Capitolo 3

Il biofouling

3.1 Origine biologica del fenomeno

Un apparato basato sulla rivelazione della luce Čerenkov, prodotta in acqua dalle particelle generate nell'interazione di neutrini, è fortemente dipendente dalle proprietà di trasmissione della luce in acqua (assorbimento, diffusione) e dalle caratteristiche dei sensori (area del fotocatodo, efficienza di rivelazione dei fotoni, trasparenza delle superfici dei moduli ottici).
Le caratteristiche del sito sottomarino devono essere studiate con cura, caratterizzando le lunghezze di assorbimento e di diffusione per l'intervallo di lunghezze d'onda rilevanti per l'esperimento ($320nm \leq \lambda \leq 580nm$).
La presenza di particolato, costituito da sedimenti di origine organica e/o inorganica, influenza la trasmissione della luce in acqua ed inoltre la sua deposizione sulla superficie dei moduli ottici può modificarne la trasparenza.
Uno studio delle proprietà ottiche del sito in cui l'esperimento verrà realizzato è molto importante ai fini della progettazione dell'apparato, vista l'impossibilità di intervenire su eventuali malfunzionamenti una volta che l'esperimento sarà stato messo in mare. Volendo prendere misure per diversi anni, è quindi importante quantificare l'entità di processi che con il tempo possono portare ad una diminuzione dell'efficienza dei rivelatori ottici: i risultati di tale studio

possono aiutare a progettare l'apparato sperimentale in modo tale che la sua efficienza non vari in modo sensibile nel tempo.

Uno dei processi che contribuiscono alla diminuzione della trasparenza dei moduli ottici e dunque dell'efficienza di rivelazione dei muoni, è il cosiddetto **biofouling**, il progressivo sviluppo di materiale organico su una superficie posta in acqua marina: nel nostro caso le sfere Benthos che contengono i PMT.

Il processo di *fouling* inizia appena l'apparato viene messo in mare [20]: pochi minuti dopo l'immersione, la superficie inizia a ricoprirsi di una sottile pellicola biologica. Questo processo continua fino a quando la pellicola adsorbe altro materiale, sia organico che inorganico, che si trova nelle vicinanze: in questo modo si forma la patina a cui si possono successivamente attaccare batteri, funghi o alghe.

Il processo di adesione da parte di questi organismi più *complessi* può essere in un primo momento reversibile, invece la diminuzione della trasparenza della superficie sarà inevitabile dopo l'inizio della secrezione di polimeri extracellulari che possono ancorare il particolato alla pellicola: il costante ripetersi di questo fenomeno crea delle vere e proprie ***colonie*** sulla superficie delle sfere.

Il biofilm è dunque formato da colonie di batteri, alghe e funghi insieme alle loro secrezioni extracellulari.

Un altro fenomeno che può diminuire l'efficienza dell'apparato è la deposizione di sedimenti di altro tipo, anche inorganici, sulla superficie degli OM. Questo processo è meno prevedibile del precedente ed è inoltre legato all'andamento delle correnti marine: ci si aspetta solo che una superficie rivolta verso il basso ne sia meno affetta rispetto ad una rivolta verso l'alto.

3.2 Apparato Sperimentale

Per stimare in modo accurato l'effetto di questi processi sono state fatte delle misure nel sito abissale prescelto da NEMO per il posizionamento del telescopio per neutrini: si trova a 80 km a S.E. di Capo Passero (Sicilia) e a circa 3300 metri di profondità. La presa dati è iniziata nel marzo 2003 ed è terminata nell'ottobre 2004, per una durata complessiva di 19 mesi.

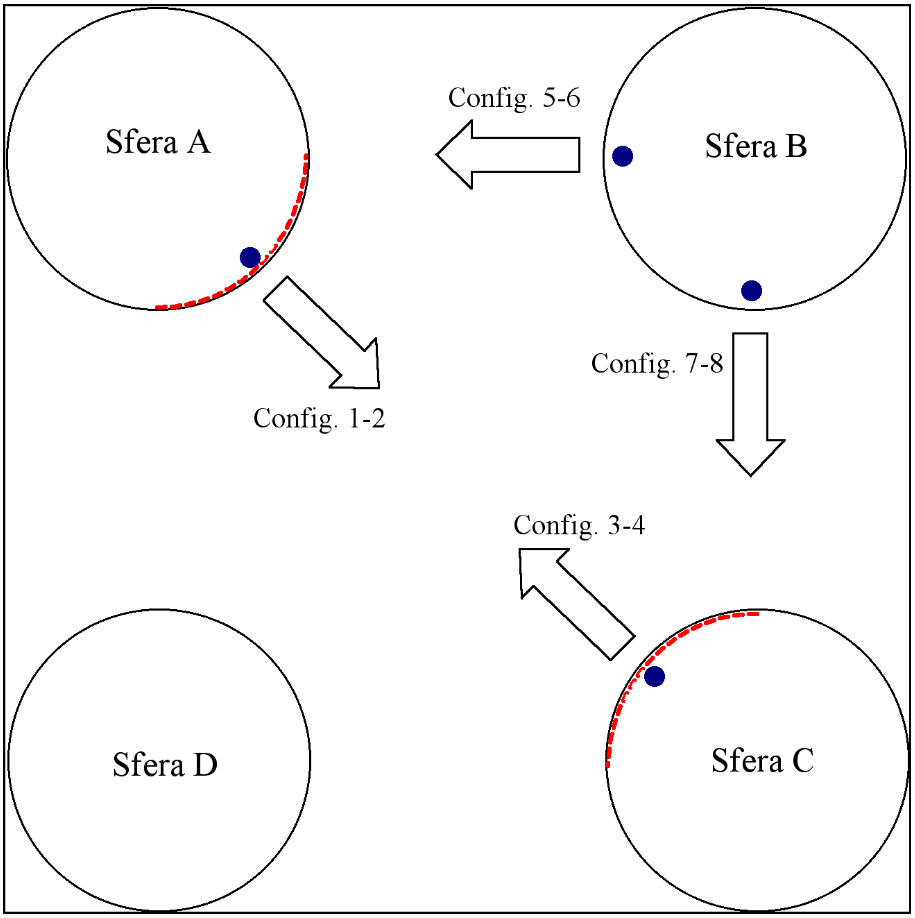

Figura 3.1: *Descrizione schematica dell'apparato sperimentale per lo studio del biofouling: le macchie blu rappresentano le sorgenti, mentre i trattini rossi rappresentano i fotodiodi.*

L'apparato sperimentale, mostrato nella foto in figura 3.2, viene schematicamente riprodotto in figura 3.1: consiste in una struttura di supporto in alluminio su cui sono poste quattro sfere Benthos, all'interno delle quali ci sono dei fotodiodi (PIN) e dei LED (Light Emitting Diode), insieme ad un sistema di alimentazione e di acquisizione dati.
In particolare:

- la sfera A contiene un sistema di acquisizione e immagazzinamento dei dati, tre LED blu (organizzati in un'unica *terna*), sedici PIN, un inclinometro e un compass per misurare lo spostamento dell'apparato rispetto ad una fissata posizione iniziale.

- la sfera B contiene le batterie per l'intero sistema e sei LED, raggruppati in due *terne*.
- la sfera C contiene tre LED e sedici fotodiodi.
- la sfera D è vuota e viene utilizzata solo per questioni di equilibrio meccanico.

I fotodiodi e le sfere sono stati disposti in modo omogeneo sulle sfere, per poter fare uno studio completo della trasparenza della superficie del modulo ottico. La disposizione dei fotodiodi e delle sorgenti sulle sfere è riassunta nelle tabelle 3.1 e 3.2, mentre la convenzione usata per i valori dell'angolo θ è schematicamente rappresentata in figura 3.3. Le terne di LED fanno da sorgente di luce e vengono accese in questo modo: prima uno da solo e poi gli altri due insieme. Ogni *sorgente* comprende tre LED e due PIN.
Tali PIN, detti di "riferimento", posizionati all'interno delle sfere vicino ai LED, servono a controllarne eventuali malfunzionamenti e permettono di effettuare misure di variazioni di trasparenza delle superfici esterne della sfera anche in condizioni di eventuali variazioni dell'intensità della luce emessa dai LED. I fotodiodi sono posti sulle superfici interne delle sfere A e C e la loro disposizione sulle due sfere è rappresentata nella figura 3.4.

