

Capitolo 4

Circuiti originali

Nel capitolo 3 è stato descritto l'apparato strumentale progettato per determinare le proprietà del sito abissale e la forma dei dati che vengono prodotti. In questo capitolo si definiranno nel dettaglio le modalità di misura. A partire da alcune misure preliminari eseguite con la strumentazione del *biofouling*, si giustificheranno le scelte fatte nella gestione del ciclo di acquisizione, e le calibrazioni effettuate. Si mostreranno i dati dei consumi degli strumenti per ricavare il tempo massimo di attività dell'apparato e la frequenza nella presa dati.

4.1 Definizione della strategia di misura

Come già descritto nel paragrafo 3.3, i fotorivelatori vengono illuminati da una sorgente luminosa (LED), stimolata da una corrente controllata da un apposito circuito. Il generatore (figura 3.13) realizzato per tale scopo fornisce una corrente costante nel tempo, la cui intensità può essere regolata per mezzo di semplici potenziometri. Abbiamo scelto di misurare la luce che arriva sui vari PHD in diverse condizioni d'illuminazione: i LED vengono fatti percorrere da una corrente la cui intensità può assumere due valori prefissati (nominalmente 10 e 20 mA).

Come già detto, la stima della *Trasparenza* della superficie del modulo ottico, essendo ottenuta come rapporto fra i valori di tensione misurati su

fotorivelatori illuminati dalla stessa sorgente, non deve dipendere dall'intensità di luce emessa dai LED: è stato deciso di effettuare due misure della *Trasparenza* con LED eccitati da diverse correnti, proprio per verificare tale assunzione e per avere due stime (ovviamente non del tutto indipendenti) della stessa quantità. Le misure dei segnali forniti da ogni PHD in condizioni di illuminazione devono essere corredate con misure del segnale (sullo stesso PHD) in assenza di illuminazione.¹

In generale, una sorgente luminosa più intensa permette di effettuare misure che risentano meno del rumore ottico di fondo. Una sorgente più intensa permette, quindi, di realizzare uno strumento più "sensibile" a minime variazioni di *Trasparenza* del modulo ottico, ma richiede una quantità maggiore di energia; l'apparato autonomo che si vuole realizzare può misurare per tempi lunghi solo se la potenza richiesta è limitata. Siamo costretti a trovare, pertanto, un compromesso tra la sensibilità richiesta e i consumi possibili.

Dimensionamento del sistema di misura del *biofouling*

Vogliamo definire le condizioni di illuminazione dei LED che garantiscono la migliore misura della variazione di *Trasparenza*, con il minor dispendio di energia. Ciò comporta lo studio della linearità della misura di luce, da parte dei PHD, al variare della corrente di eccitazione dei LED.

Come già detto, vogliamo massimizzare la risposta dei PHD, rendendola molto superiore al rumore, valutabile in qualche mV all'ingresso del convertitore analogico-digitale, per ottenere la miglior risoluzione nella misura della *Trasparenza*. Abbiamo quindi studiato il segnale registrato dai PHD, posizionati all'interno della sfera nella configurazione geometrica finale, con i LED (anch'essi posizionati come saranno nelle condizioni di misura sottomarina) alimentati con diversi valori di corrente. Per ogni condizione di eccitazione si è studiata, inoltre, la risposta dei PHD in funzione del tempo. Innanzi tutto abbiamo notato che alcuni PHD erano, per questioni geometriche, molto meno illuminati di altri. Questo ha permesso di distinguere eventuali fenomeni

¹Tale valore, legato alla tensione presente ai capi del fotorivelatore anche se non illuminato, è detta "pedistallo" e va sottratta al segnale registrato in condizioni di misura.

di non linearità dovuti ai PHD da quelli dovuti ai LED. Si osserva inoltre, qualitativamente, che è necessario attendere un certo tempo, dell'ordine delle decine di secondi, affinché il segnale registrato dai PHD si stabilizzi. Dall'analisi di queste misure preliminari vogliamo avere indicazioni sulla scelta dei valori di corrente dei LED e sulla modalità ottimale per effettuare il ciclo di misura della tensione dei PHD.

In figura 4.1 è mostrata la struttura meccanica in cui sono alloggiati gli strumenti che compongono la stazione autonoma per misure abissali. Tale "gabbia" è costituita da acciaio AISI-316, un acciaio molto resistente alla corrosione; al centro della struttura è posizionata la sfera di vetro, che contiene i fotorivelatori per la misura del *biofouling* e l'elettronica di gestione dell'apparato; sulle staffe forate visibili in foto sono stati collocati il tubo contenente i LED e i PHD di riferimento, il correntometro, il CTD, il modem acustico e un pacco batterie.

Per effettuare le misure preliminari di cui si è accennato sopra, abbiamo attivato solo il ciclo di operazioni relative ai LED ed ai PHD, cioè alla strumentazione per la stima del *biofouling*, mostrata schematicamente in figura 3.1. È necessario che tali acquisizioni vengano eseguite in condizioni di rumore ottico minimo. Tutto l'apparato, pertanto, è stato schermato otticamente con una copertura nera, come mostrato in figura 4.2. Anche piccole quantità di luce potrebbero essere rivelate dai PHD e costituirebbero un "rumore"; solo la luce dei due LED deve poter raggiungere la sfera e i fotorivelatori in essa contenuti.

Regolando i potenziometri del generatore di corrente (TPOT1 e TPOT2 in figura 3.13), sono state eseguite misure accendendo i due LED con correnti pari a 1, 5, 10, 15, 20, 25 e 30mA. L'ADC converte le tensioni dei 16 PHD in condizioni di buio, per stimare il "pedistallo"; dopo l'accensione di un LED, sono state effettuate acquisizioni ogni 11 secondi. Dopo lo spegnimento del LED, viene effettuata una nuova misura del buio. Per ciascun fotorivelatore, il valor medio dei due pedistalli viene sottratto alle misure di luce. Tali acquisizioni permettono di caratterizzare il funzionamento del blocco di misura (2 LED + 16 PHD) in funzione del tempo e della corrente. Per via della simmetria del problema (ciascun LED illumina direttamente



Figura 4.1: Alloggiamento meccanico della strumentazione che compone l'apparato per misure abissali.



Figura 4.2: Con l'ausilio di un panno nero plastificato, si riduce fortemente il rumore ottico rilevato dalla strumentazione di misura del *biofouling*.

solo la metà dei PHD), vengono mostrati i risultati relativi all'accensione del LED alto che illumina i PHD1÷PHD7 e il suo PHD di riferimento (cfr. figura 3.8). I risultati relativi ai PHD8÷PHD14 sono del tutto compatibili con quelli mostrati.

I grafici di figura 4.3 mostrano la luce per varie correnti, in funzione del tempo, rivelata dal PHD di riferimento (PHDrif1) e dai PHD più (PHD4) e meno (PHD7) illuminati. Si osserva, qualitativamente, che l'andamento è di tipo decrescente nel tempo, tendente ad un valore limite. Per correnti superiori a 20 mA, inoltre, il segnale misurato ai capi dei PHD non aumenta oltre un valore massimo.

Tale effetto è evidente nei grafici di figura 4.4, che mostrano il segnale degli stessi PHD, ai vari tempi, in funzione della corrente che alimenta il LED. Vengono mostrati i dati del PHD di riferimento e dei PHD più e meno illuminati. In tutti i casi si osserva una saturazione del segnale dei PHD quando la corrente supera ~ 20 mA; non esiste una relazione di linearità fra la corrente che alimenta il LED e la luce rivelata. Poiché i PHD considerati lavorano in regioni della loro dinamica molto differenti, si deduce che la suddetta "saturazione" dipende esclusivamente dalle caratteristiche di emissione dei LED. Se dipendesse dai PHD, sarebbe stata osservata solo su quelli maggiormente illuminati, mentre dal confronto fra i due grafici si osserva che l'andamento è pressoché lo stesso, a meno di un fattore di scala. Con i LED utilizzati nel nostro apparato, risulta quindi inutile, ed anche dispendioso dal punto di vista energetico, alimentarli con una corrente superiore a 20 mA, in quanto l'efficienza luminosa non migliora significativamente.

Dalle considerazioni espresse finora, si può ricavare che l'andamento nel tempo della luce rivelata dall'apparato di misura del *biofouling* dipende esclusivamente dall'evoluzione temporale della luce emessa dai LED. I grafici in figura 4.5 mostrano tale andamento, per i sette PHD direttamente illuminati e dal PHD di riferimento. Con l'eccezione dei casi relativi ai valori più bassi di corrente iniettata nel LED (1 mA e 5 mA), si può osservare un andamento di tipo esponenziale decrescente, tendente a valori costanti di illuminazione.

