Struttura del rivelatore

Premessa

Il rivelatore proposto consisterà di circa 4096 moduli ottici montati su 64 stringhe e/o torri distribuite su un'area di circa 2 km^2.

Le stringhe e/o torri verranno disposte secondo un reticolo regolare con passo di circa 200 m ed ognuna porterà 64 rivelatori, secondo le modalità appresso indicate.

Varie possibili configurazioni del rivelatore sono state prese in esame al fine di ottimizzare il numero di rivelatori ed il sistema di supporto, minimizzando i costi senza sacrificare in modo apprezzabile le caratteristiche del rivelatore.

Una possibile configurazione dell'apparato è realizzata mediante la struttura a torri quadrate. Ciascuna di queste torri ha 8 piani costituiti da telai quadrati di lato 20 m, che supportano coppie di sensori ottici (uno rivolto verso l'alto e l'altro verso il basso) nei quattro angoli. Questi telai sono mantenuti in tensione mediante quattro cavi di sospensione ai quattro angoli della struttura, ciascuno dei quali è mantenuto in tensione tramite una zavorra alla base della torre e ad un opportuno galleggiante posto al suo vertice. La separazione tra piani successivi è dell'ordine di 40 m. Considerando che il primo dei telai è posto ad una altezza di circa 150 m dal fondo, risulta che ciascuna torre sarà alta circa 450 m.

Una seconda configurazione dell'apparato è realizzata mediante strutture a stringa. Ogni stringa prevede 16 piani con l'impiego di soli 4 rivelatori per piano, di questi 3 sono rivolti verso il basso ed uno verso l'alto. Ogni piano è costituito da un telaio a tre bracci dell'ordine del metro, mentre i rivelatori sono collocati alle estremità dei bracci ed in alto al centro, così come mostrato in fig VI_1

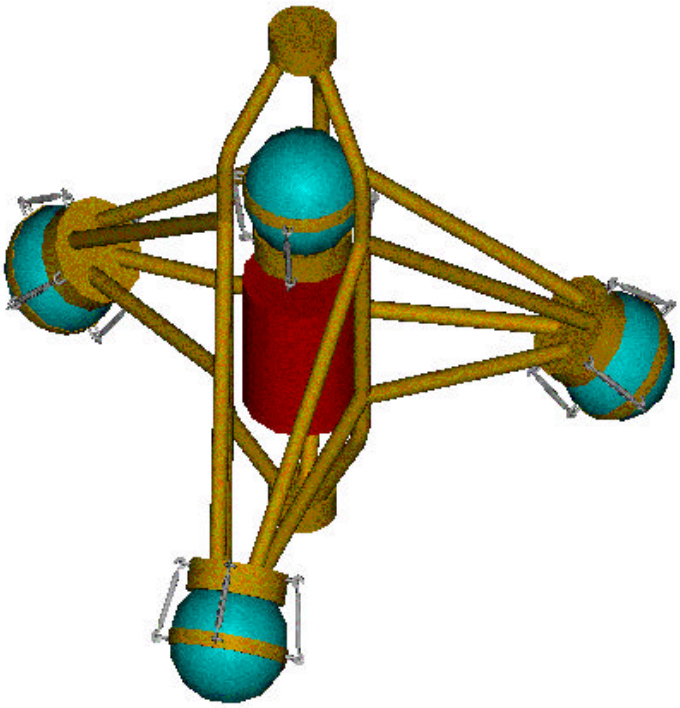

Figura VI_1: Struttura di un piano della stringa

Questi telai sono collegati tra loro da un solo cavo che porta anche i segnali e le alimentazioni. L'intero sistema è mantenuto in tensione tramite una zavorra alla base della torre e un opportuno galleggiante posto al suo vertice. La separazione tra piani successivi è dell'ordine di 40 m. Considerando che il primo dei telai è posto ad una altezza di circa 150 m dal fondo, risulta che ciascuna torre sarà alta circa 750 m.

La struttura a stringa ha i seguenti vantaggi:

- maggior semplicità della meccanica di supporto
- maggior semplicità della posa sottomarina
- costi notevolmente inferiori sia della struttura meccanica che della posa

essa però ha lo svantaggio di una minore sensibilità dell'apparato rivelatore.

