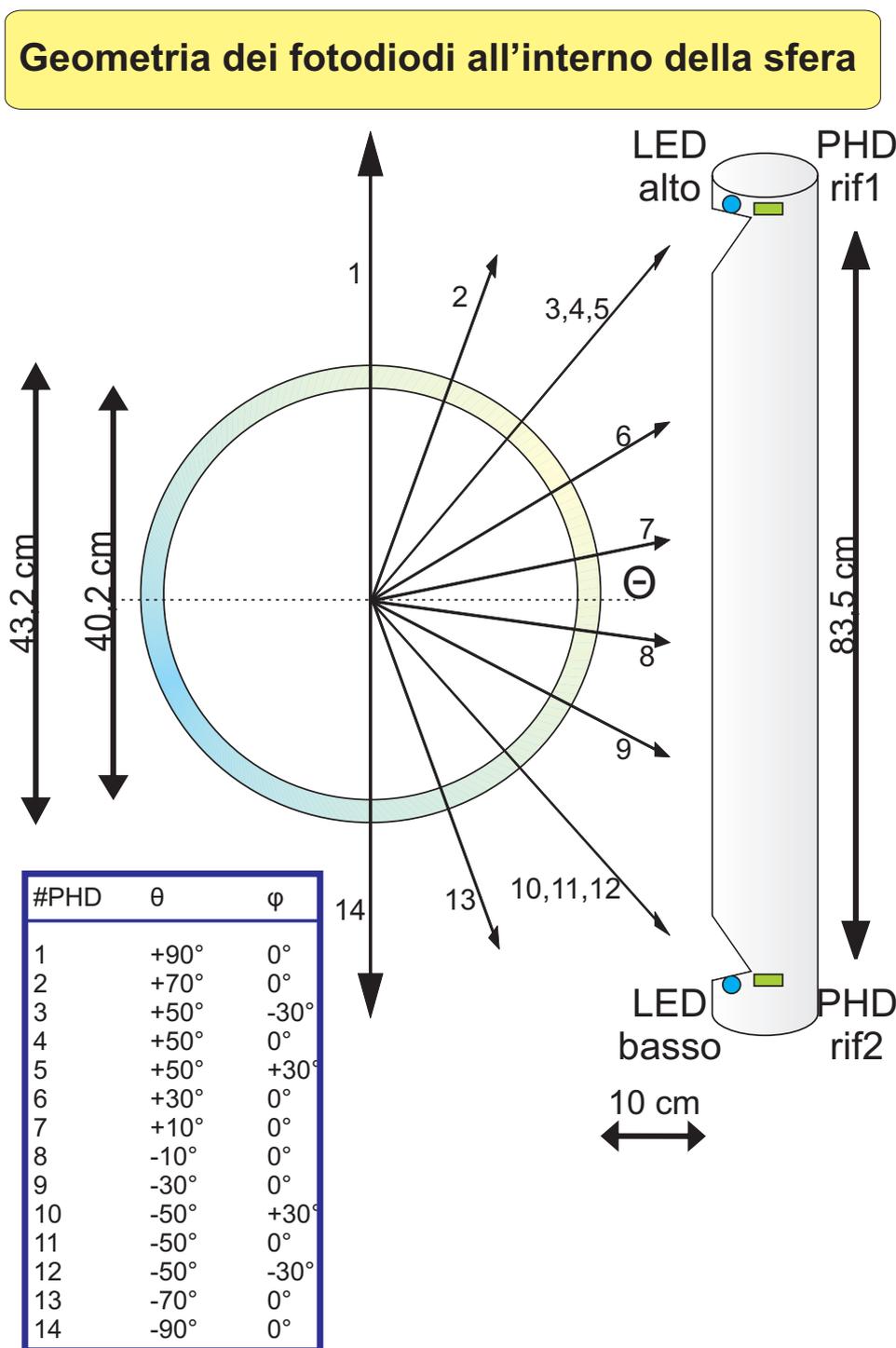


Figura 3.8: Schematizzazione dell'apparato di misura del *biofouling*. I fotorivelatori sono numerati ed è mostrata la loro posizione in coordinate polari.