Si può parametrizzare l'andamento temporale del segnale di tensione ai capi dei PHD, in condizioni di corrente ai LED $I_{LED} = costante$, con la

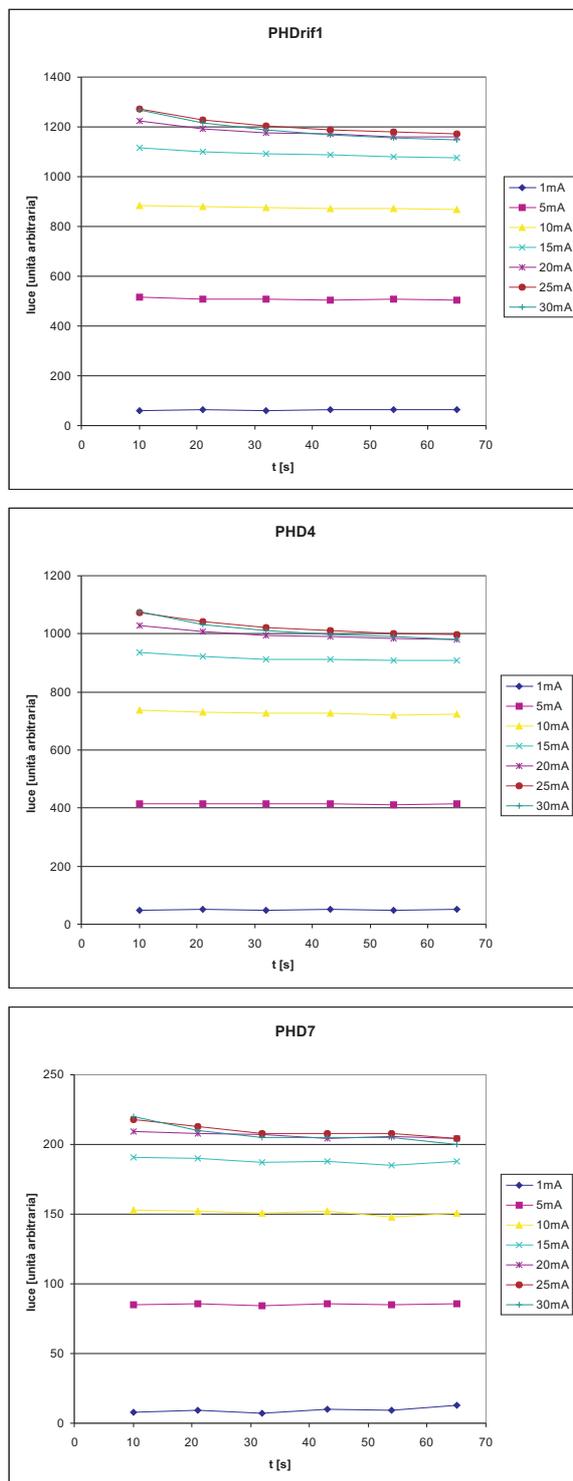


Figura 4.3: Andamento temporale del segnale di tensione misurato ai capi dei PHD per varie correnti. Confronto fra il segnale luminoso misurato sul PHD di riferimento e sui PHD4 e PHD7.

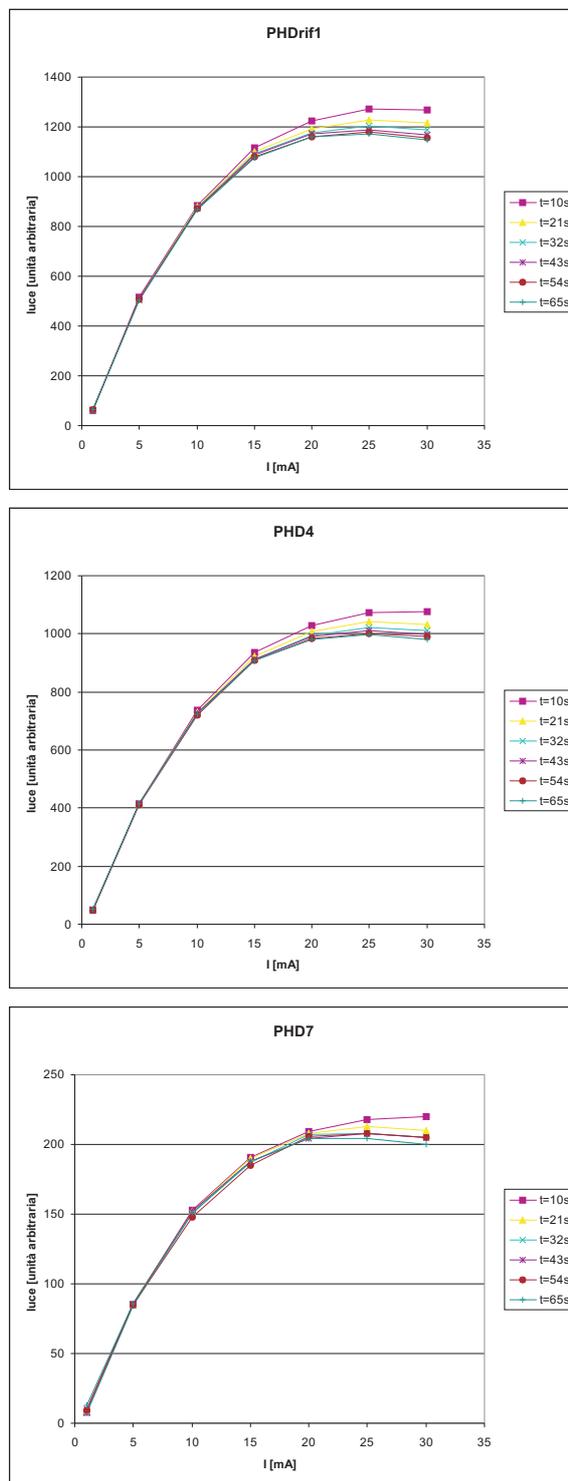


Figura 4.4: Segnale misurato ai diversi tempi in funzione della corrente. Confronto fra il segnale luminoso misurato sul PHD di riferimento e sui PHD4 e PHD7.

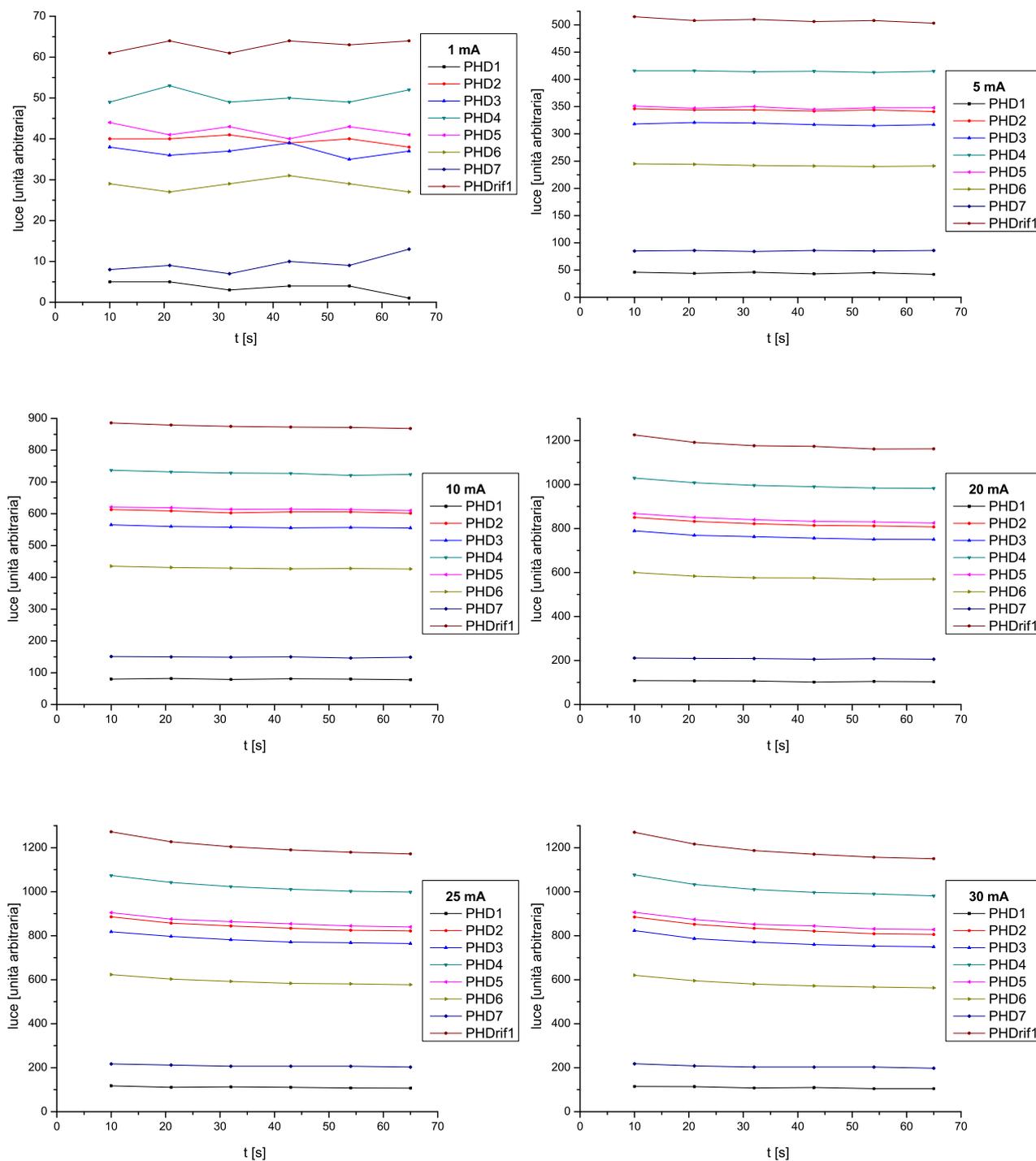


Figura 4.5: Segnale misurato sui i PHD illuminati dal LED alto in funzione del tempo. Si noti che analoghi risultati sono stati ottenuti per i PHD illuminati dal LED basso.

funzione

$$V^{PHD_i}(t) = V_0^{PHD_i} + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.1)$$

con $V_0^{PHD_i}$ ed A espressi in volt (o in canali di campionamento dell'ADC). In tal modo possiamo verificare quantitativamente se l'evoluzione nel tempo dei segnali dei PHD è descritto dalla stessa funzione (e quindi se può essere imputata al funzionamento del LED). I grafici in figura 4.6 mostrano i risultati della parametrizzazione per il PHD di riferimento, utilizzando dati ottenuti con diversi valori di I_{LED} . Tali grafici sono del tutto analoghi a quelli ottenuti per gli altri fotorivelatori, che quindi non vengono mostrati. Da tale analisi, è interessante ricavare il valore della costante di tempo, indicata nell'equazione 4.1 con τ , e il valore del rapporto tra il coefficiente dell'esponenziale e il termine indipendente dal tempo, $\frac{A}{V_0^{PHD_i}}$. La costante di tempo τ individua l'ordine di grandezza del tempo che è necessario attendere, dopo l'accensione dei LED, per eseguire una misura di luce che sia stabile; il rapporto $\frac{A}{V_0^{PHD_i}}$ dà una stima dell'energia dissipata dal LED in forme diverse dall'energia luminosa.