Le misure vengono prese a distanza di dodici ore: quando una delle sorgenti è accesa, il segnale in corrente raccolto dai PIN è trasformato in tensione e infine reso digitale da un ADC (Analogic-Digital Converter). Inizialmente vengono prese delle misure con i LED spenti: servono a valutare il rumore elettronico presente sull'ingresso dell'ADC e/o prodotto dagli stessi fotodiodi, il cosiddetto "piedistallo" del canale ADC. Terminata questa prima fase di *controllo del rumore* la catena di acquisizione procede in questo modo:

- **Configurazione 1**: viene acceso un solo LED, posto a $\theta = -45°$ sulla sfera A. Questo è messo in modo tale da illuminare la sfera C. Vengono letti i dati acquisiti dai quattordici PIN della sfera C e i PIN di riferimento della sorgente (posti sulla sfera A).

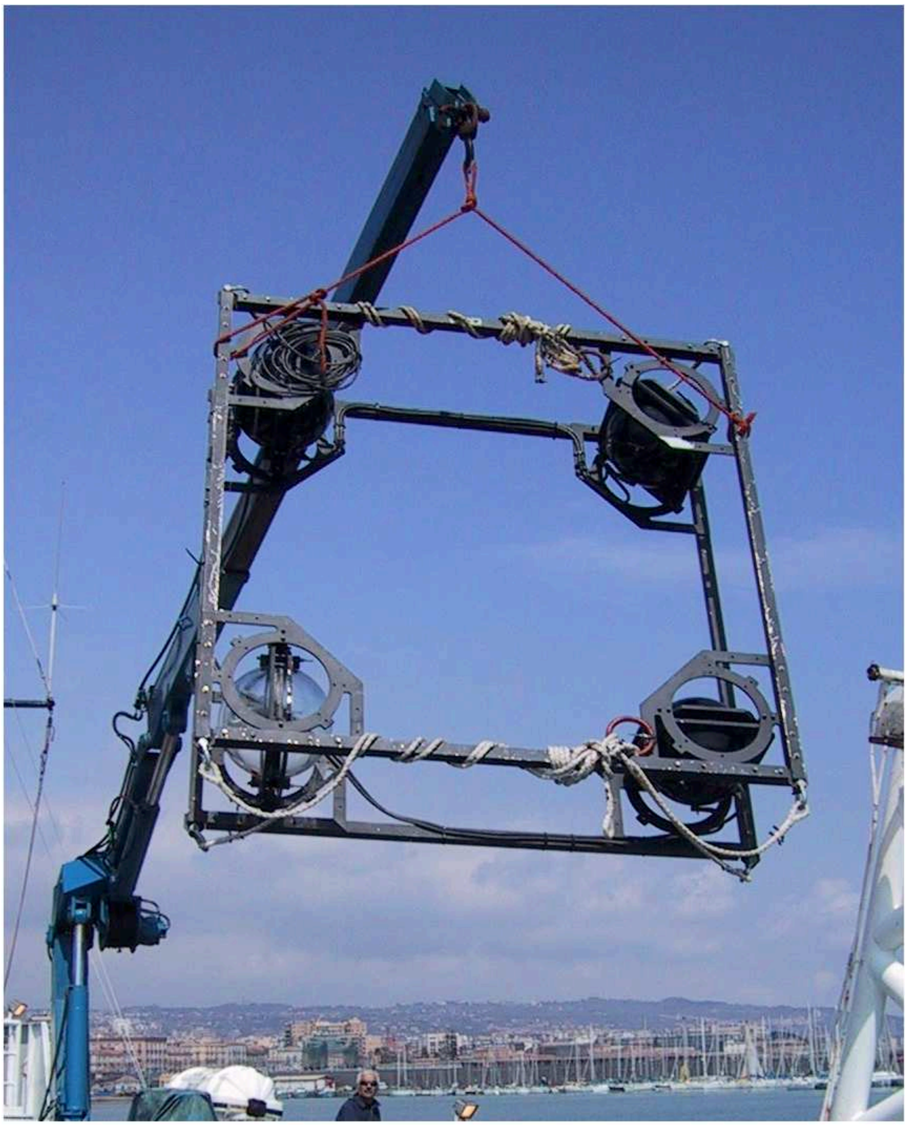

Figura 3.2: *Apparato sperimentale per la misura del biofouling.*

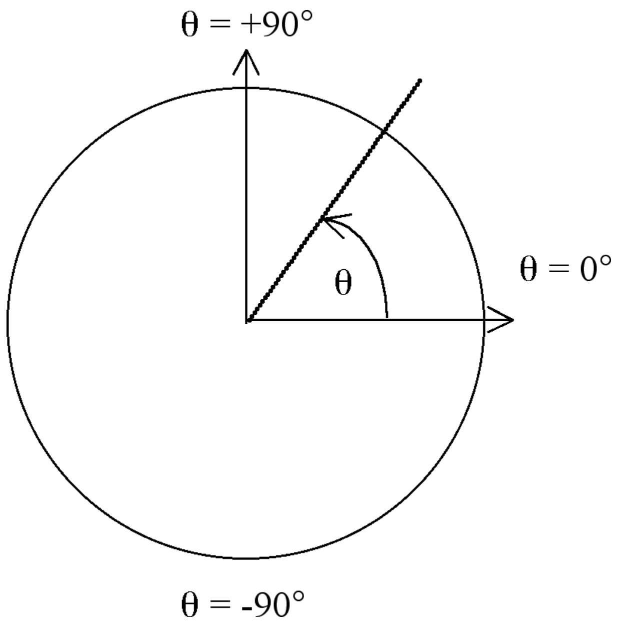

Figura 3.3: *Convenzione usata per i valori dell'angolo di zenith, misurato sul modulo ottico. Il "Polo Nord" della sfera corrisponde a $\theta = 90°$, l'"equatore" corrisponde a $\theta = 0°$, e il "Polo Sud" della sfera corrisponde a $\theta = -90°$.*

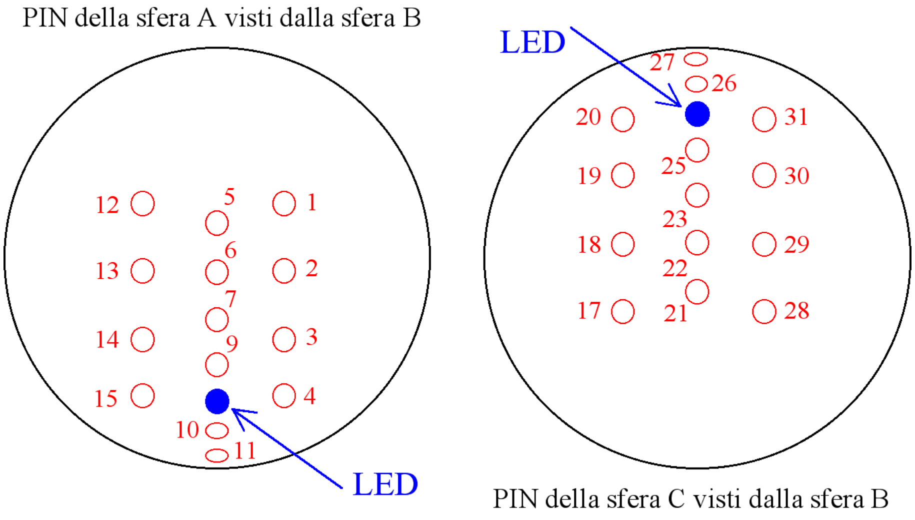

Figura 3.4: *Disposizione dei PIN (cerchi vuoti numerati) e dei LED (cerchi pieni) sulle sfere Benthos A e C: a sinistra si ha la disposizione dei PIN della sfera A, vista dal lato destro; a destra si ha la disposizione dei PIN della sfera C, vista dall'alto.*

SFERA A PIN	θ	ϕ	PIN	θ	ϕ
1	$30°$	$45°$	9	$-30°$	$0°$
2	$-20°$	$30°$	10	$-60°$	$0°$
3	$-30°$	$45°$	11	$-75°$	$0°$
4	$-50°$	$50°$	12	$30°$	$315°$
5	$15°$	$0°$	13	$-20°$	$330°$
6	$0°$	$0°$	14	$-30°$	$315°$
7	$-15°$	$0°$	15	$-50°$	$310°$
LED	$-45°$	$0°$			

Tabella 3.1: *Posizione dei fotodiodi e del LED sulla sfera A, l'angolo θ è definito come in figura 3.3, la posizione del LED sulla sfera indica il valore $\phi = 0°$. L'angolo ϕ viene poi misurato in senso antiorario.*

- **Configurazione 2**: viene ripetuto lo stesso procedimento descritto per la configurazione 1, ma con due LED accesi. (Nel seguito indicheremo con 1 LED o 2 LED i dati raccolti con le diverse configurazioni delle sorgenti).