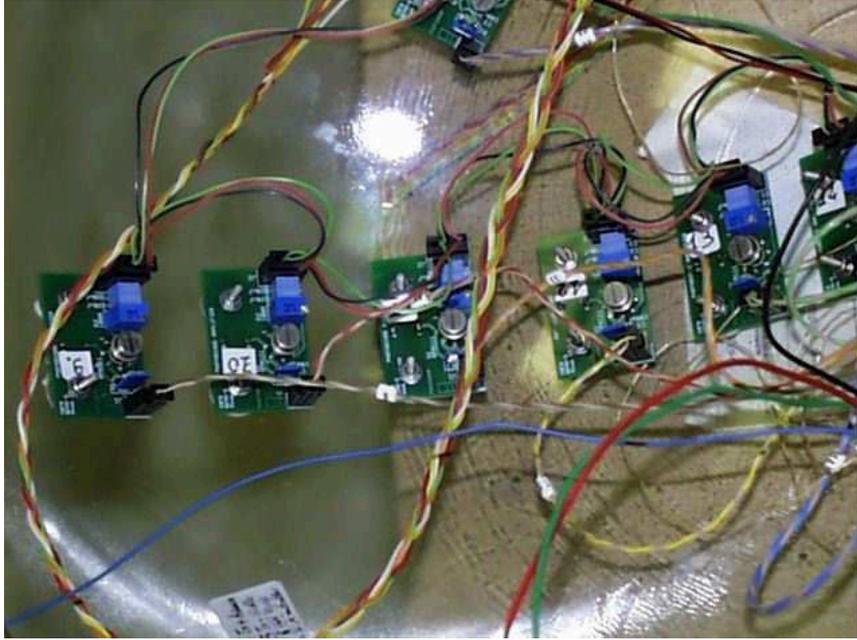
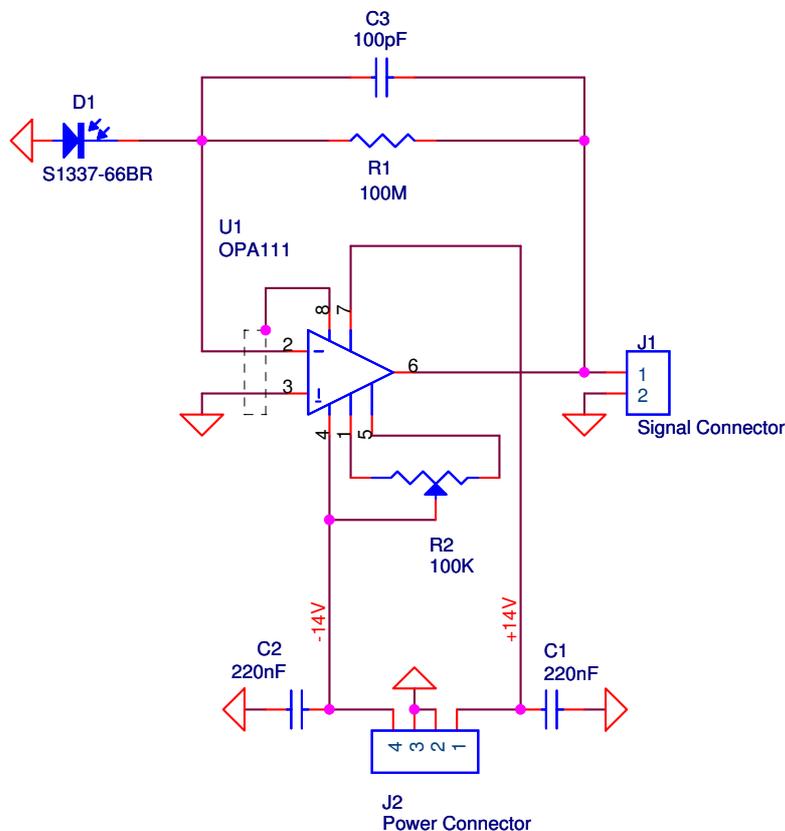


Figura 3.9: In foto sono mostrati i PHD, con i cavi di alimentazione e di segnale, contenuti internamente alla sfera.