Nella tabella 4.1 sono riportati i valori numerici ricavati da tale parametrizzazione esponenziale. Si osserva che, per $I_{LED} = costante$, i valori di τ e $\frac{A}{V_0^{PHD_i}}$ sono compatibili, entro gli errori, per tutti i PHD. Per ogni valore di corrente che alimenta i LED possiamo, dunque, calcolare i valori medi dei due parametri (τ e $\frac{A}{V_0^{PHD}}$) per riscontrare una loro eventuale dipendenza dalla corrente I_{LED} .

In figura 4.7 è mostrato l'andamento della costante di tempo media, ottenuta mediando i valori riportati in tabella 4.1 per ogni valore di I_{LED} , in funzione della corrente. Si evince dal grafico che la costante di tempo è indipendente da I_{LED} . La figura 4.8 mostra il rapporto $\frac{A}{V_0^{PHD}}$, medio per ogni I_{LED} , in funzione della corrente. Tale parametro cresce all'aumentare della corrente nell'intervallo misurato.

In base all'osservazione della "saturazione" dell'emissione di luce da parte dei LED, è ragionevole fissare i livelli di corrente per l'accensione dei LED a 10 mA e 20 mA. Correnti $I_{LED} < 10mA$ genererebbero sui PHD segnali troppo bassi, molto sensibili al rumore elettronico; correnti $I_{LED} > 20mA$

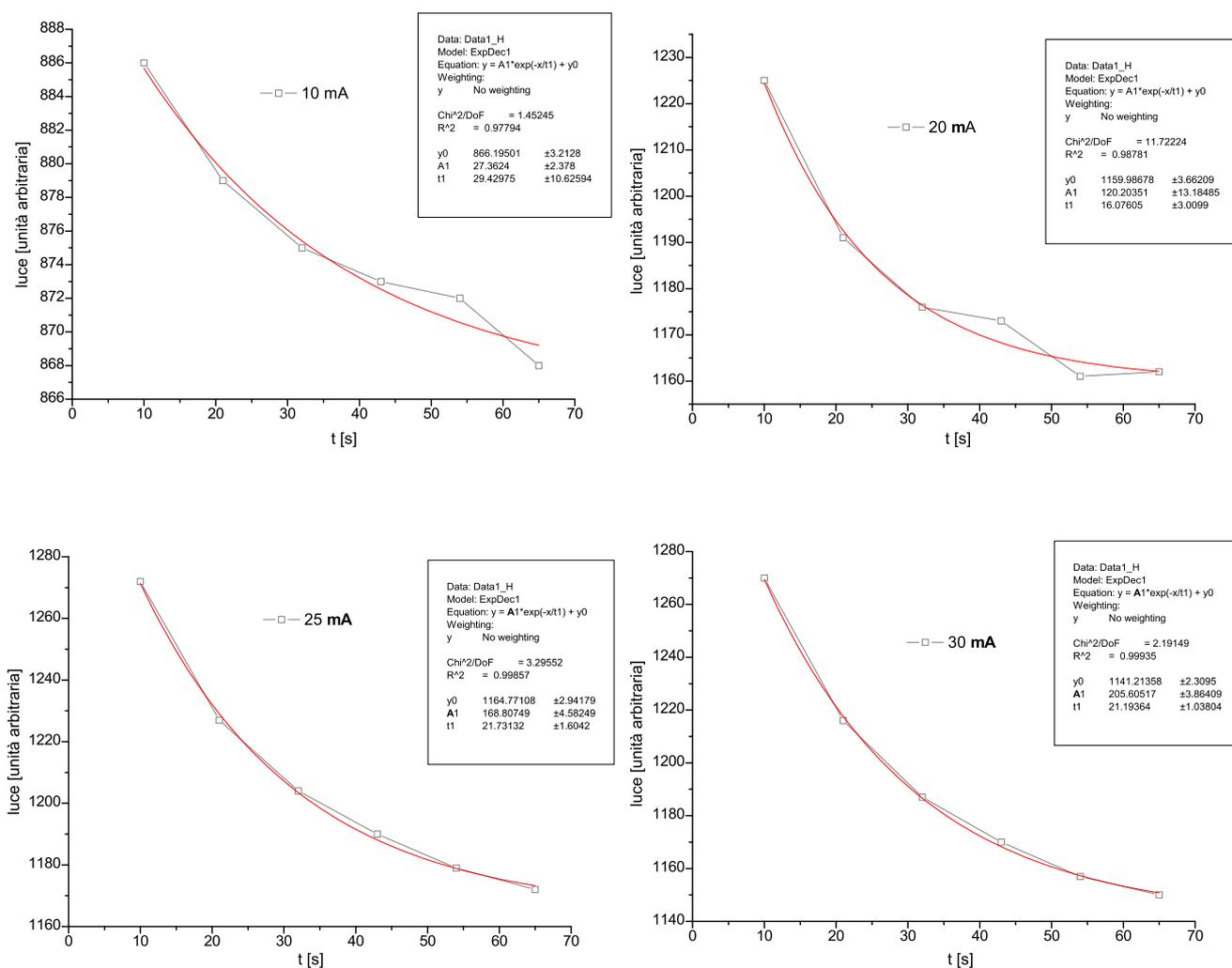


Figura 4.6: Confronto tra la curva di luce misurata sperimentalmente (quadrati uniti da linee) e quella parametrizzata per il PHD di riferimento.

$I_{LED} = 10mA$			$I_{LED} = 15mA$		
	τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]		τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]
<i>PHDrif1</i>	29±10	0,031±0,003	<i>PHDrif1</i>	32±10	0,058±0,004
<i>PHD1</i>	-	-	<i>PHD1</i>	-	-
<i>PHD2</i>	14±11	0,032±0,019	<i>PHD2</i>	28±9	0,058±0,004
<i>PHD3</i>	16±5	0,032±0,005	<i>PHD3</i>	25±3	0,061±0,002
<i>PHD4</i>	30±21	0,034±0,005	<i>PHD4</i>	17±2	0,057±0,003
<i>PHD5</i>	76±124	0,038±0,035	<i>PHD5</i>	32±13	0,058±0,005
<i>PHD6</i>	19±6	0,035±0,006	<i>PHD6</i>	23±6	0,065±0,005
<i>PHD7</i>	32±90	0,035±0,023	<i>PHD7</i>	18±23	0,044±0,027
valor medio	30,9±8,0	0,0341±0,0008	valor medio	25,1±2,2	0,057±0,002

$I_{LED} = 20mA$			$I_{LED} = 25mA$		
	τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]		τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]
<i>PHDrif1</i>	16±3	0,10±0,01	<i>PHDrif1</i>	22±2	0,145±0,004
<i>PHD1</i>	43±87	0,11±0,07	<i>PHD1</i>	37±50	0,15±0,06
<i>PHD2</i>	23±3	0,088±0,003	<i>PHD2</i>	23±3	0,131±0,005
<i>PHD3</i>	20±3	0,090±0,007	<i>PHD3</i>	24±2	0,122±0,004
<i>PHD4</i>	21±1	0,083±0,002	<i>PHD4</i>	23,5±0,8	0,130±0,001
<i>PHD5</i>	23±3	0,087±0,003	<i>PHD5</i>	25±4	0,127±0,007
<i>PHD6</i>	15±3	0,10±0,01	<i>PHD6</i>	22±2	0,137±0,005
<i>PHD7</i>	45±78	0,043±0,026	<i>PHD7</i>	22±11	0,10±0,02
valor medio	26,0±4,2	0,089±0,007	valor medio	24,9±1,9	0,131±0,005

 $I_{LED} = 30mA$

	τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]
<i>PHDrif1</i>	21±1	0,180±0,003
<i>PHD1</i>	77±170	0,25±0,33
<i>PHD2</i>	26±2	0,167±0,005
<i>PHD3</i>	19±1	0,174±0,006
<i>PHD4</i>	20±2	0,168±0,006
<i>PHD5</i>	24±3	0,161±0,006
<i>PHD6</i>	21±0,7	0,175±0,002
<i>PHD7</i>	14±6	0,18±0,05
valor medio	27,8±7,2	0,18±0,01

Tabella 4.1: Parametri τ e $\frac{A}{V_0^{PHD}}$ ricavati dall'andamento nel tempo del segnale misurato sui PHD, alle diverse correnti.

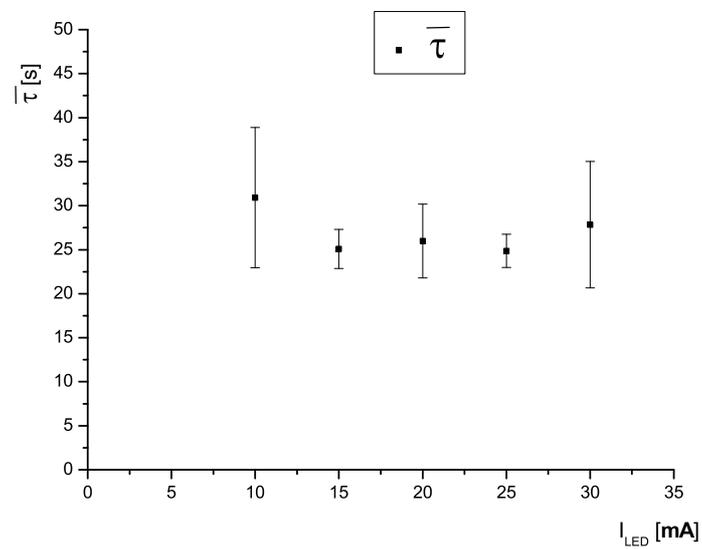


Figura 4.7: Costante di tempo caratteristica del segnale registrato dai PHD, in funzione della corrente che attraversa il LED.