- **Configurazioni 3-4** (conf. 3 = 1 LED, conf. 4 = 2 LED): viene utilizzata la sorgente posta sulla sfera C a $\theta = 45°$ e vengono acquisiti i dati dei PIN della sfera A e dei due PIN di riferimento (posti sulla sfera che emette, in questo caso la C). Stesso procedimento viene seguito accendendo due LED.

- **Configurazioni 5-6** (conf. 5 = 1 LED, conf. 6 = 2 LED): vengono accesi i LED della sorgente posta nella sfera B a $\theta = 0°$, con le stesse modalità viste in precedenza.

- **Configurazioni 7-8** (conf. 7 = 1 LED, conf. 8 = 2 LED): vengono accesi i LED dell'altra sorgente che si trova sulla sfera B, rivolta verso la sfera C a $\theta = -90°$, e viene ripetuta la stessa catena di acquisizioni.

SFERA C PIN	θ	ϕ	PIN	θ	ϕ
17	$120°$	$135°$	25	$60°$	$0°$
18	$70°$	$90°$	26	$30°$	$0°$
19	$60°$	$45°$	27	$15°$	$0°$
20	$40°$	$30°$	28	$120°$	$225°$
21	$105°$	$180°$	29	$70°$	$270°$
22	$90°$	$0°$	30	$60°$	$315°$
23	$75°$	$0°$	31	$40°$	$330°$
LED	$45°$	$0°$			
SFERA B **LED**	$-90°$	$0°$	**LED**	$0°$	$0°$

Tabella 3.2: *Posizione dei fotodiodi e dei LED sulle sfere C e B, l'angolo θ è definito come in figura 3.3, la posizione dei LED corrisponde al valore $\phi = 0°$. L'angolo ϕ viene misurato in senso antiorario.*

Per ogni diversa configurazione di acquisizione le misure vengono ripetute per dieci volte e i risultati così ottenuti vengono mediati tra loro.
L'ultima fase di misure viene fatta di nuovo con i LED spenti, questi ultimi dati vengono mediati con quelli ottenuti nella fase preliminare delle misure, per avere una migliore valutazione del fondo. I dati che vengono registrati, scritti su disco, sono i valori medi dei segnali ottenuti con le dieci acquisizioni, ai quali è già stato sottratto il valore del "piedistallo" del canale ADC corrispondente.

3.3 Andamento temporale della trasparenza

Il presente lavoro di analisi è diviso in due parti: nella prima è stato studiato l'andamento temporale dei valori registrati dai fotodiodi, e nella seconda parte si è cercata una dipendenza tra la posizione dei PIN sulla sfera, in particolare tra la latitudine (individuata dall'angolo θ) e l'oscuramento delle sfere stesse.

In figura 3.5 è mostrato l'andamento temporale del segnale (a cui è stato sottratto il piedistallo)

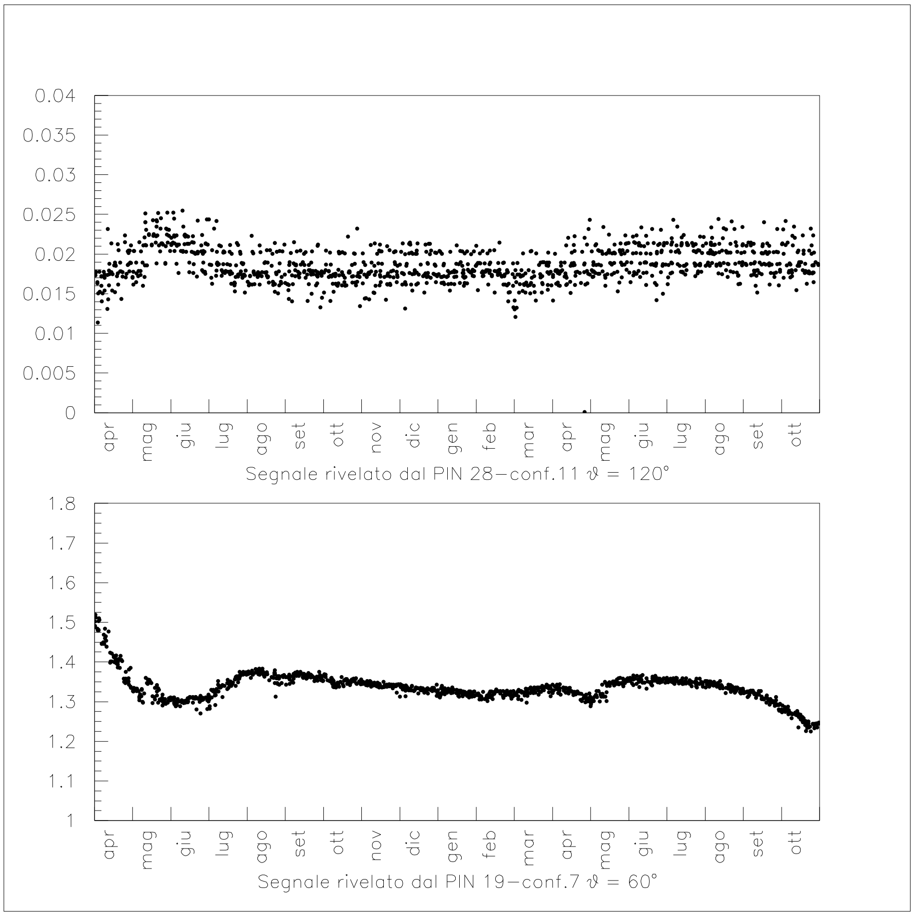

Figura 3.5: *Andamento temporale del segnale raccolto da due PIN che si trovano sulla sfera C. In alto sono rappresentati i valori del segnale rivelato dal PIN 28, che si trova ad una latitudine $\theta = 120°$ e in basso i segnali del PIN 19 che si trova a $\theta = 60°$.*

raccolto da due PIN, entrambi posti sulla sfera C. Nella figura in alto è rappresentato un PIN posto a $\theta = 120°$, quando viene illuminato dalla sorgente posta a $\theta = -45°$, rispetto alla quale è "nascosto" e quindi il segnale raccolto da questo fotodiodo è praticamente costituito solo dal rumore. Nella figura in basso è invece rappresentato l'andamento del segnale raccolto da un PIN che si trova a $\theta = 60°$ quando viene illuminato dalla sorgente, posta sulla sfera B a $\theta = -90°$ e in questo caso il segnale raccolto è di intensità maggiore.

È stato analizzato l'andamento del segnale registrato dai singoli fotodiodi, rispetto a quello dei corrispondenti PIN di riferimento posti vicino alla sorgente che emette il segnale. Si è cioè deciso di utilizzare la grandezza $\frac{Pin((\theta,t)}{Ref(\theta,t)}$. Per valutare l'andamento temporale delle misure si è confrontata tale grandezza con il valore da questa assunto all'inizio della misura ($t = 0$).

Si studia dunque per ogni fotodiodo la trasparenza $Trasp(\theta, t)$, dove t rappresenta il tempo trascorso dall'inizio dell'esperimento e θ è individuato dalla posizione del PIN sulla sfera.

$$Trasp(\theta, t) = \frac{\frac{Pin(\theta,t)}{Ref(\theta,t)}}{\frac{Pin(\theta,t=0)}{Ref(\theta,t=0)}} \tag{3.1}$$

Ricordiamo che $Pin(\theta, t)$ e $Ref(\theta, t)$ indicano in questa fase valori già mediati su dieci acquisizioni e corretti per il piedistallo dell'ADC.

Questa scelta ha il vantaggio di rendere gli andamenti indipendenti dalla sorgente e dalla posizione del PIN rispetto ad essa, inoltre la formula 3.1 rende tutti valori di $Trasp(\theta, t)$ compresi tra 0 e 1 e pari all'unità per $t = 0$.

Dividendo per il valore del PIN di riferimento si ottiene una variabile indipendente dalle fluttuazioni del segnale emesso dai LED. Per lo stesso PIN inoltre potremo studiare l'andamento quando è illuminato con uno o due LED ed avremo la possibilità di confrontare le due misure valutando eventuali errori sistematici.

I PIN di riferimento mostrano un andamento molto stabile nel tempo e quindi sono ottimali per la "normalizzazione" dei segnali acquisiti dai PIN disposti sulla sfera. La scelta del PIN da usare come riferimento, fra i due disponibili per ogni sorgente, risulta essere irrilevante: a posteriori si verifica che scegliere uno l'altro dei due PIN comporterebbe una differenza sistematica minore dell'1%.