È stata infine presa in esame una terza configurazione – che indicheremo come torre-Nemo - che vuole avvicinarsi il più possibile alla semplicità costruttiva e di posa di una struttura a stringa, mantenendo i vantaggi offerti dalla configurazione a torre per ciò che riguarda la sensibilità. Come visibile in fig VI_2 essa è composta da 16 travi a traliccio, una per piano,

lunghe 20 m, con due rivelatori ad ogni estremità, rivolti uno verso il basso ed uno verso l'alto.

Figura VI_2: Struttura della Torre -NEMO

Le travi saranno distanti tra loro di 40 m ed ognuna sul piano orizzontale sarà ruotata di 90° rispetto alla precedente. Le 16 travi sono mantenute in tensione da 4 cavi di sospensione: due per ogni lato della trave, collegati come mostrato in fig… e mantenuto in tensione tramite una zavorra alla base della torre e un opportuno galleggiante posto al suo vertice. La separazione tra piani successivi è dell'ordine di 40 m. Considerando che il primo dei tralicci è posto ad una altezza di circa 150 m dal fondo, risulta che ciascuna torre sarà alta circa 750 m.

La struttura torre-Nemo ha i seguenti vantaggi:

- semplicità della meccanica di supporto
- una semplicità ed un costo della posa sottomarina simile alla struttura a stringa

- un costo della meccanica leggermente superiore rispetto alla stringa
- la base di supporto torre-Nemo e quella della stringa sono identiche, pertanto le due strutture sono intercambiabili
- la sensibilità dell'apparato rivelatore è più alta di quello a stringa

Nel seguito prenderemo in esame solo queste ultime due configurazioni come le candidate migliori dal punto di vista della realizzazione, mentre la prima configurazione è interessante come confronto nelle simulazioni e nell'analisi della sensibilità del rivelatore.

Inoltre, essendo le due strutture simili in molte parti (numero e ripartizione di moduli ottici per piano, basi di supporto, distanze tra i piani, passo del reticolo di posizionamento delle basi) e differendo solo nel tipo di traliccio usato nei piani, parleremo di stringa per indicare sia questa che la torre-Nemo, a meno che non venga espressamente fatta rilevare una differenza tra le due configurazioni.

L'installazione delle stringhe avverrà con l'ausilio di una nave con posizionamento dinamico (Dynamic Positioning, DP) e con robot teleguidati (Remotely Operated Vehicles, ROV) per le operazioni sottomarine. Queste comprendono la guida per il posizionamento delle stringhe entro le tolleranze previste e la connessione della stringa appena installata al resto dell'apparato.

Il modulo ottico

Il modulo ottico (OM) è la parte fondamentale dell'apparato di misura: è questo dispositivo che rivela i fotoni Cherenkov prodotti in acqua dalle tracce dei leptoni carichi.

Diversamente dagli esperimenti di superficie, i moduli ottici per il km^3 devono essere alloggiati in opportuni contenitori resistenti ad alte pressioni (sfere BENTHOS) collegati tra loro ed a terra da un sistema di cavi e connettori elettro-ottici marinizzati.

Ogni singolo modulo ottico sarà composto da:

- un fotomoltiplicatore (PMT) di larga area: diametro 8" o maggiore;
- uno schermo di mu-metal per PMT;
- moduli di elettronica veloce per la lettura e digitizzazione dei segnali;
- moduli di elettronica lenta (slow control) per il controllo di parametri essenziali del modulo stesso (tensioni di alimentazione del PMT, delle schede,…);
- convertitori DC-DC per la trasformazione della potenza elettrica per l'alimentazione delle schede e del PMT.

Una vista schematica di un modulo ottico per il telescopio sottomarino km^3 è mostrato in figura N.1.

Nella prossima sezione descriviamo brevemente la struttura meccanica e le proprietà ottiche dell'OM; nella sezione successiva discutiamo le proprietà dei sensori di luce utilizzabili per l'esperimento.