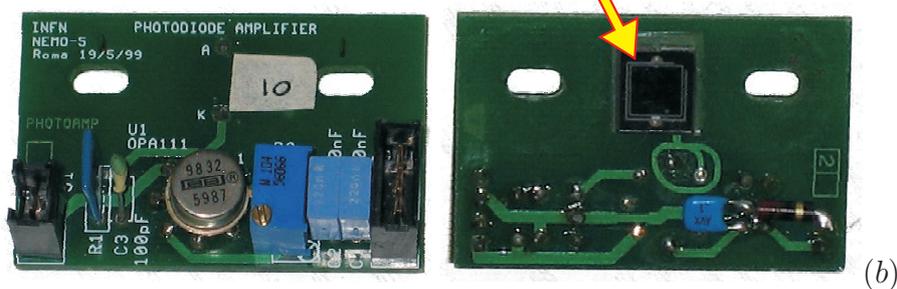
zenitale $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. I fotorivelatori posti a $\theta = +50^\circ$ e $\theta = -50^\circ$ sono in posizione privilegiata, poiché risultano meglio illuminati dai due LED blu. A tali angoli θ , si è deciso di posizionare ulteriori fotorivelatori agli angoli azimutali $\phi = +30^\circ$ e $\phi = -30^\circ$.

Come si è spiegato nel paragrafo 2.1, il fenomeno del *biofouling* è dato dalla somma di due effetti: il primo dovuto alla crescita del *biofilm* (stratificazione irreversibile di macromolecole organiche) e il secondo legato alla presenza di sedimenti organici e inorganici (accumulo reversibile che provoca cambiamenti veloci nella trasparenza). Questo secondo effetto potrebbe oscurare in maniera significativa, per brevi periodi di tempo, alcuni fotorivelatori, nel caso in cui un sedimento di dimensioni macroscopiche si disponesse proprio in corrispondenza della superficie rivelatrice dei fotodiodi. Per questo motivo sono stati posti tre fotorivelatori agli angoli θ privilegiati, per stimare il *biofouling* medio sulla superficie, non legato ad eventi casuali come la presenza di un singolo sedimento.



(a)

Superficie del fotodiode



(b)

Figura 3.10: (a) Schema elettrico e (b) aspetto di entrambi i lati del circuito stampato dei fotorivelatori. I PHD sono costituiti da un fotodiode di silicio che genera una corrente proporzionale alla luce che l'investe e da un amplificatore operazionale che fornisce un segnale di tensione proporzionale alla corrente generata dal fotodiode.

In figura 3.10 sono mostrati lo schema elettrico e l'aspetto dei circuiti fotorivelatori utilizzati. I PHD utilizzano due distinte alimentazioni, a +14 V ed a -14 V, e forniscono un segnale di tensione continua proporzionale alla luce che investe il fotodiodo di cui sono dotati. Sperimentalmente si nota che, in condizioni di misura, il segnale dei PHD è contenuto nella dinamica $0 \leq V_{PHD} \leq 3V$. Attraverso un potenziometro (o *trimmer*) è possibile minimizzare la tensione di *offset* e le correnti di *bias* degli amplificatori operazionali. Tale operazione è stata eseguita in una "scatola nera": oscurando completamente il fotodiodo si può regolare un segnale d'uscita di tensione nullo.

La tensione misurata a tempi diversi su ogni singolo fotorivelatore può essere scritta come una funzione del *biofouling* e della quantità di luce emessa dal LED che in quel momento è acceso:

$$V_{PHD}^i(t) = f^{biof}(t) \cdot luce(t) \quad (3.1)$$

dove $V_{PHD}^i(t)$ è la tensione misurata sul fotorivelatore *i*-esimo al tempo t , $f^{biof}(t)$ è la funzione che determina l'andamento del *biofouling* nel tempo e $luce(t)$ è la quantità di luce emessa dal LED. La tensione misurata sul fotorivelatore di riferimento in prossimità del LED può essere scritta:

$$V_{PHD}^r(t) = k \cdot luce(t) \quad (3.2)$$

dove k è una costante (i PHD di riferimento non risentono dell'effetto del *biofouling*). Si può eliminare la dipendenza legata alla sorgente luminosa definendo la funzione *i*-esima $f_{PHD}^i(t)$ come il rapporto fra la tensione d'uscita del PHD *i*-esimo e la tensione del PHD di riferimento. Si ottiene:

$$f_{PHD}^i(t) = \frac{V_{PHD}^i(t)}{V_{PHD}^r(t)} = \frac{f^{biof}(t)}{k} \quad (3.3)$$

che è una funzione indipendente dalla quantità di luce emessa dal LED. Tale funzione *i*-esima dipende esclusivamente dall'effetto dovuto al *biofouling*, a meno di una costante. Normalizzando tale funzione al valore che essa stessa assume nell'istante iniziale, si può definire la funzione *Trasparenza i*-esima