Ci sono casi in cui la risposta dei PIN mostra improvvise e grandi variazioni: se il PIN è parzialmente oscurato dai sedimenti (figura 3.6), la sua trasparenza avrà un andamento caratterizzato da forti fluttuazioni e in alcuni casi potrà quasi annullarsi, anche dopo poche acquisizioni.

In alcuni casi invece la trasparenza delle superfici di vetro migliora con il tempo e, trascorso

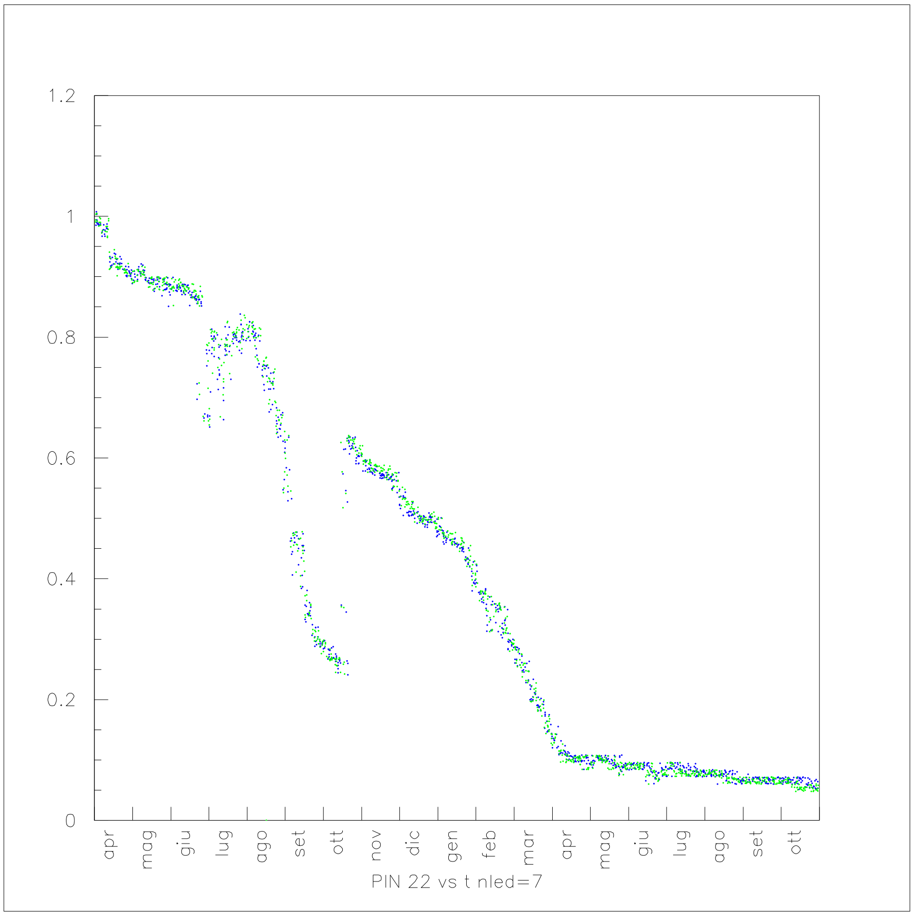

Figura 3.6: *Andamento della trasparenza del pin 22 in funzione del tempo, se illuminato dalla sfera B: in blu la trasparenza se la sorgente è costituita da un LED e in verde se la sorgente è costuita da 2 LED. Si nota che, dopo neanche un anno dall'inizio delle misure, la trasparenza del fotodiodo risulta dimezzata.*

un certo periodo, la trasparenza del modulo ottico è maggiore di quando le misure sono iniziate. Avendo posto $Trasp(\theta, t = 0) = 1$, in questi casi $Trasp(\theta, t = 0) > 1$: questo fenomeno è in larga parte dovuto all'effetto "pulente" delle correnti marine come nel caso del PIN 11 (figura 3.7) che manifesta, a partire dal mese di agosto, un sensibile aumento di trasparenza.

Le figure 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 riportano, in funzione del tempo, l'andamento della trasparenza

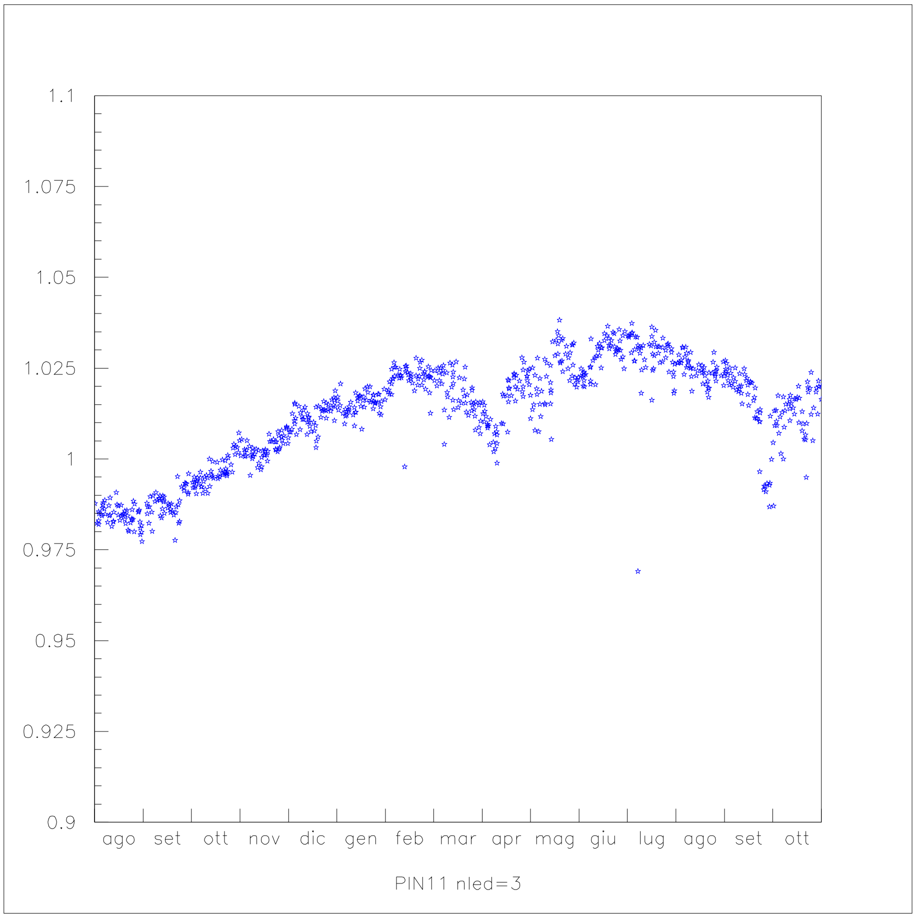

Figura 3.7: *Trasparenza del PIN 11 in funzione del tempo, quando è illuminato con un solo LED posto a $\theta = 45°$ sulla sfera C. Si vede come, a partire dal mese di agosto, la trasparenza inizi a crescere fino a superare il valore che aveva nella prima acquisizione.*

solo per i PIN che hanno un andamento regolare, senza oscuramenti totali: da queste si nota che la visibilità della superficie di vetro diminuisce in funzione del tempo e che l'entità della diminuzione è in generale minore per i PIN della sfera A che stanno per la maggior parte sotto l'"equatore" della sfera, mentre è più marcata per i PIN della sfera C che sono più vicini al "Polo Nord".

È possibile ridurre tutti i casi trattati a due andamenti generali:

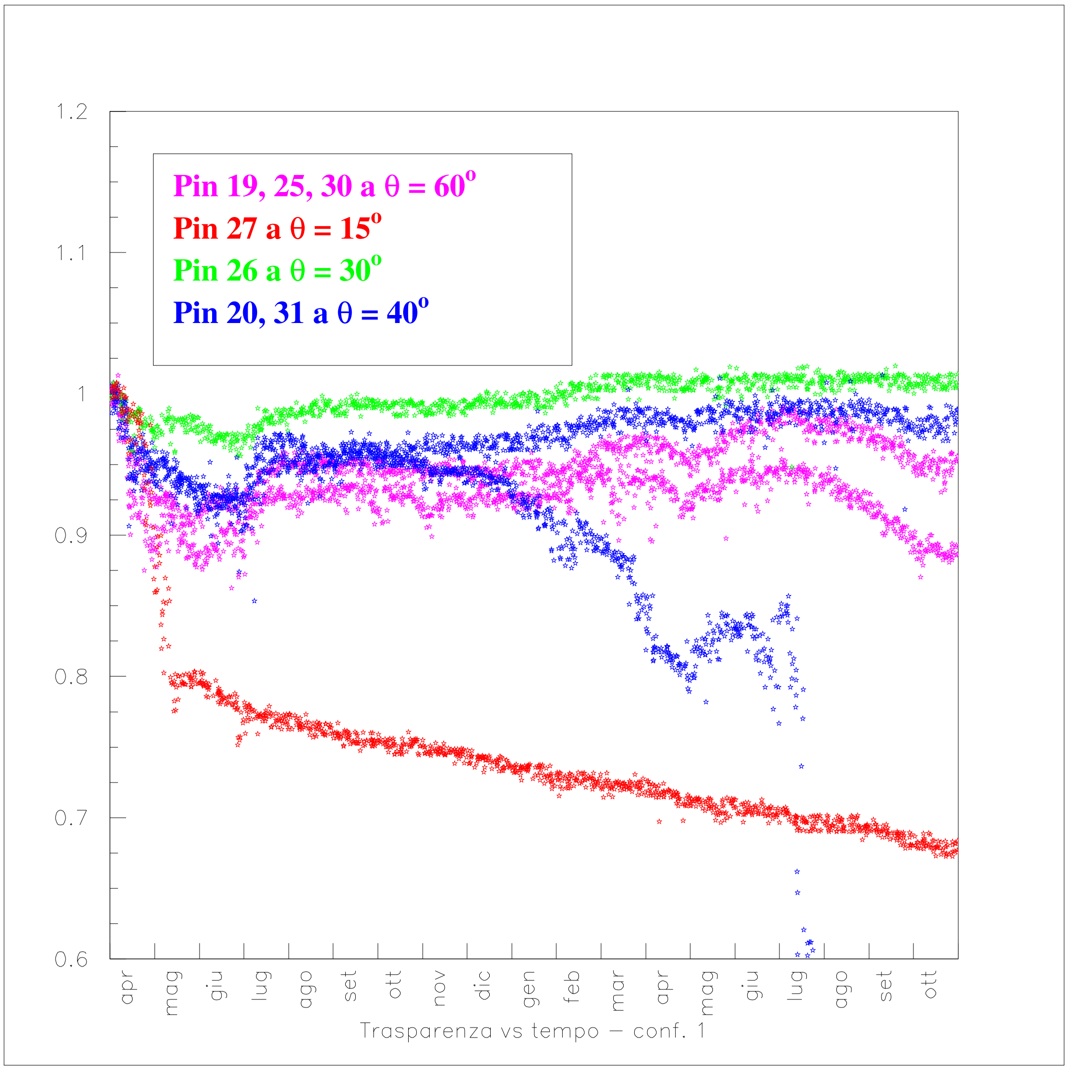

Figura 3.8: *Trasparenza dei PIN della sfera C, nella configurazione di acquisizione 1,in funzione del tempo.*

- **Andamento decrescente regolare**: la lenta e progressiva diminuzione della visibilità è caratterizzata da un andamento complessivo spesso lineare, a cui si sovrappongono delle fluttuazioni di natura casuale, molto rapide.

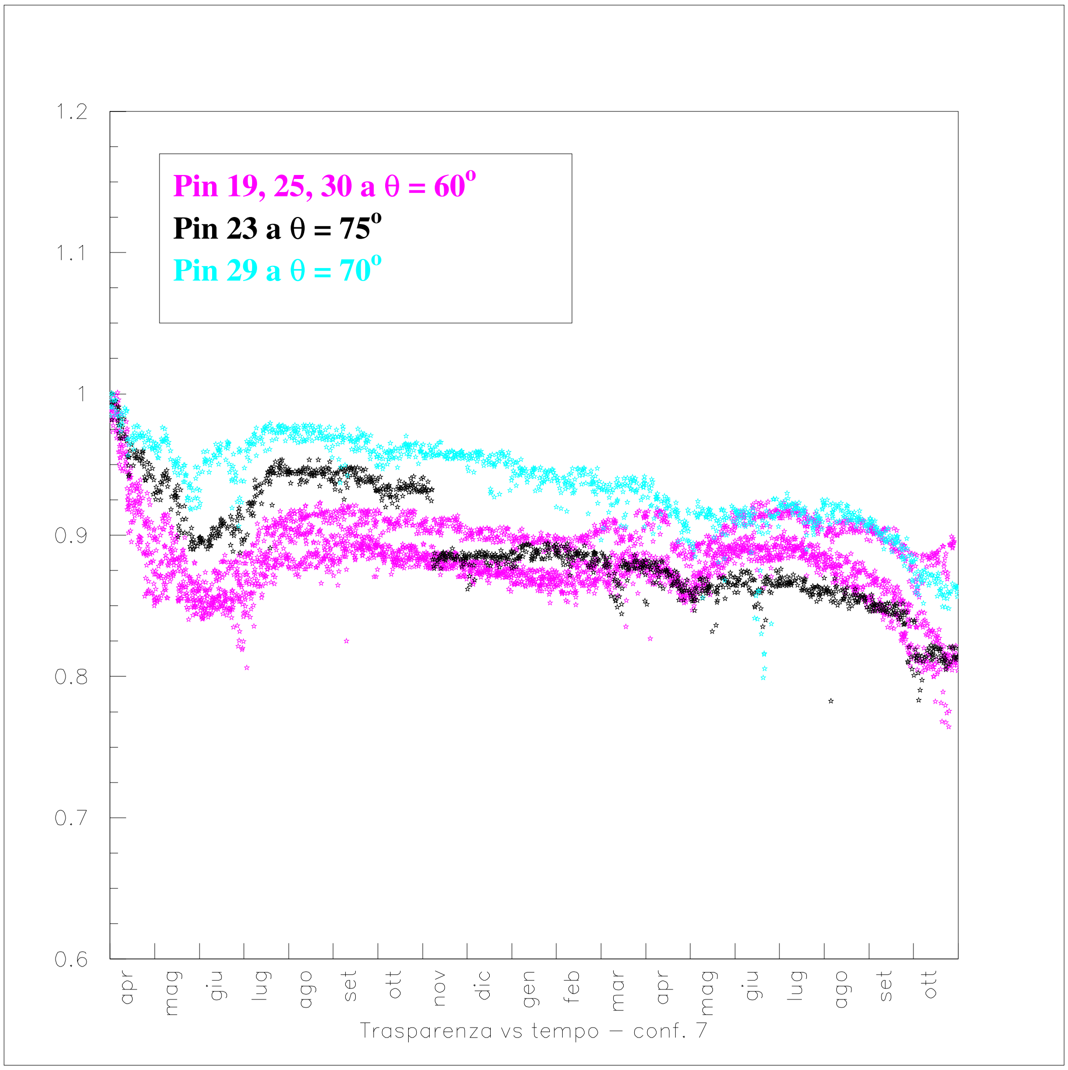

Figura 3.9: *Trasparenza dei PIN della sfera C, nella configurazione di acquisizione 7, in funzione del tempo.*