Alloggiamento

Come in simili esperimenti sottomarini il PMT e l'elettronica verranno ospitati all'interno di una sfera in vetro borosiclicato dal diametro esterno di 43 cm, e dallo spessore di 15 mm. La sfera, separata in due semisfere, è garantita per resistere ad una pressione di 700 bar.

All'interno di una semisfera viene posizionato il PMT, un gel a base di silicone garantisce l'accoppiamento meccanico ed ottico del fotocatodo al vetro. Il gel è costituito da una mistura liquida nella quale viene immerso il fotocatodo; la sua composizione è tale che, a temperatura e pressione ambiente, essa vulcanizza in poche ore facendo perfettamente aderire il fotocatodo alla sfera.

La parte interna della seconda semisfera, che ospita l'elettronica, è rivestita da una guaina nera. In questa configurazione il PMT può rivelare la luce proveniente solo da metà angolo solido, nella direzione in cui è stato rivolto il fotocatodo. Viene così mantenuta, almeno in parte, l'informazione sulla direzione del fotone incidente.

Una volta che il PMT e l'elettronica di read-out sono stati posizionati all'interno, il modulo ottico viene chiuso in atmosfera di azoto ad una pressione di circa 0.1 atm. La tenuta meccanica dell'OM è assicurata dal fatto che la pressione interna del modulo è inferiore rispetto a quella esterna (1 atm in aria, 350 atm nel sito a 3500m di profondità). La regione di accoppiamento delle due semisfere presenta, inoltre, una particolare lappatura che permette la perfetta chiusura e la tenuta della sfera anche in aria. Ulteriori accorgimenti per garantire il vuoto statico consistono nell'applicare tra le parti in contatto un sottile velo di grasso da vuoto otticamente trasparente. La chiusura del modulo viene completata rivestendo la zona di contatto esterna con speciale nastro adesivo protetto da una guaina di neoprene.

La collaborazione ha progettato e realizzato una opportuna camera da vuoto che permette l'assemblaggio dei moduli ottici con una procedura semi-automatizzata (figura N.2).

Il borosilicato della Benthos-sfera pone un forte filtro ottico a lunghezze d'onda minori di 340 nm (assorbimento ~25%) che, comunque, non vengono trasmesse in maniera efficiente dall'acqua (L_{abs} ~ 1m) e dunque non sono di particolare interesse per il nostro esperimento. Il gel di silicone, che ricopre completamente il fotocatodo, ha una lunghezza di assorbimento che, nel visibile cresce quasi linearmente in funzione della lunghezza d'onda. Per la luce blu (400nm) L_{abs} vale circa 60 cm.

Nonostante l'indice di rifrazione del gel di silicone (n = 1.40) non permetta un accoppiamento assoluto con il vetro della sfera (n = 1.48), esso è comunque maggiore di quello dell'acqua (n~1.35 alla profondità di 3000m) e la perdita di luce è, dunque, piccola. E' stato misurato che l'accoppiamento tra il vetro della sfera ed il gel è pressoché trasparente alla luce blu (attenuazione <2%).

Schermaggio magnetico

E' ben noto che il campo magnetico della Terra peggiora l'efficienza di raccolta dei fotoelettroni nei PMT. Infatti il campo B_{Terra} devia in maniera significativa le traiettorie dei fotoelettroni tra il fotocatodo ed il primo dinodo, in funzione della loro posizione relativa al Nord magnetico terrestre. Tale effetto è notevolmente amplificato per i fotomoltiplicatori di grande area, quali quelli che la collaborazione intende utilizzare.

Lo schermaggio del PMT dalle linee del campo magnetico viene effettuato rivestendo il fototubo con una gabbia di mu-metal, materiale con alta permittività magnetica. La gabbia consiste di una rete (filo di mu-metal, diametro 0.1mm), sagomata attorno al PMT, le cui maglie sono opportunamente distanziate per ottimizzare il rapporto tra la qualità dello schermaggio magnetico e la perdita di fotoni dovuta alla copertura del fotocatodo.