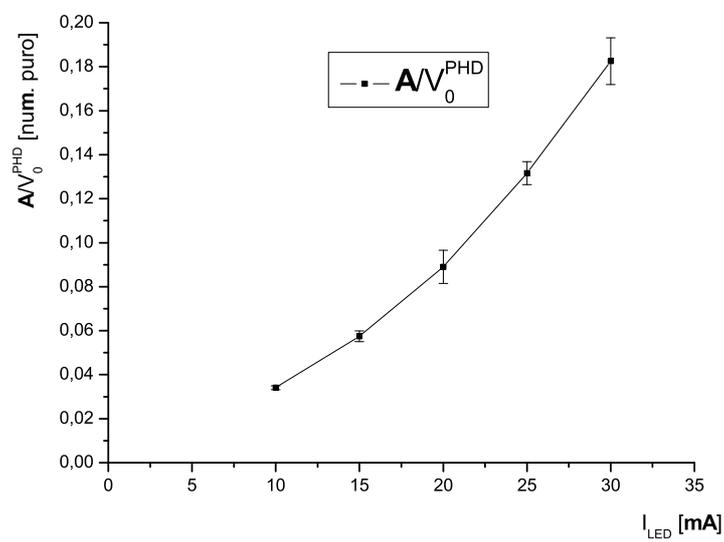


Figura 4.8: Rapporto $\frac{A}{V_0^{PHD}}$ del segnale rivelato dai PHD, in funzione della corrente.

porterebbero i LED al di fuori della linearità rendendo poco efficiente la misura.

Poiché l'emissione di luce è lentamente variabile nel tempo con una legge esponenziale descritta da un $\bar{\tau} \cong 20s$, conviene eseguire l'acquisizione dei segnali dei PHD dopo ~ 30 secondi dall'accensione dei LED. In tal modo, il contributo "residuo" al tempo $t \cong 30s$ del termine esponenziale alla luce emessa dal LED ammonta, per $I_{LED} = 20mA$, a circa il 2%: per $t = 30s$ e $\bar{\tau} = 20s$ si ha $\frac{A}{V_0^{PHD}} e^{-t/\bar{\tau}} \simeq 0.02$. Per $I_{LED} = 10mA$, tale contributo è inferiore all'1%. Dunque è ragionevole far iniziare le acquisizioni delle tensioni ai capi dei PHD 30 secondi dopo l'accensione dei LED, per avere un'intensità luminosa sufficientemente stabile, senza un eccessivo dispendio energetico.²

Misure dell'effetto del *biofouling* in ambiente marino hanno mostrato che l'effetto di oscuramento è maggiore sulle superfici rivolte verso l'alto (cfr. figura 2.2). Sull'orizzontale, $\theta = 90^\circ$ in figura 2.2 per la convenzione scelta dagli autori³, ci si aspetta un effetto dell'ordine dell'1% annuo [AMR03]. Vogliamo dimensionare il nostro apparato in modo tale da renderlo sensibile a variazioni di trasparenza dell'ordine del ‰, per osservare le variazioni aspettate.

Diminuire l'errore statistico di una misura equivale ad aumentare il numero di acquisizioni. Con le impostazioni per il ciclo di misura del *biofouling*, appena discusse, sono state eseguite alcune acquisizioni di test, variando il numero di acquisizioni per ogni canale di ingresso dell'ADC. Effettuando una presa dati con N acquisizioni per canale, si calcolano i valori medi \bar{x}_i e le deviazioni standard σ_i per l' i -esimo PHD, e si associa un errore statistico

²La funzione utilizzata per lo studio del *biofouling* è la Trasparenza, definita nell'equazione 3.4. Tale funzione eliminerebbe la dipendenza da eventuali fluttuazioni nella luminosità emessa dalle sorgenti se tutte le misure di $V^{PHD_i}(t)$ fossero contemporanee. Poiché l'acquisizione digitale sui 16 canali dell'ADC non può essere contemporanea (il nostro ADC funziona in "multiplexing" acquisendo di volta in volta la tensione di un PHD differente), è necessario ridurre tali fluttuazioni inserendo dei tempi di attesa.

³Si tiene a precisare che la convenzione scelta dagli autori di [AMR03] per l'angolo θ è diversa dalla nostra.

sulla misura pari a $\frac{\sigma_i}{\sqrt{N}}$. L'errore relativo è sicuramente maggiore sui PHD meno illuminati dai LED. Prendendo in considerazione i fotorivelatori 1, 7, 8 e 14 (quelli meno illuminati, cfr. figura 3.8), con $N = 100$ acquisizioni si ottengono i seguenti valori per il ciclo completo di misura:

	\bar{x}_1	σ_1	\bar{x}_7	σ_7	\bar{x}_8	σ_8	\bar{x}_{14}	σ_{14}
<i>pedistallo 1</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED alto @ 10 mA</i>	385.70	17.66	416.95	17.76	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED alto @ 20 mA</i>	556.76	16.86	585.68	17.59	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>pedistallo 2</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED basso @ 10 mA</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	252.47	18.41	559.81	17.69
<i>LED basso @ 20 mA</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	388.59	17.03	821.63	16.92
<i>pedistallo 3</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tenendo conto che sono state effettuate $N = 100$ misure, gli errori relativi, calcolabili con $\frac{\sigma_i/\sqrt{N}}{\bar{x}_i}$, risultano essere dell'ordine del 3‰; per gli altri fotorivelatori, l'errore relativo è ancora minore (sui PHD di riferimento, l'errore relativo vale $\simeq 5 \cdot 10^{-4}$). È ragionevole effettuare, quindi, per ogni PHD 100 acquisizioni per avere un errore accettabile col compromesso del risparmio energetico.

Il ciclo di misura sarà eseguito due volte al giorno, ad intervalli di 12 ore, in quanto il processo di oscuramento è molto lento nel tempo e acquisizioni più frequenti comporterebbero un elevato dispendio energetico. È importante, però, acquisire dati due volte al giorno per avere misure indipendenti dall'alternanza del giorno e della notte.

Impostazioni degli strumenti per la misura degli altri parametri ambientali

Le correnti sottomarine aspettate, nel sito abissale di Capo Passero, hanno un valore medio di ~ 3 cm/s. Vogliamo associare alle misure di corrente un errore statistico che sia inferiore a ~ 0.1 cm/s, per poter apprezzare variazioni significative delle correnti sottomarine.

Come accennato nel capitolo 3, il correntometro viene utilizzato in modalità *Polled*, cioè esegue misure di corrente solo se viene richiesto, con opportuni comandi, tramite porta seriale. Il ciclo per acquisire dati di corrente, gestito con un opportuno programma dal *Single Board Computer*, può essere schematizzato nel modo seguente:

	comandi inviati dal SBC	risposta del correntometro al SBC
1	<i>Attivazione loop seriale</i>	<i>Carattere di controllo</i>
2	<i>Esecuzione N misure</i>	<i>Carattere di controllo</i>
3	<i>Richiesta dati</i>	<i>Dati mediati su N misure</i>
4	<i>Disattivazione loop seriale</i>	<i>Carattere di controllo</i>

Lo strumento, in modalità di basso consumo, viene “risvegliato” e posto in attesa di ricevere comandi su porta seriale. Successivamente, si comanda allo strumento di eseguire un numero preciso di misure e, quindi, vengono richiesti i dati mediati. Viene, infine, disattivato il *loop* di attesa sulla porta seriale e il correntometro, dopo 30 secondi, si pone in modalità di *stand-by*.

La risoluzione dichiarata nelle specifiche del correntometro è pari a $\sigma = 0.5$ cm/s. Per ogni ciclo d’acquisizione, vengono eseguite 50 misure di corrente marina (il correntometro emette cioè 50 serie di impulsi acustici); l’errore statistico da associare al valor medio diviene compatibile con la nostra richiesta espressa sopra. Numericamente si trova che l’errore statistico vale $\frac{\sigma}{\sqrt{50}} = 0.07$ cm/s, dove si è assunto $\sigma = 0.5$ cm/s.

Il CTD viene interrogato con una serie di comandi, inviati su porta seriale, molto simile a quella utilizzata per il correntometro; differisce la sintassi delle istruzioni (specifica di ogni strumento), le impostazioni di porta e la gestione dei dati. La comunicazione fra il *Single Board Computer* e il CTD può essere così schematizzata:

	comandi inviati dal SBC	risposta del CTD al SBC
1	<i>Accensione strumento</i>	<i>Menù di avvio</i>
2	<i>Esecuzione N misure</i>	<i>Dati acquisiti</i>
3	<i>Spegnimento strumento</i>	<i>Stringa di controllo</i>

Il CTD viene acceso, il *Single Board Computer* attende l’esecuzione di tutti i processi di avvio e di test dello strumento, vengono eseguite 10 misure

di temperatura, conducibilità e pressione per avere una statistica accettabile, e il CTD restituisce i valori dei parametri ambientali. Al termine del ciclo, il CTD viene riportato in modalità di *stand-by*.

Il ciclo di presa dati del correntometro e del CTD sarà eseguito ogni ora, perché è importante monitorare con continuità i parametri ambientali. Durante il ciclo di misura del *biofouling* (ogni 12 ore), saranno eseguite anche le misure di corrente, temperatura e salinità; inoltre, durante tale ciclo, saranno aggiunti al file di dati (cfr. tabella 3.3) le misure acquisite dal ciclo di *biofouling* precedente. Ogni salvataggio su disco, dunque, comprenderà i dati di acquisizione di un ciclo di *biofouling* e degli ultimi 12 cicli di misure eseguiti dal correntometro e dal CTD.