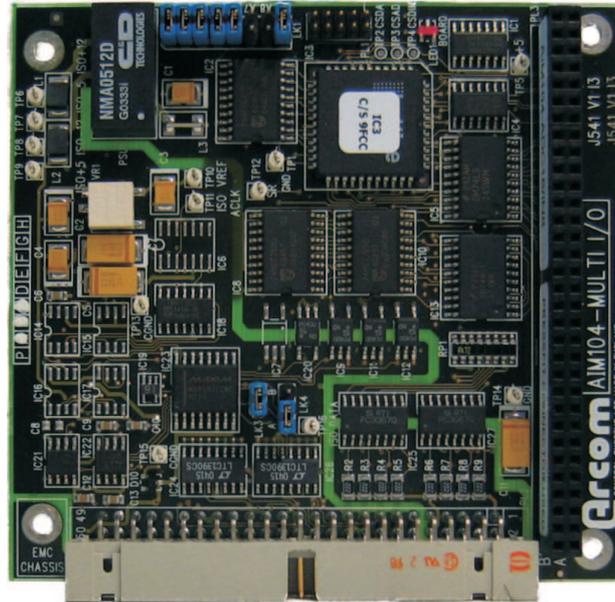


Figura 3.11: AIM104-ADC16/IN8 della Arcom. Il convertitore è compatibile con il bus standard PC/104.

$T^i(t)$ come:

$$T^i(t) = \frac{f_{PHD}^i(t)}{f_{PHD}^i(t=0)} = \frac{f^{biof}(t)}{f^{biof}(t=0)} \leq 1 \quad (3.4)$$

La funzione mostrata nell'equazione 3.4 dà una stima diretta della trasparenza della superficie del modulo ottico. Si quantifica in questo modo l'influenza del *biofouling* sull'oscuramento della luce raccolta dai moduli ottici. Al tempo iniziale si ha che $T^i(0) = 1$, in condizioni iniziali di biofouling completamente assente; in condizioni di oscuramento totale la funzione assume valore nullo. La *Trasparenza* assume valori sempre compresi tra $0 < T(t) \leq 1$.

Per ricavare l'andamento della *Trasparenza* in funzione del tempo, è necessario misurare con accuratezza i valori delle tensioni su tutti i fotorivelatori. Viene utilizzato, a tal scopo, il convertitore analogico digitale (in inglese *Analog to Digital Converter* - ADC) AIM104-ADC16/IN8 della Arcom, una scheda compatibile con il bus standard PC/104 che possiede 16 linee analogiche di ingresso. Una scheda ADC viene utilizzata per convertire un valore analogico di tensione in un valore numerico. L'ADC, mostrato in figura 3.11,

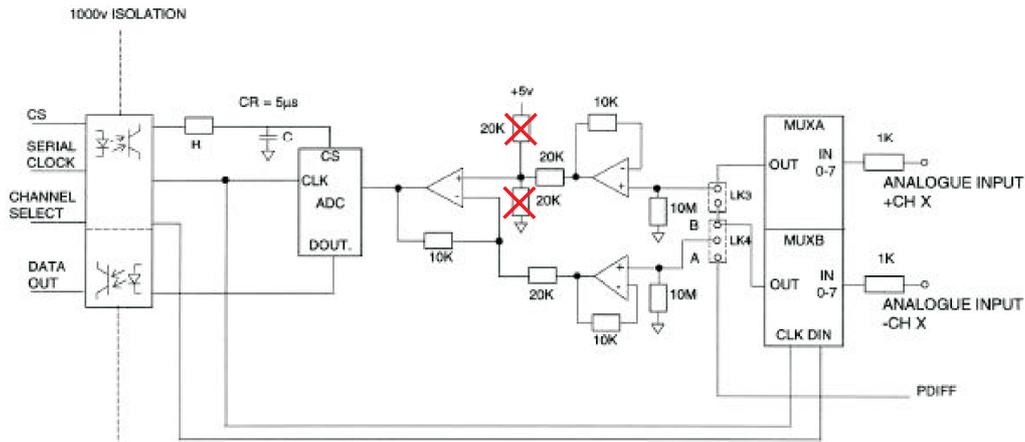


Figura 3.12: Schema elettrico semplificato del convertitore ADC, che mostra la modifica necessaria ad alterare la dinamica di ingresso.