Caratteristiche dei PMT

E' già stato messo in evidenza che il costo complessivo del progetto limita il numero di moduli ottici utilizzabili a circa 10.000, cosicché la parte strumentata dei telescopi Cherenkov sottomarini è una frazione trascurabile del volume di interazione dell'intero rivelatore (circa $1/10^8$). Dunque la efficienza di raccolta ed amplificazione del segnale luminoso è un parametro di qualità molto importante per effettuare la scelta dei sensori ottici. La maggior parte delle collaborazioni impegnate nello stesso settore (DUMAND, AMANDA, NESTOR, ANTARES) ha individuato nei fotomoltiplicatori di larga area i sensori ottici più affidabili. L'esperimento NT-200 Baikal è l'unico ad utilizzare fototubi ibridi Philips XP-2600 e Quasar-370 aventi, comunque, aree di raccolta confrontabili.

I PMT scelti per questi esperimenti hanno un fotocatodo emisferico dalla caratteristica forma "a fungo" che permette di ottimizzare le caratteristiche temporali dei segnali generati da fotoni incidenti in parti differenti del fotocatodo. I differenti PMT utilizzati hanno un diametro variabile da 8" (AMANDA) a 14" (NESTOR). Il rivestimento del fotocatodo è di bialkali (tipicamente SbKCs) che ha un'alta efficienza quantica ed una bassa emissione termoionica.

La collaborazione NEMO è attualmente impegnata nel caratterizzare alcuni modelli di PMT EMI (diametro 8") e Hamamatsu (diametro 10") presenti sul mercato ed un nuovo prototipo di fototubo da 13", realizzato dalla Hamamatsu su nostre specifiche. Il programma dei lavori prevede la caratterizzazione di fototubi di prossima generazione, per i quali i tempi di produzione siano compatibili con i tempi di realizzazione del km^3.

Il test del fototubo è effettuato ponendo lo stesso in una "camera oscura", ed illuminandolo con una sorgente puntiforme di luce blu. Poiché la banda visibile blu-verde (420-480 nm) è l'unica che si trasmette per lunghe distanze in acqua (L_{abs}>10m) le misure vengono condotte tutte con sorgenti piccate in questa regione spettrale. La collaborazione ha realizzato un'ampia camera oscura (3.4 m^3) dotata di un sistema di acquisizione dati per l'esecuzione delle misure di caratterizzazione dei fototubi (figura N.3). Nella camera è posizionato un sistema di scansione per l'analisi puntuale della superficie del PMT. Una fibra ottica, connessa ad una

sorgente laser (480 nm, 50 psec FWHM), è posta sul sistema di movimentazione controllato da un PC. Lo stesso PC controlla l'acquisizione dei dati e il timing di emissione della sorgente. Misure bolometriche della radiazione incidente permettono la determinazione assoluta della efficienza quantica del fotocatodo.

Il confronto tra i differenti modelli di fotomoltiplicatori viene eseguito sulla base dei seguenti parametri: l'area efficace, la risoluzione in energia e la risoluzione temporale.

Area efficace del PMT

L'area efficace è definita come il prodotto tra l'area del fotocatodo e l'efficienza di raccolta della luce. In generale l'efficienza del PMT è una funzione del punto di incidenza.della luce sul fotocatodo e dell'angolo di incidenza della luce. Si è potuto verificare che la distribuzione del bialkali è pressoché omogenea su tutto il fotocatodo, mentre la efficienza di raccolta decresce muovendosi dal polo verso la regione equatoriale del fototubo. E' stato inoltre dimostrato che la efficienza di raccolta aumenta sensibilmente per la luce incidente ad un angolo prossimo a 90° poiché il fotone può essere convertito da due parti opposte del fotocatodo.