4.2 Connessioni dell'apparato

La strumentazione utilizzata per il nostro apparato autonomo è stata fissata sulla struttura meccanica mostrata in figura 4.1. Al centro della struttura è visibile l'alloggiamento circolare della sfera utilizzata per le misure dell'andamento della *Trasparenza*. All'interno di tale sfera di vetro, oltre ai PHD applicati sulla superficie interna, è stata alloggiata anche l'elettronica di gestione dell'apparato, composta dal *Single Board Computer*, dalla scheda di conversione analogico-digitale e dal circuito generatore di corrente per i LED. Sulle staffe radiali della struttura meccanica sono alloggiati il tubo contenente i due LED e i due PHD di riferimento, il correntometro, il CTD, il modem acustico e un pacco batterie che fornisce tre distinte alimentazioni (+14 V, +21 V, -14 V). I blocchi costituenti la stazione devono essere connessi in modo tale da garantire la corretta alimentazione per ogni strumento e la gestione delle periferiche da parte del SBC, alloggiato all'interno della sfera. Tutti i blocchi costituenti l'apparato devono ricevere l'alimentazione dal pacco batterie; opportune linee di porta seriale devono connettere i tre strumenti (correntometro, CTD e modem acustico) con il SBC; i LED e i PHD di riferimento, posti all'esterno della sfera, devono essere connessi con l'elettronica di gestione posta all'interno della sfera.

Per semplificare il numero delle connessioni necessarie, si è deciso di ri-

correre ad un nodo intermedio di distribuzione di tutte le linee elettriche necessarie alle connessioni dell'apparato. Tale "scatola di distribuzione" (o *Junction Box*) riceve tutte le linee elettriche di ingresso e di uscita degli strumenti. Tutti i blocchi costituenti l'apparato sono connessi fisicamente con la *Junction Box*; all'interno della *Junction Box* sono definite le opportune connessioni. La figura 4.9 mostra, utilizzando colori diversi, le connessioni realizzate all'interno della *Junction Box*.

La sfera di vetro riceve due distinte tensioni (+14 V e -14 V), necessarie all'alimentazione del *Single Board Computer*, dell'ADC, del generatore e dei 14 PHD; il SBC deve poter comunicare con gli strumenti esterni alla sfera attraverso le linee di porta seriale (ogni porta seriale è dedicata alla comunicazione bidirezionale con un singolo strumento); l'ADC deve ricevere i segnali di tensione dei due PHD di riferimento posti all'esterno della sfera; il generatore di corrente deve poter pilotare i due LED alloggiati all'esterno del modulo ottico; inoltre una porta seriale (COM1) e una linea di RESET del SBC sono necessarie all'esterno durante le operazioni di accensione dell'intero sistema (utilizzando un PC come terminale). Il CTD ed il modem acustico ricevono, attraverso due distinti connettori, le alimentazioni necessarie e le linee di porta seriale (porta seriale COM4 per il CTD, COM2 per il modem acustico). Il correntometro è dotato di un unico connettore "ibrido", attraverso il quale riceve le linee di alimentazione e di porta seriale (COM3). I LED alloggiati nel tubo esterno alla sfera sono connessi alle uscite del generatore di corrente; i PHD di riferimento ricevono le opportune alimentazioni e devono rendere disponibili le loro tensioni d'uscita. Il pacco batterie fornisce le tre alimentazioni di cui è dotato.

Dalla *Junction Box* partono cavi, di lunghezza opportuna, che terminano con uno specifico connettore, in funzione del blocco a cui questo deve essere connesso. Poiché all'interno della modulo ottico di vetro sono contenuti strumenti che necessitano di essere connessi con tutti i blocchi esterni, l'uso della *Junction Box* diviene indispensabile per evitare di utilizzare cavi che connettano la sfera a tutte le periferiche. Per connettere la sfera con l'esterno, si utilizzano degli opportuni connettori di profondità, fissati in fori, creati nella sfera stessa, di 1.75 cm di diametro. Utilizzare molti connettori per il

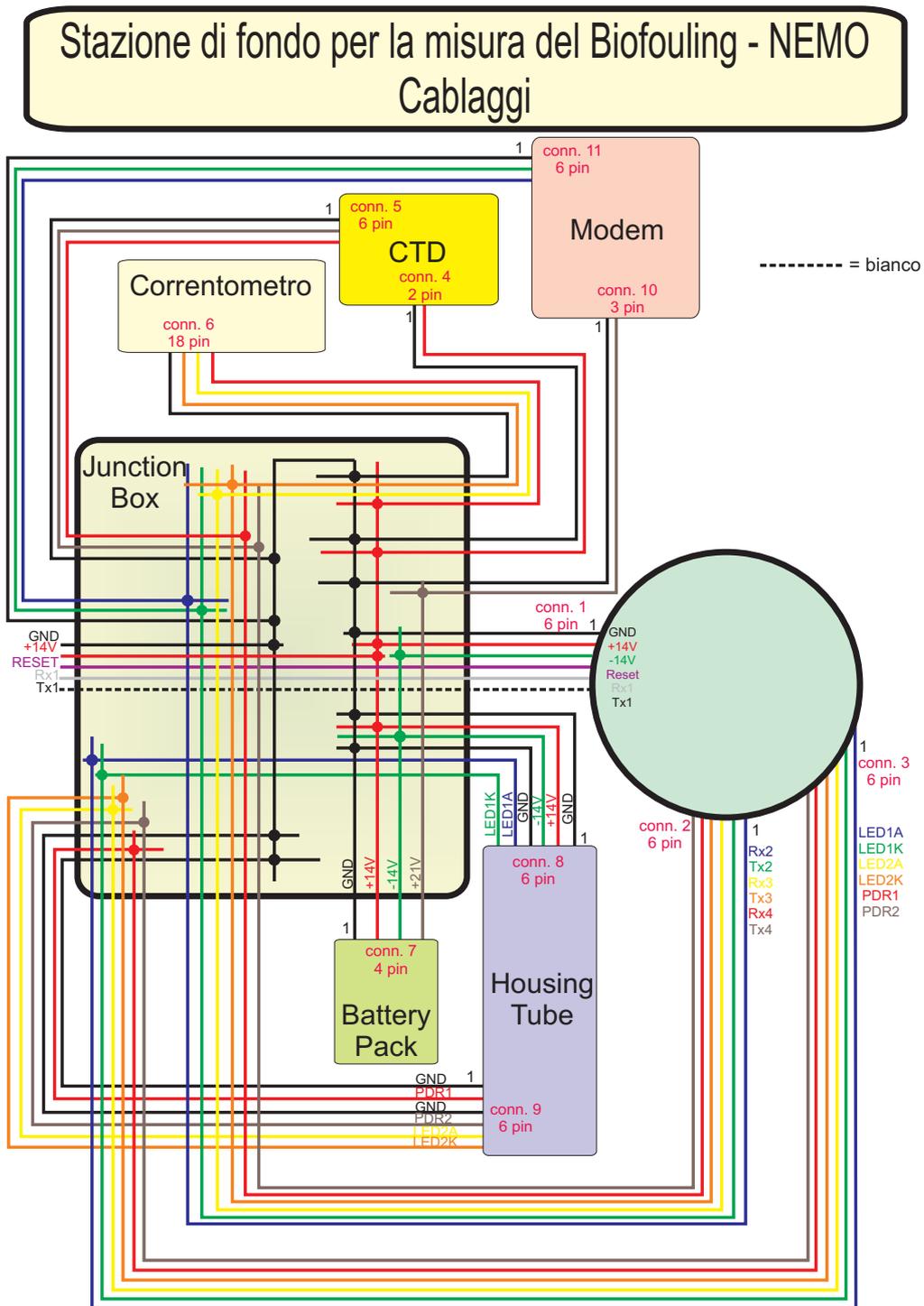


Figura 4.9: Schema elettrico dei cablaggi della stazione autonoma per misure sottomarine. I connettori dei diversi blocchi sono numerati in maniera univoca e per ognuno di essi è riportato il numero di linee elettriche di cui sono dotati.

modulo ottico (ad esempio volendo connettere direttamente le periferiche con la sfera di vetro) significa dover creare più fori sulla superficie del modulo ottico, rendendo fragile la struttura. La soluzione proposta evita l'insorgere di tali problemi.

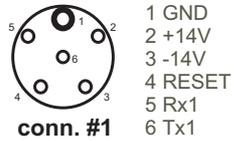
Per comprendere meglio il cablaggio dell'apparato autonomo sottomarino, vengono mostrati in figura 4.10 tutti i connettori dei cavi che escono dalla *Junction Box*, con vista dal lato dei blocchi a cui sono connessi. La numerazione è coerente con quella definita in figura 4.9. Per ogni linea elettrica presente sui connettori viene mostrata la funzione svolta.

4.3 Caratterizzazione dei consumi dell'apparato e stima della durata della presa dati

L'apparato autonomo sottomarino per la misura di parametri ottici e ambientali è stato realizzato e dimensionato come descritto nel capitolo 3 e nei precedenti paragrafi. Sono state organizzate le operazioni di gestione dei blocchi funzionali che compongono l'apparato, gestite dal *Single Board Computer*, la periodicità con la quale devono essere eseguite ed è stato deciso uno standard per la memorizzazione dei dati raccolti. È necessario, a questo punto, stimare il consumo energetico degli strumenti connessi, per valutare il tempo massimo di operatività in funzione della potenza richiesta dall'apparato. Si ricorda che l'apparato opera in maniera autonoma e che l'alimentazione è fornita da un pacco batterie connesso alla strumentazione stessa.