comunica attraverso il bus PC/104 con il *Single Board Computer*. Le tensioni di uscita dei 14 fotorivelatori posti dentro la sfera e le tensioni di uscita dei due PHD di riferimento posti in prossimità dei due LED sono portate, attraverso un cablaggio opportuno, agli ingressi del convertitore. L'ADC gestisce una conversione a 12 bit ($2^{12} = 4096$) ed è progettata per convertire segnali in un intervallo bipolare tra -5 V e $+5\text{ V}$.

In precedenza si è accennato al fatto che $0 \leq V_{PHD} \leq 3\text{V}$: il circuito di campionamento a nostra disposizione non è, quindi, ottimizzato per tali segnali. L'ADC utilizzato è, infatti, un convertitore di segnali bipolari e non può essere configurato per funzionare in modalità monopolare, cioè convertire segnali positivi. Per poter sfruttare in maniera ottimale la dinamica del convertitore ne abbiamo modificato il circuito elettrico, rimuovendo due resistenze all'ingresso di un amplificatore operazionale (le due resistenze cancellate in figura 3.12). Con tale modifica, è stato possibile alterare la dinamica dei segnali di ingresso sui canali dell'ADC, passando da una dinamica di $-5\text{V} \div +5\text{V}$ ad una di $0\text{V} \div +3.3\text{V}$.

È stato necessario scrivere un opportuno programma in C per comunicare con l'ADC. Tale codice permette di accedere ad alcuni indirizzi di memoria specifici della periferica per avviare la conversione e successivamente leggere

il valore numerico convertito. In appendice A è riportato il codice del programma che esegue la scansione dei 16 canali dell'ADC e stampa su schermo il valore numerico letto. Viene richiamata la routine "read_ADC" con la quale si avvia la conversione di un canale specifico, si attende la fine della conversione e si legge il valore numerico; la routine restituisce il valore convertito della tensione su quella linea e un codice di controllo.

La sorgente luminosa costituita dai due LED viene pilotata da un circuito generatore di corrente. Il diodo non è un componente lineare: non esiste una relazione di linearità tra la tensione ai suoi capi e la corrente che l'attraversa. Dunque, per avere una sorgente luminosa controllata, è necessario iniettare nel LED una corrente stabile e fissata. Tale funzione è svolta dal circuito mostrato in figura 3.13. Il generatore di corrente, indipendentemente dai carichi connessi sulle sue due uscite, fornisce una corrente elettrica stabile e di valore fissato¹.

Ciascun LED utilizzato è posizionato in modo tale da illuminare metà sfera di vetro: la luce emessa viene rivelata dalla metà dei PHD posti all'interno della sfera. Per stimare la variazione della *Trasparenza*, i LED vengono accesi con due diverse intensità di corrente (10 mA e 20 mA), in modo tale da avere due diverse misure di luce e poter confrontare l'effetto del *biofouling* rivelato nei due casi. Come mostrato in figura 3.13, il generatore di corrente viene pilotato attraverso tre linee di ingresso logiche. Settando a 0 V o a 3.3 V ("0" logico e "1" logico) le tre linee è possibile accendere e spegnere il generatore, selezionare il LED acceso (alto o basso) e la corrente fra i due valori possibili. Nella tabella 3.1 sono riassunte le configurazioni possibili per pilotare il generatore con l'ausilio delle tre linee di ingresso.

I due livelli di corrente che il generatore inietta nei LED possono essere agevolmente regolati attraverso due potenziometri. Si mostreranno nel prossimo capitolo i motivi che hanno spinto ad impostare le correnti sui valori di 10 mA e 20 mA.

Le misure delle tensioni ai capi dei PHD vengono eseguite attraverso il

¹Tale affermazione non risulta vera quando si collegano degli oggetti con una resistenza molto grande: la tensione che può fornire il circuito, ovviamente, non può mai essere superiore alla tensione di alimentazione.