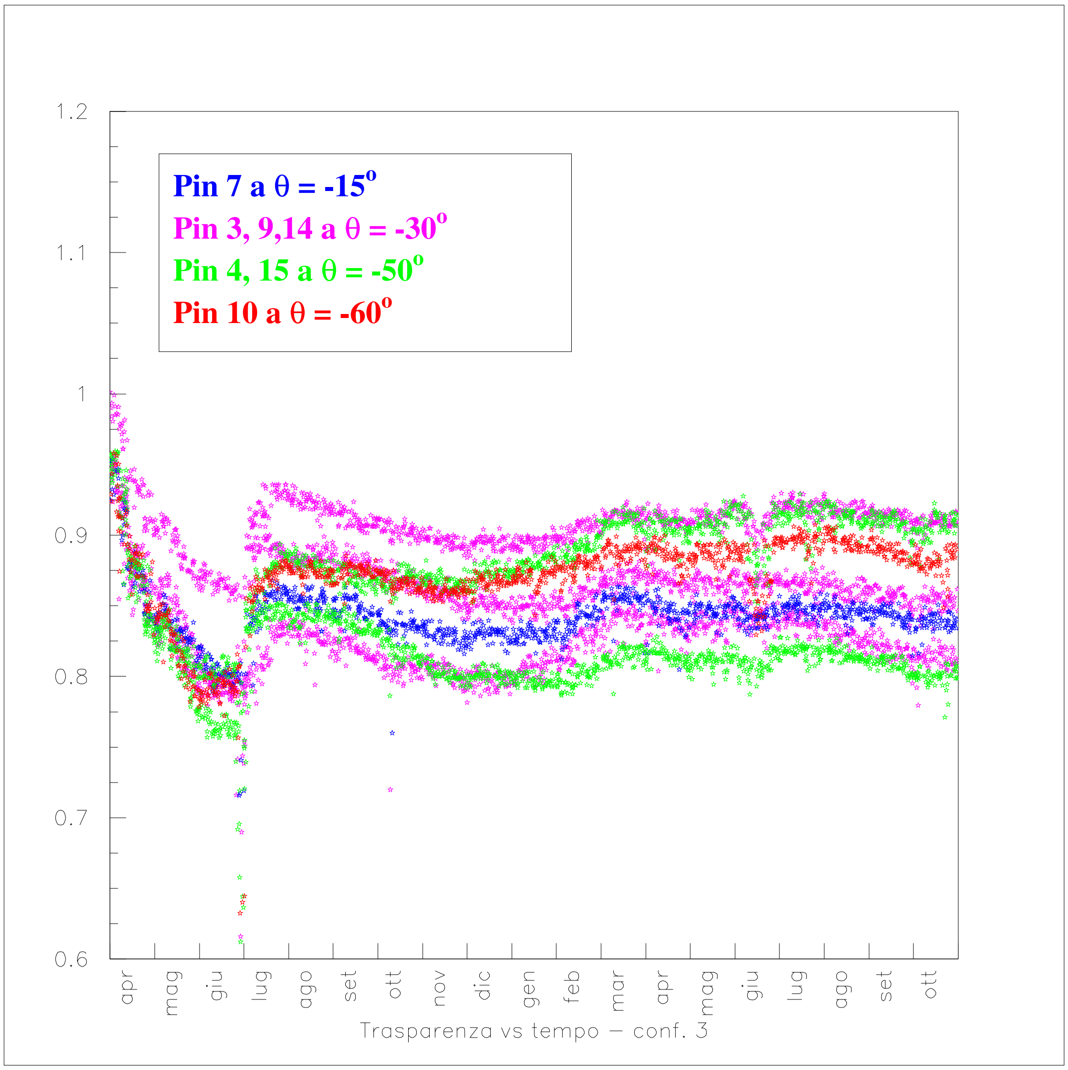

Figura 3.10: *Trasparenza dei PIN della sfera A, nella configurazione 3, in funzione del tempo.*

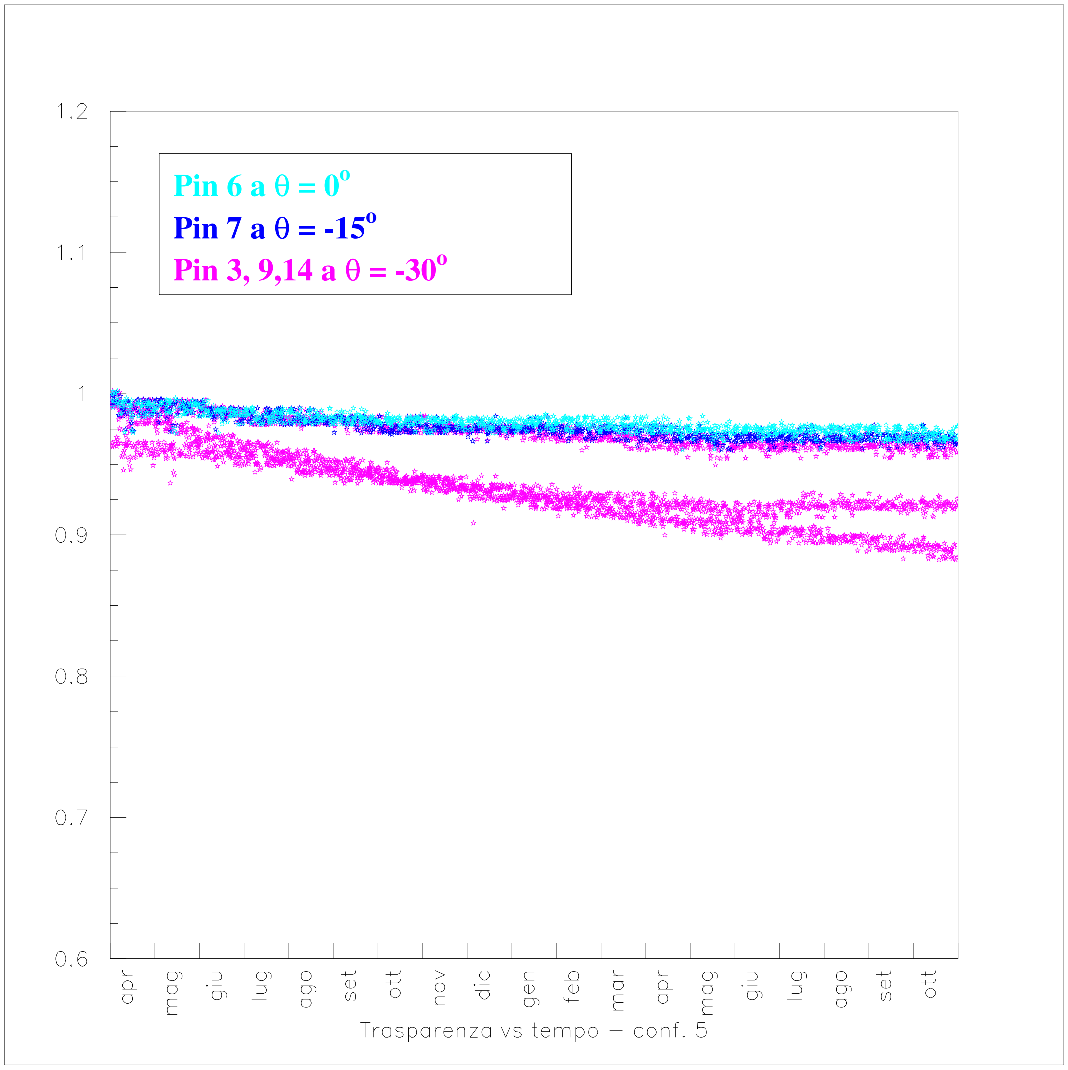

Figura 3.11: *Trasparenza dei PIN della sfera A, nella configurazione di acquisizione 5, in funzione del tempo.*

- **Andamento distruttivo**: è caratterizzato da una brusca diminuzione, con cui la visibilità arriva presto a zero. In alcuni casi si ha prima un grosso aumento di visibilità a cui segue una brusca diminuzione, fino al totale oscuramento. Questo andamento è tipico dei PIN che si trovano in prossimità del "Polo Nord" del modulo ottico, che vengono oscurati quasi subito dai sedimenti (figura 3.6).

Dallo studio di questi due andamenti si può dire che l'effetto di biofouling ha, come previsto, due contributi: quello lento e continuo dovuto alla formazione della pellicola biologica sulla superficie delle sfere di vetro e quello casuale dovuto alla deposizione di sedimenti che è la causa dei brevi e frequenti picchi nell'andamento temporale.
Guardando gli andamenti nelle diverse configurazioni si vede che la superficie di vetro è in generale più trasparente per i PIN che sono distanti dal "Polo Nord", cosa che verrà discussa più in dettaglio nei paragrafi successivi.

3.4 Trasparenza dei moduli ottici e condizioni ambientali sottomarine

È sicuramente interessante mettere in relazione la variazione di trasparenza con le condizioni dell'ambiente esterno, in particolare con la velocità della corrente sottomarina.
L'apparato sperimentale è dotato di alcuni strumenti (una bussola che misura l'orientamento della struttura rispetto al Nord magnetico ed un inclinometro che misura due angoli di inclinazione, "pitch" e "roll", rispetto all'orizzontale) che servono a misurare gli spostamenti dei moduli ottici a seguito dell'azione delle correnti marine. Abbiamo inoltre a disposizione un campione di dati raccolti con un correntometro posto a 2 miglia nautiche di distanza dall'apparato, ad una profondità di circa 3000 metri.
La velocità della massa d'acqua sottomarina nel sito ha un valore medio di circa 3 cm/s, con

picchi che non superano mai i 12 cm/s, come si vede dalla figura 3.12.