Il "pacco batterie" (figura 4.11) è composto da batterie al litio *Thionyl Chloride* (size D), che forniscono ognuna 3.5 V ed una capacità pari a 16.5 Ah. La massima corrente erogabile da ogni batteria è pari a 300 mA. La figura 4.11 mostra in che modo sono state connesse le varie batterie per ottenere +14 V, -14 V e +21 V. Ad esempio, per ottenere +14 V sono stati messi in parallelo otto gruppi di 4 batterie connesse in serie (ogni gruppo capace di fornire 14 V e 300 mA di corrente massima): in tal modo si è ottenuto un generatore con 14 V, $16.5Ah \cdot 8 = 132Ah$ di capacità e 2.4 A

Biofouling Sphere



- 1 GND
- 2 +14V
- 3 -14V
- 4 RESET
- 5 Rx1
- 6 Tx1

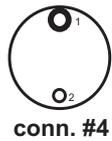


- 1 Rx2
- 2 Tx2
- 3 Rx3
- 4 Tx3
- 5 Rx4
- 6 Tx4



- 1 LED1a
- 2 LED1k
- 3 LED2a
- 4 LED2k
- 5 PDR1
- 6 PDR2

CTD

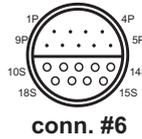


- 1 GND
- 2 +14V



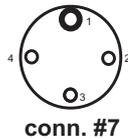
- 1 GND
- 2 Rx4
- 3 Tx4
- 4 n.c.
- 5 n.c.
- 6 n.c.

Current-metre



- 10S Rx3
- 11S Tx3
- 17S +14V
- 18S GND

Battery Pack



- 1 GND
- 2 +14V
- 3 -14V
- 4 +21V

LED Housing

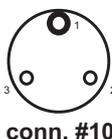


- 1 GND
- 2 +14V
- 3 -14V
- 4 GND
- 5 LED1a
- 6 LED1k



- 1 GND
- 2 PDR1
- 3 GND
- 4 PDR2
- 5 LED2a
- 6 LED2k

Modem



- 1 GND
- 2 +21V
- 3 n.c.



- 1 GND
- 2 Rx2
- 3 n.c.
- 4 Tx2
- 5 n.c.
- 6 n.c.

Pig-tail



- 1 GND
- 2 +14V
- 3 RESET
- 4 Rx1
- 5 Tx1
- 6 GND

Figura 4.10: Descrizione delle linee elettriche disponibili su ogni connettore. La numerazione segue la vista dal lato femmina.

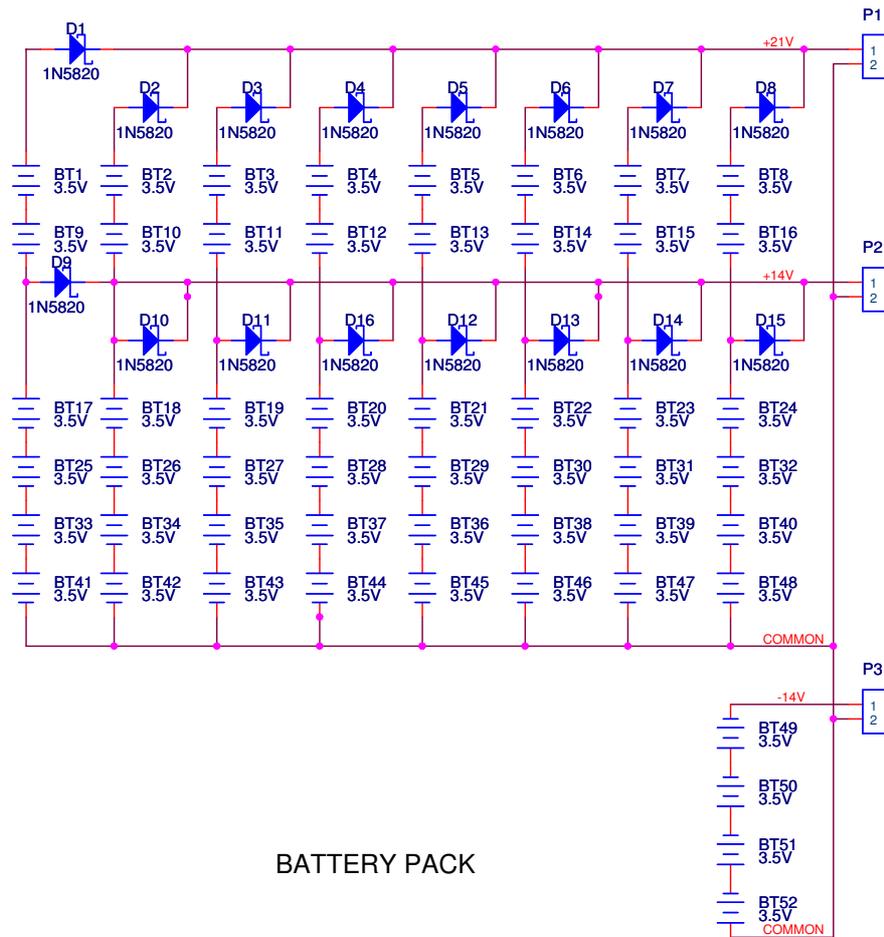


Figura 4.11: Schema elettrico del “pacco batterie”. Fornisce tensioni a +14 V, -14 V e +21V.

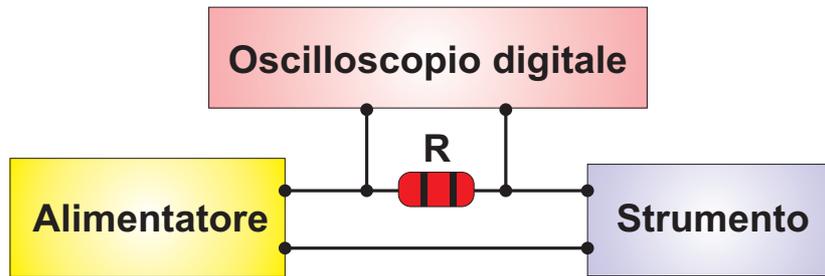


Figura 4.12: Metodo di misura dei consumi degli strumenti che compongono la stazione autonoma.

di corrente massima. Egualmente si è operato per ottenere i -14 V ed i $+21\text{ V}$. Ogni elemento di 4 batterie in serie è protetto da un diodo che impedisce l'eventuale scarica di tutte le batterie in un "ramo" che presenti una batteria in corto circuito. Tutte le batterie sono organizzate meccanicamente in un cilindro di titanio le cui misure interne sono: diametro 99 mm, altezza 1100 mm.

Si mostreranno ora i risultati delle misure dei consumi degli strumenti che compongono l'apparato autonomo.

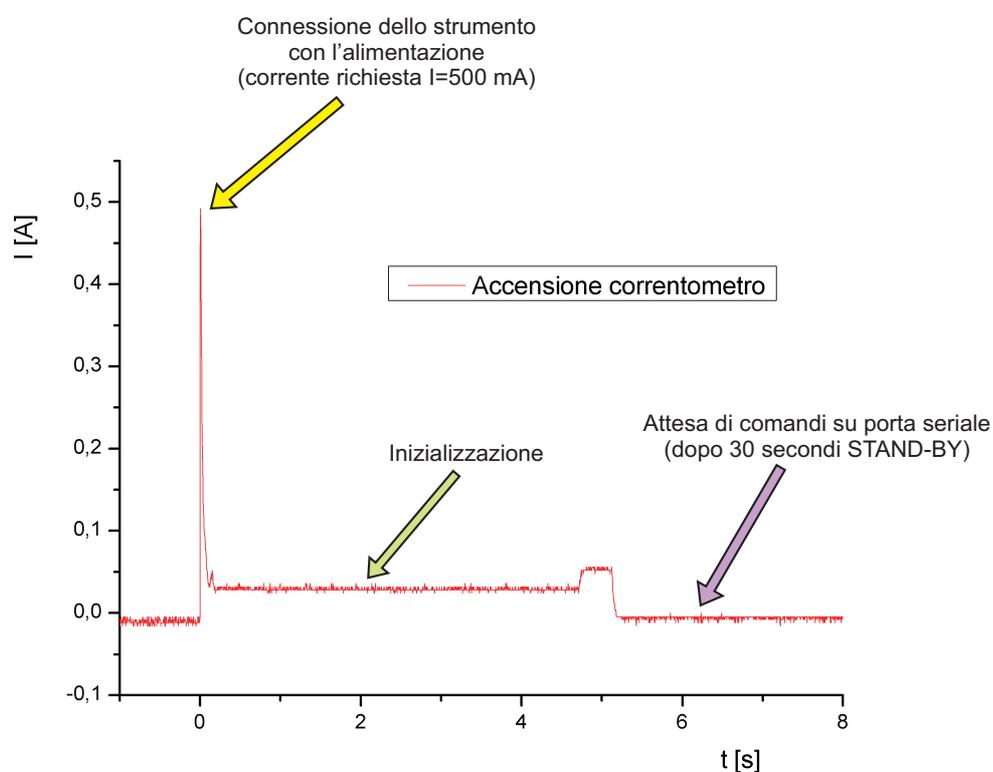
Le misure dei consumi dei vari strumenti sono state eseguite con una modalità tale da evidenziare i consumi in tutte le diverse fasi di accensione, misura e quiescenza dei vari strumenti. In particolare si è utilizzato un oscilloscopio digitale, registrando le tensioni ai capi di una resistenza, di valore $\sim 1\Omega$, posta in serie al circuito di alimentazione dello strumento in esame (figura 4.12).