Studio delll'ampiezza del segnale del PMT

In condizioni di operatività il PMT presenta una differenza di potenziale tra fotocatodo ed anodo, dell'ordine del kV. I fotoelettroni prodotti sul fotocatodo vengono accelerati e moltiplicati da un sistema di dinodi che amplificano il segnale primario e producono in uscita un segnale formato ed analizzabile. In prima approssimazione maggiore è la differenza di potenziale tra anodo e catodo migliore è l'amplificazione del segnale. Poiché, però, dai dinodi vengono amplificati sia i segnali di fotoni sia il rumore elettronico (corrente oscura), bisogna identificare un PMT poco rumoroso e scegliere la opportuna tensione di alimentazione. Il maggior problema causato da una "rate" alta di corrente oscura è, in fase di analisi, la identificazione di false coincidenze temporali tra PMT che simulano il passaggio di un muone.

Il rumore anodico, che ha un andamento pressoché esponenziale, è generato da diverse cause: i segnali di ampiezza minore di quelli prodotti da un singolo fotoelettrone (PE) sono causati dalla moltiplicazione di elettroni prodotti all'interno dei dinodi; segnali di ampiezza di maggiore o uguale ad 1 PE sono dovuti prevalentemente da elettroni termoionici emessi dal fotocatodo. La tensione di alimentazione viene fissata in modo che vi sia circa un fattore 10 tra l'ampiezza dell'impulso medio dovuto ad un singolo PE ed il fondo elettronico. Questo corrisponde ad un guadagno (gain) di almeno $5 \cdot 10^7$. Poiché è previsto un peggioramento delle prestazioni del PMT con il tempo, si richiede che il PMT abbia un gain di 10^8.

La grandezza studiata per la caratterizzazione della risposta in energia del PMT è il rapporto picco/valle misurato dallo spettro di carica osservato per segnali di singolo PE. Si richiede, per la tensione di alimentazione fissata, che il rapporto picco/valle sia maggiore di 2. E' stato verificato per vari modelli di PMT che, in queste condizioni, la larghezza del segnale di singolo PE varia dal 45% al 70% (FWHM). Una buona risoluzione in energia è importante

perché può permette di discriminare segnali prodotti da tracce di muoni (segnali ≥ 1 PE) dal fondo prodotto dal ^{40}K (1 PE) e dalla corrente oscura.

In questa fase è importante anche verificare la linearità della risposta del fototubo. La luce Cherenkov rivelata dai moduli ottici dei telescopi per neutrini può variare in ampiezza da 1 PE fino a migliaia di PE, in funzione dell'energia della particella e della distanza della traccia. E' necessario che il PMT sia capace di coprire un range dinamico quanto più ampio possibile mantenedo le caratteristiche di linearità della risposta.

Studio della risposta temporale del PMT

La risoluzione temporale del fototubo è un fattore di qualità importantissimo perché è proprio sulla risposta temporale del PMT al segnale Cherenkov che si basano gli algoritmi di ricostruzione della traccia.

Il segnale elettrico prodotto da un fototubo è ritardato, rispetto a quello del fotone incidente, dal "transit time" (TT) del foto-elettrone tra il fotocatodo ed il primo dinodo e dal tempo di amplificazione del segnale all'interno dei dinodi. In entrambi questi processi fluttuazioni statistiche e sistematiche contribuiscono a peggiorare la risoluzione temporale del fototubo (Transit Time Spread: TTS).

Le amplificazioni del segnale nei dinodi producono un time jitter del segnale. Il time jitter si riduce all'aumentare dell'ampiezza del segnale. Nei PMT di larga area, comunque, queste fluttuazioni sono trascurabili rispetto a quelle provocate delle imperfezioni dell'ottica elettrica e della geometria del fotocatodo. Ne risulta che il tempo di transito tra fotocatodo e primo dinodo non è uguale per fotoelettroni prodotti in parti differenti del fotocatodo. Il TTS definisce la risoluzione temporale del PMT, che si richiede sia minore rispetto alla indeterminazione di 1.3 nsec, non eliminabile, dovuta alla indeterminazione nella determinazione della posizione del PMT (ricavata per via acustica). La misura del TTS è fatta operando ad un gain di $5 \cdot 10^7$.

Lo studio del PMT prevede anche lo studio delle emissioni dette di "pre-pulse" e "after-pulse" causate, le prime, da fotoelettroni che "saltano" il primo dinodo, le seconde da emissioni successive all'interno dei dinodi. Pre-pulses e after-pulses sopra la soglia di rivelazione possono simulare eventi di muon-bundles.