In figura 3.13 si vede invece l'andamento temporale dell'intensità delle correnti, insieme a

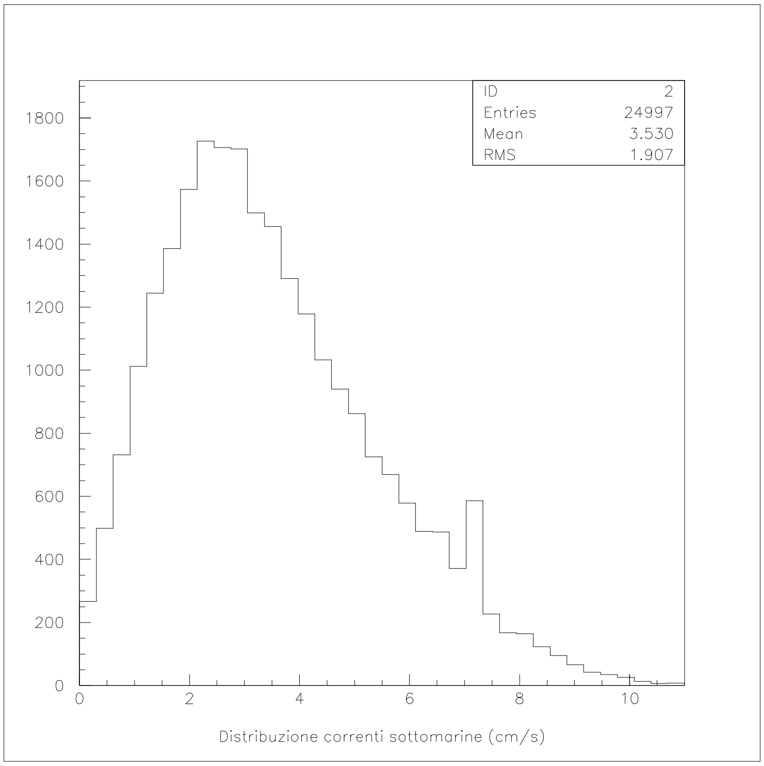

Figura 3.12: *Distribuzione del modulo della velocità della corrente sottomarina, espressa in cm/s.*

quello misurato dalla bussola e degli angoli pitch e roll.

La figura 3.13 permette di identificare nell'andamento temporale delle correnti almeno tre periodi: una prima parte delle acquisizioni, (da aprile agli inizi di agosto, della durata di circa tre mesi) è caratterizzata da una rapida variazione della corrente e sensibili variazioni degli angoli che caratterizzano la posizione dell'apparato (verrà indicato nel seguito come *Primo Periodo di Instabilità*); segue un periodo in cui sia la corrente, che gli angoli di inclinazione sono stabili, da agosto a gennaio; il resto dell'acquisizione è di nuovo dominato da grandi variazioni (sarà indicato come *Secondo Periodo di Instabilità*).

Confrontando le figure 3.8, 3.10, 3.11 e 3.9 con la figura 3.13, notiamo nei periodi in cui le correnti sono fortemente variabili in intensità e direzione una maggiore variabilità della trasparenza: fenomeni casuali quali il deposito di particolato e/o la sua rimozione possono indurre variazioni importanti sullo spessore delle superfici di vetro.

Nostro interesse è ora mettere in luce l'effetto del biofouling.

Avendo a disposizione un periodo di relativa stabilità delle correnti possiamo verificare se esiste una relazione tra la variazione di trasparenza e l'angolo di zenith sul modulo ottico.

Dopo tale studio dovremo comunque caratterizzare i cambiamenti che si verificano per la trasparenza delle superfici di vetro quando le correnti diventano più intense.

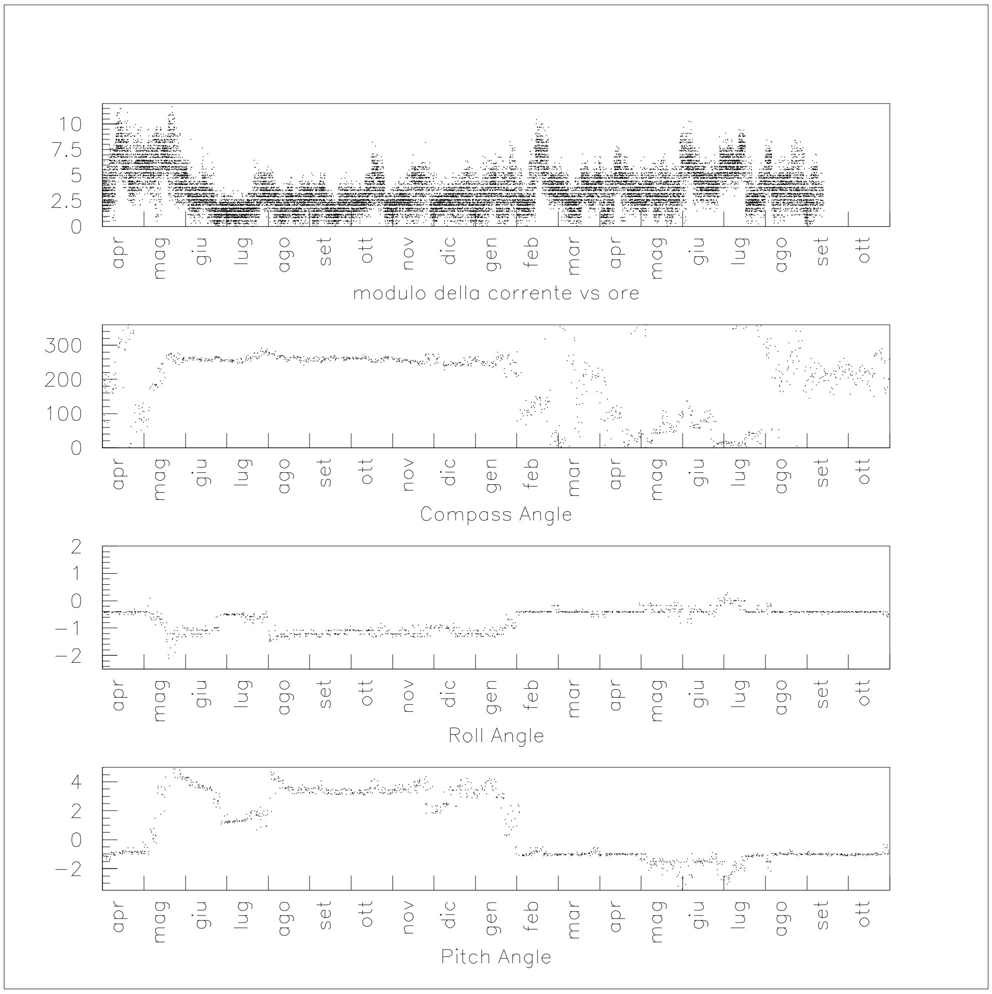

Figura 3.13: *Dall'alto:andamento del modulo della corrente sottomarinain funzione del tempo ; Andamento dell'angolo di compass in funzione del tempo; Angolo di roll; Angolo di pitch.*

3.4.1 Descrizione della procedura di analisi

Nella trattazione che segue assumeremo che la variazione di trasparenza, fissato l'angolo θ che individua la latitudine sulla superficie della sfera, sia uguale per tutte le sfere.
Non tutti i PIN a disposizione forniscono segnali utilizzabili per la nostra analisi. Sulle sfere A e C ci sono 14 PIN, ma solo una parte di essi saranno utilizzati, per due motivi:

- vista la loro posizione rispetto alla sorgente, alcuni PIN danno un segnale paragonabile al rumore: di fatto non "vedono" il segnale luminoso emesso dalla sorgente.
- in alcuni casi, dei PIN illuminati con due sorgenti poste ad angoli diversi non forniscono informazioni coerenti.

Il primo problema è già stato introdotto mostrando l'andamento del segnale raccolto dal PIN 28 in figura 3.5 : alcuni fotodiodi si trovano in una posizione svantaggiata rispetto alla sorgente e dunque i loro valori non sono attendibili ai fini della nostra analisi.
La seconda anomalia si ha per $-50° \leq \theta < -30°$: nelle configurazioni 5-6 e 3-4 (definite a pagina 64) gli stessi PIN, illuminati da due sorgenti diverse, mostrano differenti valori di oscuramento, e ciò risulta incoerente in quanto la variazione di trasparenza riferita ad una certo angolo dovrebbe essere indipendente dalla sorgente.
Per $\theta = -75°$ e $\theta = -70°$, in corrispondenza di due PIN che si trovano sulla sfera A, si riscontra inoltre un forte aumento della trasparenza in condizioni di stabilità (figura 3.7), che non può essere assunto come un comportamento regolare, ma che va attribuito ad un effetto locale di pulitura. In questo modo non possiamo considerare corrette neanche le informazioni che si ottengono illuminando la sfera C con una sorgente posta a $-45°$ sulla sfera A (configurazioni 1 e 2) in quanto a quella latitudine ci potrebbero ancora essere degli effetti di pulitura tali da falsare i risultati.
Per tali motivi siamo costretti a ridurre il numero di PIN da usare per lo studio della variazione della trasparenza: i PIN utilizzati nell'analisi sono mostrati in tabella 3.3, con le relative posizioni sulle sfere.