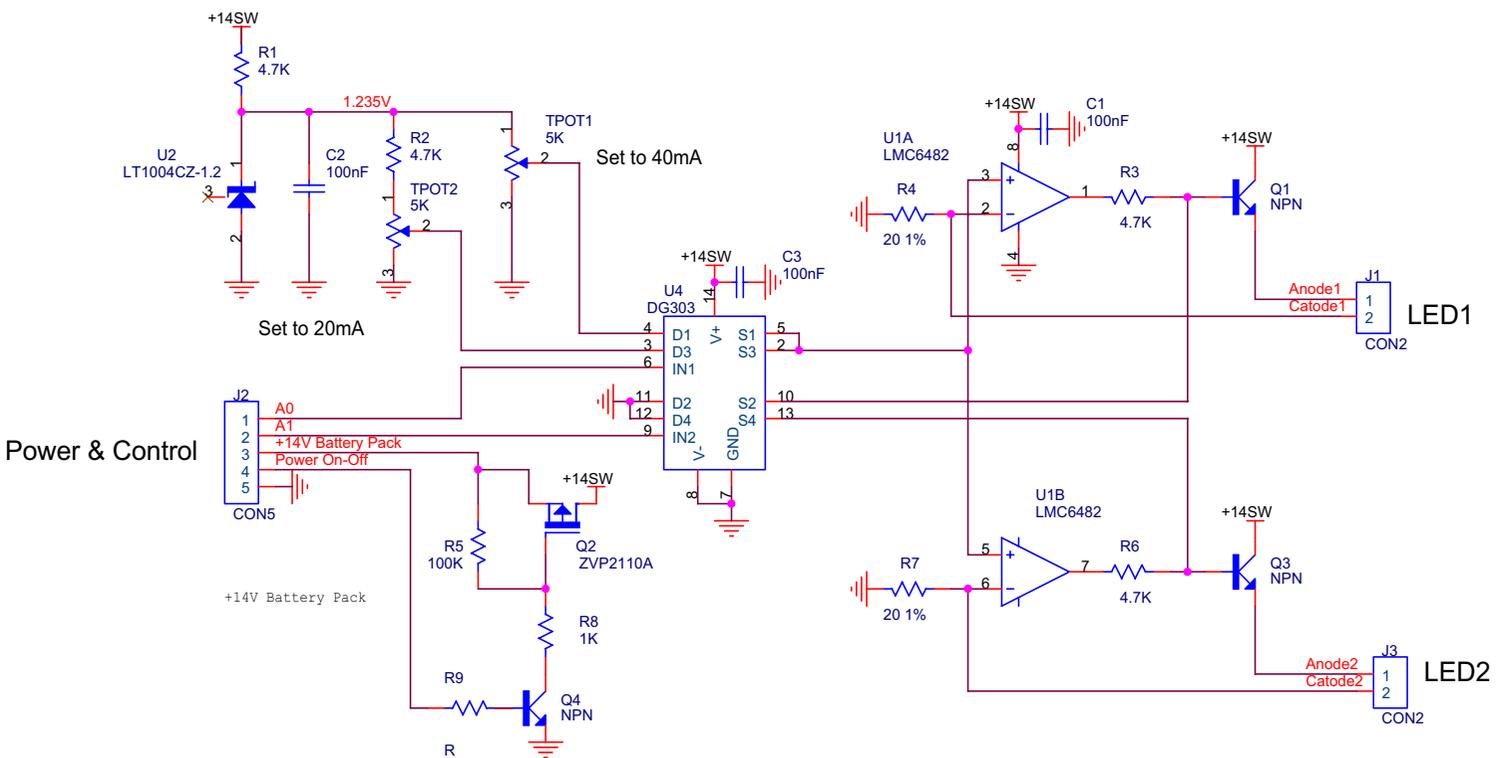


Figura 3.13: Generatore di corrente utilizzato per pilotare le due sorgenti luminose costituite da due LED blu.

| Power | A0 | A1 | Configurazione LED |
|-------|----|----|--------------------------|
| 0 | - | - | entrambi i LED spenti |
| 1 | 0 | 1 | LED alto acceso a 10 mA |
| 1 | 1 | 1 | LED alto acceso a 20 mA |
| 1 | 0 | 0 | LED basso acceso a 10 mA |
| 1 | 1 | 0 | LED basso acceso a 20 mA |

Tabella 3.1: Configurazioni utilizzate per l'accensione dei due LED con due diversi valori di corrente. Le tre linee digitali sono indicate con la stessa denominazione mostrata in figura 3.13.