Primi risultati

Le prime misure mostrano che fototubi da 8" (Hamamtsu R5912,Hamamatsu R5912-02, EMI 9353KB, EMI 9355KB) pur avendo un'area efficace molto minore (vedi tabella N.1), mostrano caratteristiche migliori rispetto ai fototubi con diametro maggiore. In particolare è stata verificata una bassa corrente oscura (< 1KHz @ 1PE) una buona efficienza e omogeneità del fotocatodo, una buona risoluzione di segnali da 1 PE (circa 30%), una buona risoluzione temporale (<3nsec FWHM), bassa dipendenza dal campo magnetico terrestre (dopo la schermatura). Fototubi EMI da 8" verranno usati dalla collaborazione per instrumentare il test site di Catania a 2000m di profondità.

Tutti i PMT del modello selezionato per il km^3, dovranno essere caratterizzati con le misure sopra descritte. Questo permetterà sia la ottimizzazione dei programmi di ricostruzione Montecarlo, sia un costante controllo di qualità sulla fornitura dei fototubi.

R&D di sensori ottici non convenzionali

La collaborazione sta analizzando l'opportunità di sostituire i PMT di larga area con sistemi integrati costituiti da grandi collettori di luce (coni di Winston, lenti di Fresnel) e fotomoltiplicatori di piccole dimensioni (2"). Il sistema permetterebbe di aumentare la superficie e l'angolo solido di raccolta, di migliorate la risoluzione temporale del rivelatore e di ridurre la potenza di alimentazione del modulo ottico. Le simulazioni vengono condotte con un software di Ray Tracing, ed è in fase di studio anche la marinizzazione dei moduli ottici. Il completamento della fase di R&D è prevista nel 2002.

Struttura della torre/stringa

Struttura meccanica della torre-Nemo

Una singola torre, in quanto sottosistema di NEMO, può considerarsi costituita dalle seguenti parti:

- 16 piani costituiti ognuno da un traliccio orizzontale una intelaiatura, alle cui estremità sono vincolati i 4 moduli ottici. I piani sono collegati tra loro con tiranti;
- un sistema di boe, che dà la spinta verticale necessaria ad assicurare l'equilibrio idrostatico della torre assicurando al contempo un certo grado di rigidezza;
- una base da cui parte il cavo elettro-ottico di collegamento con i piani e sulla quale è fissato un contenitore con l'elettronica di comunicazione e le connessioni elettro-ottiche
- un corpo morto per ancorare al fondo la torre stessa.

L'analisi delle forze evidenzia che le torri sono soggette al peso proprio, al peso dei moduli ottici e delle altre strumentazioni, all'azione statica della massa d'acqua in cui sono immerse e all'azione dinamica esercitata dalle correnti marine. Le varie parti della struttura contribuiscono perciò in maniera diversa alla risposta alle forze agenti.

Ogni traliccio, della lunghezza di 20 m circa, potrà essere costituito da elementi tubolari in titanio (fig VI_3) o in materiale composito in fibra di vetro. Esso dovrà garantire la rigidezza necessaria al sostentamento dei moduli ottici e dell'altra strumentazione. Tralicci possono

essere rivestiti di materiale galleggiante al fine di contribuire all'equilibrio idrostatico della struttura.