Il secondo passo della presente analisi consiste nella ricerca di una relazione tra la variazione

PIN considerati nell'analisi	θ
3, 9, 14 (sfera A)	$-30°$
7 (sfera A)	$-15°$
6 (sfera A)	$0°$
19, 25, 30 (sfera C)	$60°$
29 (sfera C)	$70°$
23 (sfera C)	$75°$

Tabella 3.3: *PIN considerati nell'analisi della variazione della trasparenza, su un totale di 28.*

della trasparenza e l'angolo di zenith, in modo più quantitativo di quanto già brevemente discusso in precedenza.

La variazione della trasparenza per unità di intervallo di tempo (l'intevallo di tempo tra due misure consecutive è pari a dodici ore) è stata calcolata con la formula:

$$\frac{\Delta Trasp}{\Delta t} = \frac{1}{\frac{Pin(\theta,t=0)}{Ref(\theta,t=0)}} \frac{Trasp(t_i + t_{N+i}) - Trasp(t_i)}{N} \tag{3.2}$$

dove N = 50.

Abbiamo scelto di calcolare la variazione di trasparenza mediando su N misure consecutive, viste le grandi fluttuazioni che caratterizzano i dati. Selezionando una sorgente e un PIN a fissati valori di θ, per calcolare la variazione di trasparenza delle superfici delle sfere nelle regioni angolari così definite si procede nel modo seguente:

1. Per ogni configurazione di misura (LED e PIN fissati) si calcola la variazione di trasparenza, secondo la 3.2. Si ottiene così una distribuzione di valori di $\frac{\Delta Trasp(MISURATA)}{\Delta t}$ che dipendono sia dall'oscuramento della sfera su cui è posta la sorgente che dalla superficie a cui è affacciato il PIN. Nella figura3.14 riportiamo la distribuzione della $\frac{\Delta Trasp(MISURATA)}{\Delta t}$, riferita al periodo di stabilità delle correnti, di cui si calcolano il valore medio e lo scarto

quadratico medio. Viene riportato inoltre l'andamento temporale di tale grandezza, come esempio per mostrare la procedura seguita.

2. Si calcola il valore medio della distribuzione di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ associandogli l'errore a partire dallo scarto quadratico medio della distribuzione stessa, nel modo seguente:

$$\xi = RMS/\sqrt{N_{eventi}} \tag{3.3}$$

3. Se per un dato angolo θ sono disponibili dati relativi a diversi PIN, con diverse longitudini sulla sfera, allora i valori medi riferiti alle distribuzioni di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ per questi PIN vengono mediati tra loro, pesandoli con i relativi errori.

4. Ognuna delle operazioni descritte viene ripetuta per le due diverse intensità luminose emesse dalla sorgente (un LED o due LED), si ottengono così valori medi di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ per due diverse condizioni di illuminazione dei fotodiodi.

5. Si mediano tra loro i due valori ottenuti con le due diverse illuminazioni ottenendo il valore finale della variazione di trasparenza per quell'intervallo.

6. Si esprimono le variazioni calcolate finora in percentuali annuali a partire dalle misure, che sono effettuate ogni dodici ore.

È ovvio che le misure di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ ottenute nel modo descritto rappresentano l'effetto combinato della variazione di trasparenza di due superfici di vetro: quella del modulo ottico all'interno del quale si trova il PIN e quella in prossimità del LED. La variazione di trasparenza misurata deve cioè essere espressa come:

$$\frac{\Delta Trasp(MISURATA)}{\Delta t} = \frac{\Delta Trasp(SORGENTE)}{\Delta t} + \frac{\Delta Trasp(RIVELATORE)}{\Delta t} \tag{3.4}$$

In genere sorgente e PIN sono disposti sulle sfere a valori diversi di θ, ciò rende l'analisi dei dati particolarmente complessa. Fortunatamente esiste almeno una condizione sperimentale in cui sia il LED che il PIN sono disposti allo stesso angolo ($\theta \simeq 0°$).

Tale set di dati permette di caratterizzare $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ per un valore definito di θ. Da tale primo risultato, come vedremo, potremo avviare l'analisi completa di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t} \equiv \frac{\Delta Trasp}{\Delta t}(\theta)$.

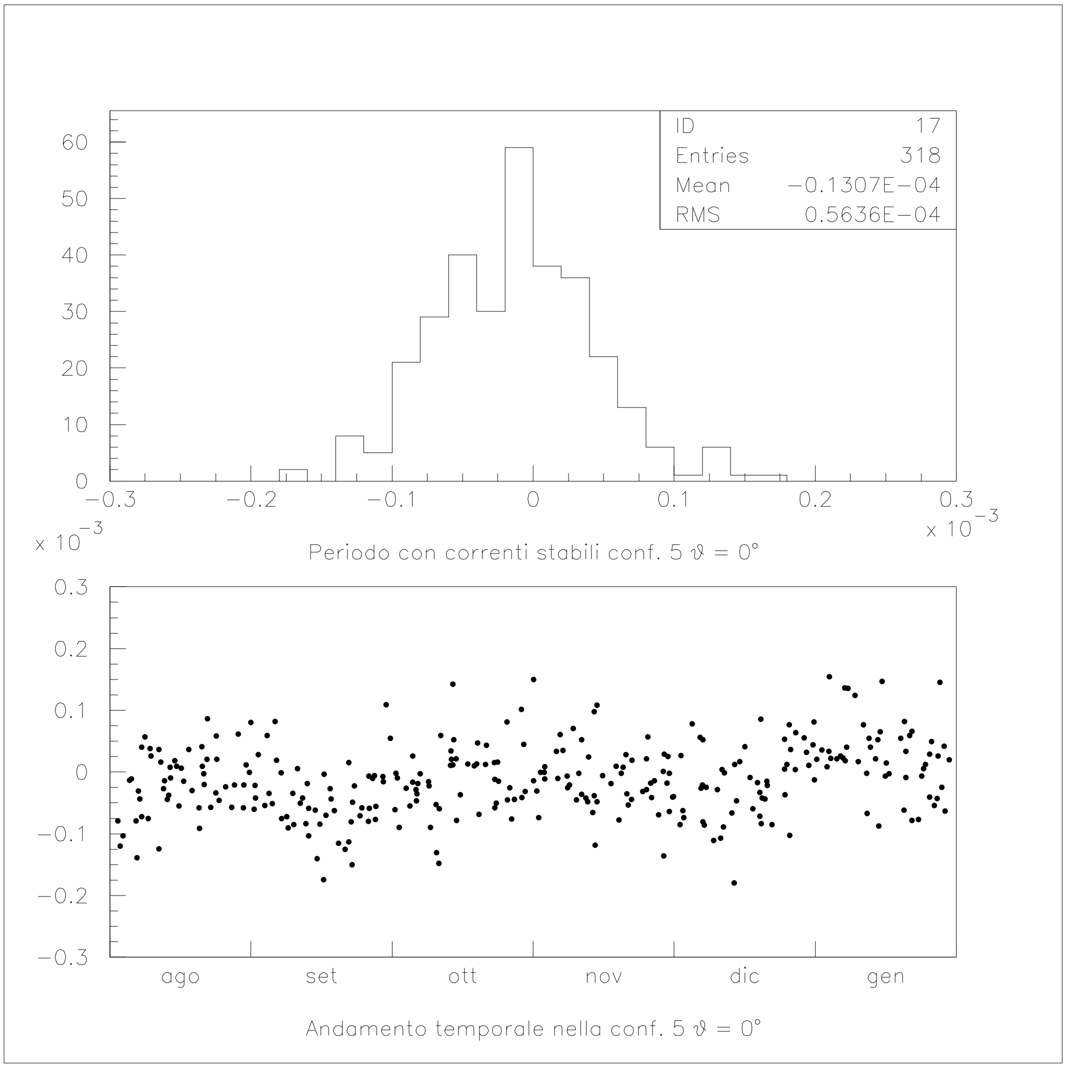

Figura 3.14: *Dall'alto: distribuzione dei valori della grandezza* $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ *calcolata per il PIN 6, posto sulla sfera A ad una latitudine* $\theta = 0°$*, nella configurazione 5;In basso: andamento temporale riferito alla ditribuzione rappresentata sopra.*

Per ogni intervallo di angolo di zenith θ calcoliamo dunque un valore di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ a cui associamo un errore statistico stimato con l'errore sulla media, e un errore sistematico che calcoliamo confrontando i risultati ottenuti, per lo stesso valore di θ, illuminando i fotodiodi con uno o due LED. Di ciò si parlerà più avanti nel dettaglio.

$$\Sigma = \frac{\mid \frac{\Delta Trasp(1LED)}{\Delta t} - \frac{\Delta Trasp(2LED)}{\Delta t} \mid}{2} \tag{3.5}$$