| Power | A0 | A1 | Configurazione LED | Misura eseguita |
|-------|----|----|-----------------------|---|
| 0 | 0 | 0 | entrambi i LED spenti | misura del buio (<i>pedistallo 1</i>) |
| 1 | 0 | 1 | LED alto @ 10 mA | misura di luce (<i>livello basso</i>) |
| 1 | 1 | 1 | LED alto @ 20 mA | misura di luce (<i>livello alto</i>) |
| 0 | 0 | 0 | entrambi i LED spenti | misura del buio (<i>pedistallo 2</i>) |
| 1 | 0 | 0 | LED basso @ 10 mA | misura di luce (<i>livello basso</i>) |
| 1 | 1 | 0 | LED basso @ 20 mA | misura di luce (<i>livello alto</i>) |
| 0 | 0 | 0 | entrambi i LED spenti | misura del buio (<i>pedistallo 3</i>) |

Tabella 3.2: Ciclo di misure relative al *biofouling*.

ciclo di acquisizione mostrato nella tabella 3.2. Prima e dopo l'accensione di ciascun LED, viene eseguita una misura della tensione emessa dai PHD in condizioni di "buio", denominata anche "pedistallo". Tali valori, mediati, saranno sottratti alle misure eseguite durante l'accensione dei LED. In tal modo, si ottiene un andamento indipendente da eventuale bioluminescenza presente nell'ambiente sottomarino; si minimizzano, inoltre, gli effetti dovuti a variazioni della temperatura che modificano le correnti di bias dei PHD. L'intensità della luce rivelata su ogni PHD durante l'accensione del LED alto, ad esempio, viene sottratta del valor medio del *pedistallo 1* e *pedistallo 2*, misurato per ciascun PHD.

Il generatore di corrente viene pilotato dal *Single Board Computer* attraverso le linee digitali di output presenti sulla scheda (si veda la figura 3.2). Le linee digitali della scheda VIPER sono gestite attraverso il programma scritto in C mostrato in appendice A.

3.4 Le misure eseguite: scadenze temporali e medie

Sono stati mostrati, nei paragrafi precedenti, gli strumenti che compongono l'apparato per misure abissali. Come si è già detto in precedenza, tutti gli strumenti rimarranno in modalità di basso consumo per la maggior parte del tempo in cui l'apparato sarà operativo. L'alimentazione, fornita attraverso batterie, non consente una presa dati continua; in alternativa, saranno eseguite misure ad intervalli regolari.

Il compito del *Single Board Computer* è quello di gestire il funzionamento della strumentazione connessa, ricevere i dati delle misure ed infine organizzare tali dati in un formato standard. Ogni strumento restituisce, dopo essere stato interrogato, le misure che ha eseguito attraverso dei dati che hanno formati diversi. È necessario, dunque, stabilire un formato univoco dei dati, che comprenda le misure di tutte le periferiche.

Gli strumenti connessi su porta seriale, il correntometro e il CTD, trasmettono i dati come stringhe alfanumeriche in formato ASCII. Poiché in tali stringhe sono presenti informazioni ridondanti (modello dello strumento, caratteri di controllo, eccetera), il SBC, attraverso un'opportuna applicazione, seleziona e salva su disco solo i dati legati alle misure. I dati del correntometro si possono esprimere mediante una stringa costituita da otto parole:

| | | |
|---|---|------------|
| 1 | modulo della velocità della corrente, in cm/s | (0 ÷ 300) |
| 2 | direzione della corrente rispetto al Nord, in gradi | (0 ÷ 360) |
| 3 | temperatura, in °C | (-10 ÷ 43) |
| 4 | intensità del segnale, in dB | (-∞ ÷ 0) |
| 5 | direzione della bussola, in gradi | (0 ÷ 360) |
| 6 | inclinazione lungo Nord, in gradi | (-35 ÷ 45) |
| 7 | inclinazione lungo Est, in gradi | (-35 ÷ 45) |
| 8 | numero dei pacchetti acustici mediati | (0 ÷ 300) |

I dati del CTD sono contenuti in una stringa formata da tre parole:

- | | | |
|---|-------------------------|-----------|
| 1 | temperatura, in °C | (-3 ÷ 50) |
| 2 | conducibilità, in mS/cm | (0 ÷ 64) |
| 3 | salinità, in ppm | (0 ÷ 64) |