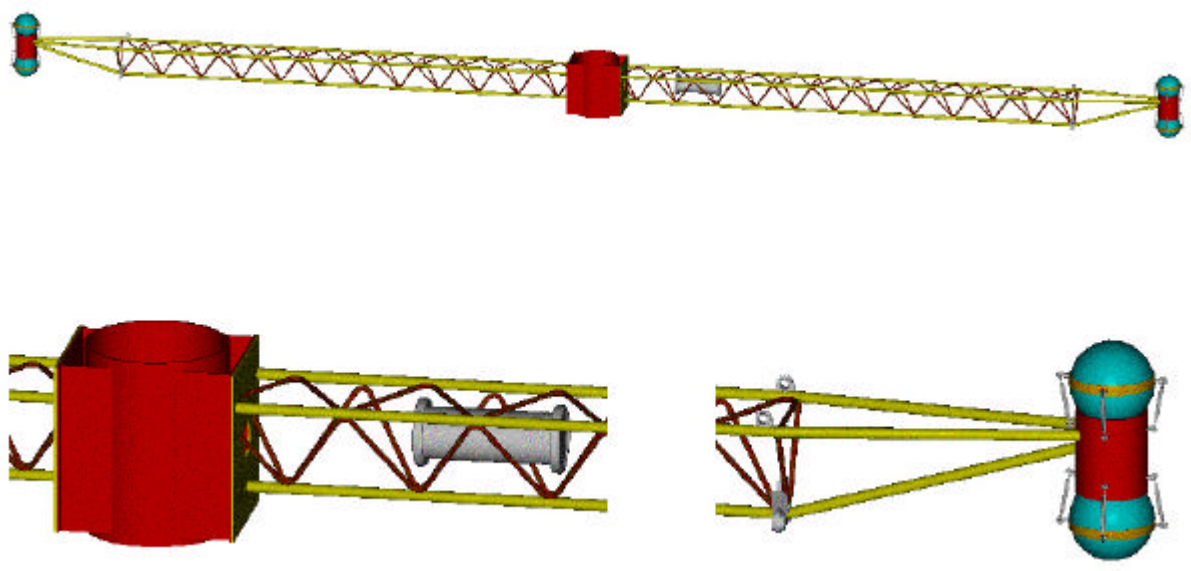

Figura VI_3: Particolare del piano della Torre-Nemo

I tralicci sono collegati tra loro con 4 tiranti in modo da avere una distanza di 40m tra un pino e l'altro ed in modo che ogni piano sia ruotato di 90° rispetto al piano precedente.

Distorsioni rispetto alla configurazione teorica possono avvenire per via di variazioni nella lunghezza dei tiranti: tali variazioni sono dovute in piccola parte alle tolleranze di lavorazione ed in gran parte sono provocate dalle correnti marine presenti nel fondale marino. Le correnti marine provocano inoltre distorsioni dell'asse verticale delle torri. Tali distorsioni sono contrastate dalla trazione del sistema di boe posto in cima alle torri stesse ma è evidente che neanche un aumento indefinito del volume delle boe può impedire che possano insorgere deformazioni lungo l'asse verticale della torre. Inoltre, boe di grande volume saranno soggette esse stesse a sollecitazioni proporzionali alle loro dimensioni. Ne consegue che esiste un valore di volume ottimale delle boe che minimizza gli spostamenti della stringa rispetto all'asse verticale.

Movimenti di rotazione attorno all'asse verticale possono intervenire quando la torre è in opera a causa di dissimmetrie dovute ad inevitabili imprecisioni di costruzione ed installazione nonché alla variabilità delle condizioni dell'ambiente sottomarino (p.e. regime delle correnti). tuttavia la posizione spaziale dei rivelatori, soprattutto quella angolare, può essere ben ricostruita dai sistemi di controllo di posizione, mentre lo scostamento rispetto alla verticale può essere ricostruito per mezzo del sistema di posizionamento acustico.

Struttura meccanica della stringa

Una singola stringa, vedi fig. VI_1, può considerarsi costituita dalle seguenti parti:

- 16 piani costituiti ognuno da una intelaiatura dell'ordine di qualche metro, alle cui estremità sono vincolati i 4 moduli ottici. I piani sono collegati tra loro con un cavo ottico - elettromeccanico;
- un sistema di boe, che dà la spinta verticale necessaria ad assicurare l'equilibrio idrostatico della stringa, assicurando al contempo un certo grado di rigidezza;
- una base da cui parte il cavo elettromeccanico di collegamento tra i piani e sulla quale è fissato un contenitore con l'elettronica di comunicazione e le connessioni elettro-ottiche
- un corpo morto per ancorare al fondo la torre stessa.

analogamente al caso delle torri, l'analisi delle forze evidenzia che le torri sono soggette al peso proprio, al peso dei moduli ottici e delle altre strumentazioni, all'azione statica della massa d'acqua in cui sono immerse e all'azione dinamica esercitata dalle correnti marine. Le varie parti della struttura contribuiscono perciò in maniera diversa alla risposta alle forze agenti. I telai della stringa saranno in lega di titanio. Essi sono costituiti da elementi tubolari (fig. VI_4) e dovranno garantire la rigidezza necessaria al sostentamento dei moduli ottici e dell'altra strumentazione.