Gli strumenti sono stati attivati singolarmente, con le istruzioni stabilite in precedenza per l'acquisizione di dati come in configurazione finale di misura. In tal modo, possiamo stimare il consumo e la durata dei cicli di attività di ogni singolo componente dell'apparato. Misurando la corrente richiesta dai singoli blocchi durante la fase di *stand-by*, si può stimare il consumo totale giornaliero dell'apparato autonomo (fissata la frequenza di presa dati e di operatività dei diversi blocchi funzionali). Nota la capacità totale del pacco

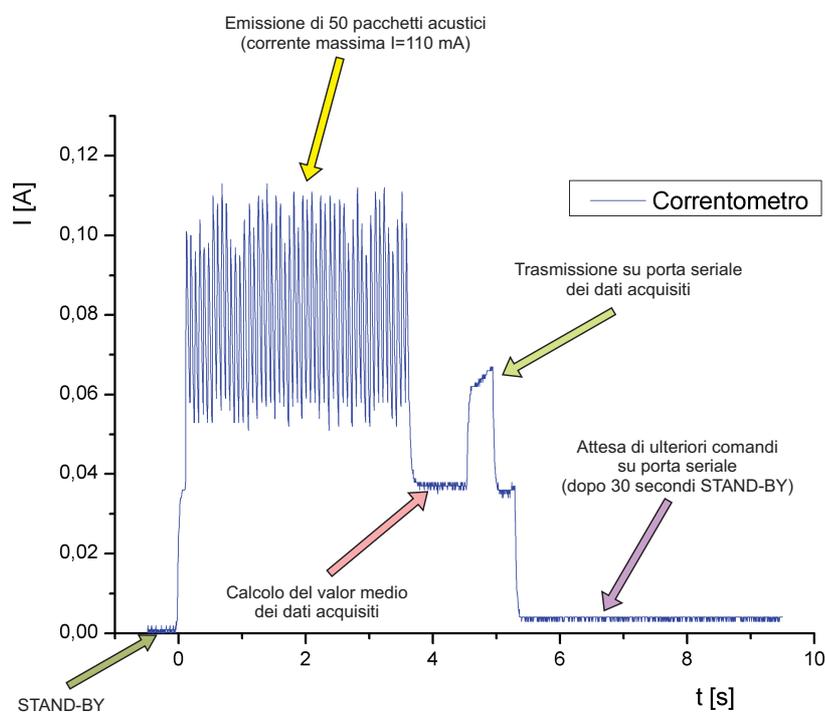
batterie che alimenta il nostro apparato, siamo in grado di ricavare il tempo aspettato di operazione.

Si mostrano nelle figure seguenti gli andamenti nel tempo della corrente richiesta dal correntometro, dal CTD, dal modem acustico e dal blocco composto dai LED più i PHD, necessaria ad eseguire un ciclo completo di presa dati. Integrando le curve di corrente nel tempo per la durata di un ciclo di acquisizione e moltiplicando per la tensione di alimentazione dello strumento otteniamo l'energia richiesta dallo strumento (in $W \cdot h$). È altresì importante stimare l'energia massima richiesta dagli strumenti per confrontarla con la corrente erogabile dal pacco batterie.

La figura 4.13(a) mostra l'andamento della corrente richiesta dal correntometro nella fase di accensione, che avviene nel momento in cui lo strumento viene connesso con l'alimentazione. In tale istante si osserva un picco di corrente ($I \simeq 500mA$), seguito da una fase di inizializzazione della durata di $\sim 5s$, trascorsa la quale lo strumento è in grado di ricevere comandi su porta seriale. Dopo 30 s di attesa, lo strumento si pone automaticamente in modalità di basso consumo. Questo andamento di corrente non si ripeterà mai durante tutto il periodo di presa dati dell'apparato, in quanto gli strumenti non vengono mai disconnessi dall'alimentazione. Questa figura viene mostrata per verificare se il pacco batterie, definito in precedenza, possa fornire la corrente massima richiesta dall'apparato nel suo insieme. La figura 4.13(b) mostra la corrente richiesta dal correntometro, con una tensione di alimentazione di 14 V, per l'esecuzione di un ciclo completo di misura. Si distinguono le diverse fasi durante le quali lo strumento esegue le differenti operazioni. Dopo aver ricevuto, tramite porta seriale, il comando opportuno, il correntometro si risveglia ed inizia l'acquisizione delle misure di corrente sottomarina attraverso l'emissione di una serie di 50 impulsi acustici, richiedendo, per ogni impulso, una corrente istantanea di $\sim 110mA$. Successivamente, si osserva una fase di consumo costante in cui il correntometro calcola il valor medio dei parametri misurati, seguita dalla trasmissione su porta seriale dei dati raccolti. Il correntometro rimane in attesa di ricevere ulteriori comandi per 30



(a)



(b)

Figura 4.13: Corrente espressa in Ampère richiesta dal correntometro durante la fase di accensione (a) e durante l'esecuzione di un ciclo completo di misura (b). L'accensione viene eseguita solo una volta in tutto il periodo di operatività; si ricava la corrente massima richiesta dallo strumento per confrontarla con la corrente massima erogabile dal pacco batterie.

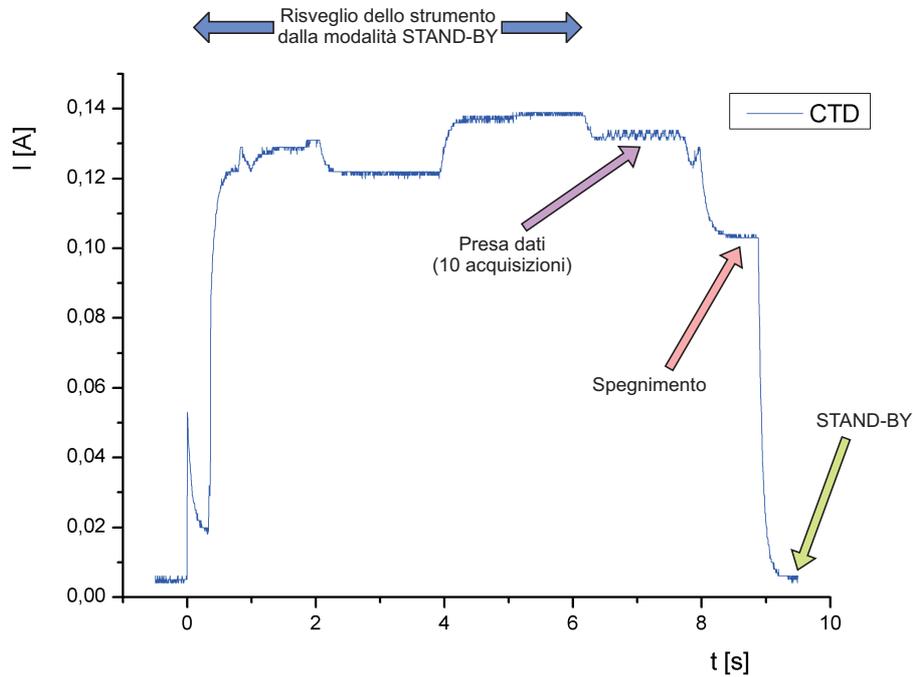


Figura 4.14: Corrente in Ampère richiesta dal CTD durante l'esecuzione di un ciclo completo di misura. Il livello di *stand-by* è visibile sia prima che dopo l'esecuzione del ciclo.

secondi; trascorso tale tempo, lo strumento si pone in modalità di *stand-by*. La durata totale di un ciclo di misure del correntometro è di $\simeq 36\text{s}$; il correntometro viene attivato dal SBC ad intervalli regolari di sessanta minuti: il tempo di attività giornaliero è di 864 s.

Il CTD è alimentato, come il correntometro, a 14 V. In figura 4.14 è mostrato l'andamento della corrente durante il ciclo di acquisizione del CTD; sono evidenziate le varie fasi del ciclo. A differenza di quanto accade con il correntometro, non si osserva un andamento diverso per l'istante in cui lo strumento è connesso con l'alimentazione. Inviando un comando tramite porta seriale, lo strumento esce dalla modalità di *stand-by* ed inizia la fase di "accensione", durante la quale avvia un'applicazione per la gestione delle

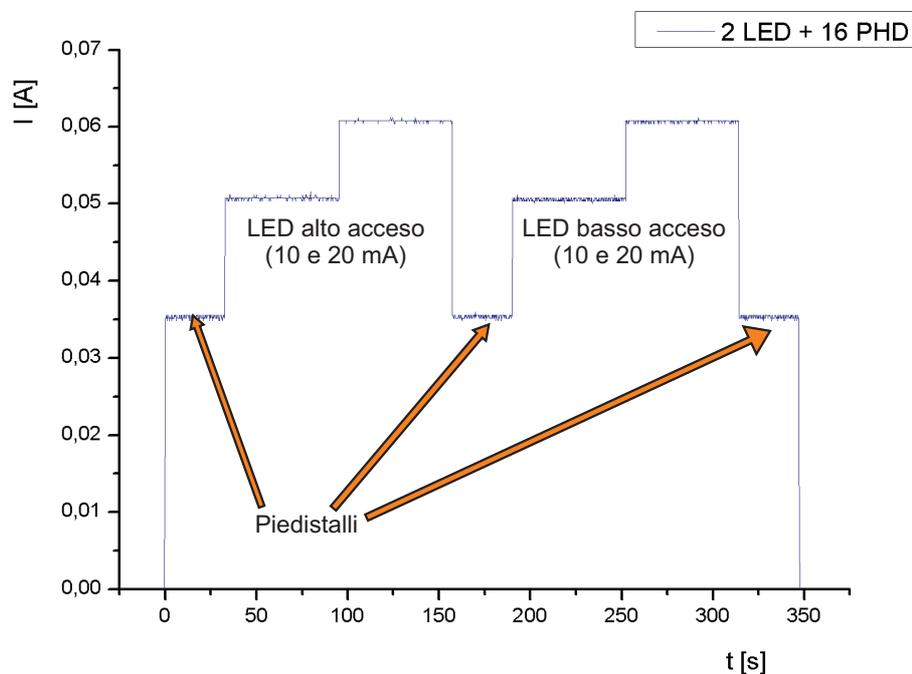


Figura 4.15: Corrente richiesta dal blocco 2 LED più 16 PHD, sull'alimentazione a +14 V, per l'esecuzione di un ciclo completo per la stima della trasparenza del modulo ottico.