Il blocco relativo alla stima del *biofouling* restituisce dati attraverso l'ADC, che converte il valore della tensione ai capi dei PHD. L'ADC esegue varie conversioni sui 16 canali di ingresso, durante ciascuna delle sette fasi del ciclo di misura del *biofouling* (tabella 3.2). Attraverso più conversioni per ogni i -esimo PHD, è possibile avere delle misure con un errore statistico stimabile con la deviazione standard della distribuzione. Si assume che la distribuzione delle misure di tensione ai capi dei PHD abbia una forma gaussiana, centrata intorno al valor medio \bar{x}_i e di larghezza pari alla deviazione standard σ_i . Eseguendo N misure, il valore e l'errore da associare alla grandezza misurata sul PHDi sono $X_i = \bar{x}_i \pm \frac{\sigma_i}{\sqrt{N}}$. Il programma di gestione del ciclo di misura delle tensioni sui PHD calcola valor medio e deviazione standard per i 16 fotorivelatori, per le sette fasi del ciclo. La stringa dei dati relativi al *biofouling* contiene 16 medie e 16 deviazioni standard per le 7 fasi del ciclo: complessivamente 224 parole, ordinate come segue

| | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-----|-----|----------------|---------------|
| pedistallo 1 | \bar{x}_1 | σ_1 | \bar{x}_2 | σ_2 | \bar{x}_3 | σ_3 | ... | ... | \bar{x}_{16} | σ_{16} |
| LED 1 @ 10 mA | \bar{x}_1 | σ_1 | \bar{x}_2 | σ_2 | \bar{x}_3 | σ_3 | ... | ... | \bar{x}_{16} | σ_{16} |
| LED 1 @ 20 mA | \bar{x}_1 | σ_1 | \bar{x}_2 | σ_2 | \bar{x}_3 | σ_3 | ... | ... | \bar{x}_{16} | σ_{16} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| pedistallo 3 | \bar{x}_1 | σ_1 | \bar{x}_2 | σ_2 | \bar{x}_3 | σ_3 | ... | ... | \bar{x}_{16} | σ_{16} |

Gli strumenti connessi eseguono misure a diversi intervalli di tempo. La struttura dei dati complessivi deve contenere un'indicazione della data e dell'ora in cui una misura è stata eseguita. La struttura dei dati è mostrata in tabella 3.3. Ogni volta che è eseguito il ciclo di misure relativo al *biofouling*, viene aperto il file dei dati e appesa una riga con i dati acquisiti dal salvataggio precedente. Tale riga ha un indicatore di inizio (*header*), formato da una parola scelta convenzionalmente (1000) e da un'altra che indica il numero totale di parole che costituisce la misura. Segue l'*header* del correntometro, formato dalla parola 2000 seguita dal numero di parole dei dati del correntometro. Seguono i dati del correntometro, preceduti da due parole

| | | | |
|-----------------------------|-------------|------------------------|----------------------|
| HEADER misura | 1000 | <i># parole_totali</i> | |
| HEADER correntometro | 2000 | <i># parole_corr</i> | |
| DATI correntometro | <i>data</i> | <i>ora</i> | <i>dati_corr ...</i> |
| HEADER CTD | 3000 | <i># parole_CTD</i> | |
| DATI CTD | <i>data</i> | <i>ora</i> | <i>dati_CTD ...</i> |
| HEADER biofouling | 4000 | <i># parole_biof</i> | |
| DATI biofouling | <i>data</i> | <i>ora</i> | <i>dati_biof ...</i> |
| FINE misura | 99999<LF> | | |

Tabella 3.3: Struttura del file di dati.

che indicano la data e l'ora. Analogamente, seguono gli *header* e i dati del CTD e del *biofouling*. La riga è terminata dalla parola 99999, seguita dal carattere ASCII <LF> (*Line Feed*, nuova linea).²

²Il *biofouling* è un processo lento e le misure possono essere eseguite ogni 10-12 ore, mentre è interessante rilevare più frequentemente i valori delle correnti sottomarine, della temperatura, della salinità. Il formato dei dati consente che fra un ciclo di *biofouling* e il successivo vengano eseguite diverse misure con il correntometro e con il CTD.