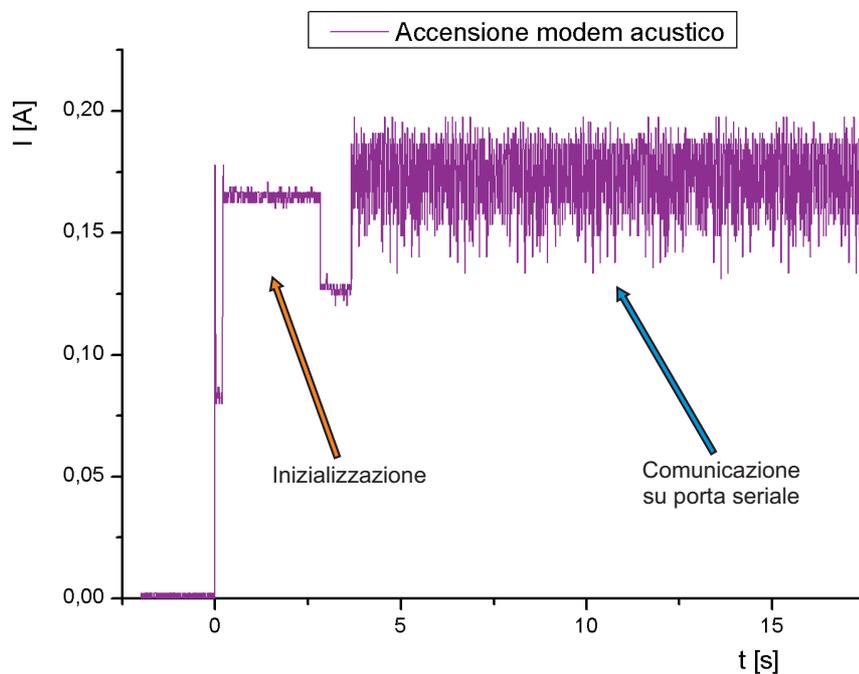
acquisizioni ed esegue alcuni processi di auto-test. Il SBC interroga allora lo strumento richiedendo l'esecuzione di dieci misure, ricevendo immediatamente i valori di temperatura, conducibilità e salinità. Al termine delle acquisizioni, il SBC ordina l'arresto di tutti i processi ed il CTD si riporta in modalità di basso consumo. Il ciclo di misura del CTD ha una durata di ~ 10 secondi.

La misura dei consumi della strumentazione per la stima del *biofouling* è stata eseguita considerando complessivamente la corrente richiesta dai 16 PHD più i due LED. I due LED sono alimentati dal generatore di corrente, pilotato attraverso linee digitali di output del SBC ed alimentato a +14

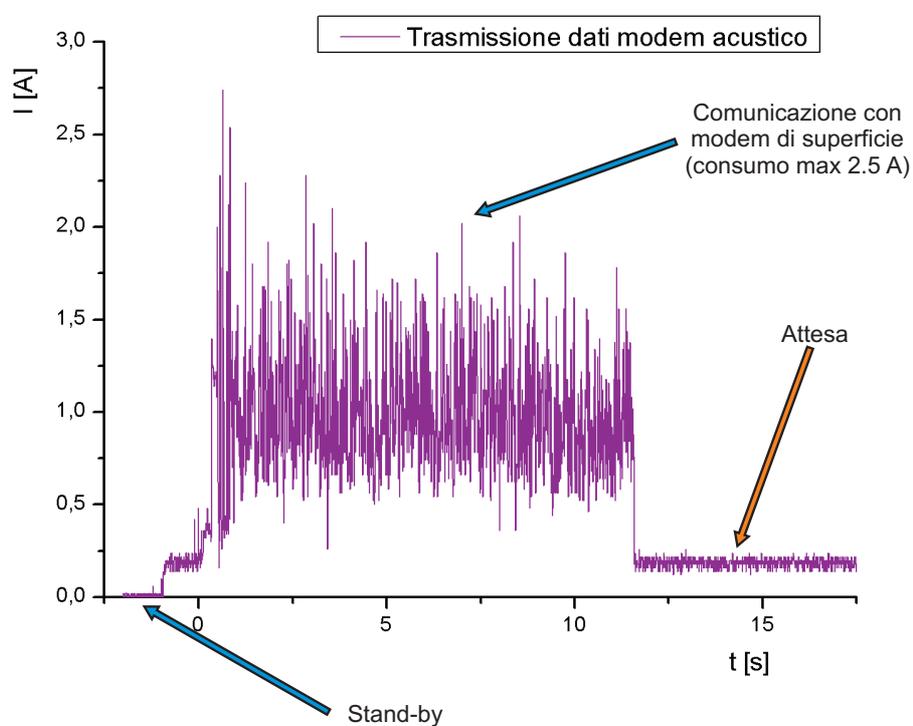
V. I 16 PHD sono alimentati solo durante l'esecuzione dei cicli di misura con due distinte tensioni, a +14 V e a -14 V; un opportuno interruttore, pilotato con le linee digitali di output del SBC, esclude le tensioni ai capi dei PHD durante i periodi di attesa tra un ciclo e il successivo. La figura 4.15 mostra l'andamento della corrente richiesta dai PHD e dai LED, misurata sull'alimentazione a 14 V. Sono visibili le tre fasi di "piedistallo", prima e dopo l'accensione di ciascun LED, e i due livelli di corrente a cui vengono accesi i LED. Il tempo necessario alla conversione del segnale analogico di tensione ai capi dei 16 PHD da parte dell'ADC è di $\sim 32s$ (100 conversioni per i 16 canali d'ingresso della scheda). L'inizio della conversione del segnale di tensione avviene 30 secondi dopo l'accensione dei LED; l'acquisizione del segnale di buio (i "piedistalli") viene eseguita, invece, inserendo un'attesa molto minore (1 s) dallo spegnimento dei LED. Complessivamente, il ciclo di acquisizione delle tensioni ai capi dei PHD per varie illuminazioni del modulo ottico ha una durata di $\sim 345s$. La corrente richiesta dai PHD sull'alimentazione a -14 V è costante per tutto il ciclo di misura e vale 35 mA.

Il modem acustico viene alimentato con una tensione pari a +21 V. In figura 4.16 sono mostrati gli andamenti del consumo di corrente da parte del modem. In 4.16(a) è riportato l'andamento del consumo del modem quando viene risvegliato dal SBC con un opportuno comando su porta seriale, con un successivo trasferimento di dati dal SBC al modem acustico. In 4.16(b) è mostrata la fase di comunicazione del modem con un operatore di superficie: i picchi di corrente corrispondono alla trasmissione di pacchetti acustici in acqua. In questa fase, la corrente istantanea richiesta raggiunge dei valori vicini a 2.5 A. Tale fase di trasmissione dati avviene solo nel momento in cui il modem acustico viene interrogato da superficie tramite un altro modem: per la stima dei consumi si assumerà che tale trasmissione avviene una volta al mese, con una durata media di 15 minuti.

Il *Single Board Computer* e l'ADC sono alimentati a +5 V. Tale tensione viene generata all'interno della sfera Benthos con l'ausilio di un convertito-



(a)



(b)

Figura 4.16: (a) Accensione del modem acustico e trasmissione su porta seriale di un pacchetto di dati. (b) Trasmissione di dati per via acustica ad un modem di superficie. In questa fase di trasmissione si osservano dei picchi di corrente istantanea pari a 2.5 A.

		alim. [V]	corr. [mA]	tempo [h]	energia [W·h]
Correntometro	ON	+14	12.8	7.2	1.3
	ST.BY	+14	0.195	712.8	1.9
CTD	ON	+14	110	2	3.1
	ST.BY	+14	5	718	50.2
2LED + 16PHD	ON	+14	55	5.75	4.4
	ST.BY	+14	10^{-3}	714.25	0.01
	ON	-14	35	5.75	2.8
	ST.BY	-14	10^{-3}	714.25	0.01
SBC + ADC	ON	+14	250	16.7	58.4
	ST.BY	+14	14.3	703.3	140.6
Modem acustico	ON	+21	1000	0.25	5.2
	ST.BY	+21	11	719.75	160

Tabella 4.2: Stima dei consumi dell'apparato sottomarino. Il tempo di attività, espresso in ore, è stato calcolato considerando il numero di cicli di misura previsti in un mese di 30 giorni. L'energia richiesta è calcolata su base mensile.

re di tensione, a partire dai +14 V. Il consumo misurato tiene conto della potenza dissipata dal regolatore.

La tabella 4.2 mostra schematicamente i risultati delle misure effettuate. Il tempo riportato in ore è stimato su un periodo di trenta giorni; la corrente di attività delle periferiche è il valor medio sull'intervallo considerato; l'energia in W·h è stimata su base mensile.

La corrente massima e l'energia che può fornire il pacco batterie sono le seguenti:

alimentazione [V]	corrente massima [mA]	energia [W·h]
+14 V e +21 V	2400	2772
-14 V	300	231

L'energia richiesta in un mese per le tensioni a +14 ed a +21 V risulta essere complessivamente 425 W·h, mentre per la tensione a -14 V ammonta a 2.8 W·h. Il tempo massimo di attività del nostro apparato autonomo

può essere facilmente stimato in ~ 6 mesi e mezzo, durante il quale saranno eseguite circa 400 acquisizioni per la stima della variazione della *Trasparenza* ed oltre 4500 acquisizioni di correnti, temperatura e salinità.