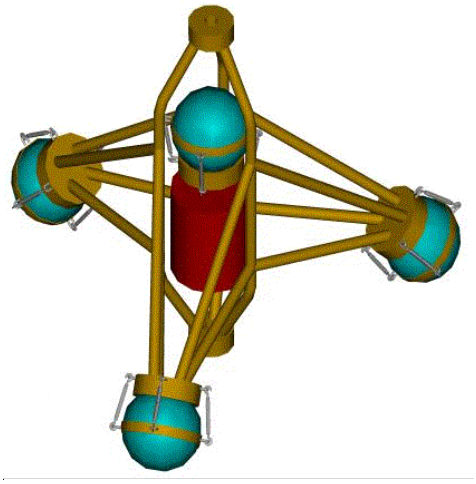

Figura VI_4: Telaio della stringa

I telai sono collegati tra loro con un cavo elettromeccanico in modo da avere una distanza di 40 m tra un piano e l'altro. Questo cavo avrà sia una funzione meccanica sia di distribuzione dell'alimentazione sia di collegamento su fibra ottica.

Variazioni di configurazione rispetto a quella teorica sono dovute in gran parte alle correnti marine presenti nella zona interessata dal rivelatore. Analogamente al caso delle torri esiste un valore di volume ottimale delle boe che minimizza gli spostamenti della stringa rispetto

all'asse verticale. Inoltre i movimenti di rotazione attorno all'asse verticale sono per la stringa molto più accentuati a causa della minore resistenza torsionale offerta dal cavo elettromeccanico. Nel caso della stringa questa rotazione non costituisce un problema, perché la posizione spaziale dei rivelatori, soprattutto quella angolare, può essere ben ricostruita dai sistemi di controllo di posizione, mentre lo scostamento rispetto alla verticale può essere ricostruito per mezzo del sistema di posizionamento acustico.

.

Scelta dei materiali

Per una struttura complessa come quella di NEMO la scelta dei materiali ha estrema importanza. Infatti, la notevolissima profondità dell'ambiente sottomarino comporta condizioni operative decisamente critiche. Inoltre, la struttura deve lavorare lungo l'arco di 20 anni per cui le condizioni di affidabilità devono essere progettate in conseguenza. La gamma dei materiali impiegati è ampia e può essere suddivisa in quattro categorie:

- materiali per la struttura delle torri;
- materiali per le boe;
- materiali utilizzati per l'ancoraggio al fondo;
- materiali utilizzati per cavi elettro-ottici, ombelicali e la trasmissione di energia.

Per quanto attiene ai materiali metallici, si devono scegliere materiali che presentino elevata resistenza alla corrosione ad umido. Tale fenomeno di deperimento è innescato dalla elevata concentrazione di elettroliti (cloruro di sodio e magnesio) e dallo scarso tenore di ossigeno nell'acqua marina a contatto con le strutture metalliche. Infatti, la resistenza alla corrosione è garantita dalla formazione di uno strato d'ossido superficiale che previene ulteriori attacchi al metallo. Questo meccanismo è però rallentato se l'ambiente a contatto con il metallo ha una scarsa concentrazione di ossigeno e, pertanto, viene sopravanzato dall'attacco che i cloruri disciolti nell'acqua portano allo strato protettivo di ossido causandone la dissoluzione.

In base alle considerazioni su esposte, ci si orienterà sulle varie leghe di titanio (grado 2 e grado 5 sono le leghe che garantiscono maggiore affidabilità per la realizzazione delle strutture).

Le boe sono di materiale sintattico o "glass spheres", con densità dell'ordine di 0.6 kg/m^3. Come detto in precedenza, le boe garantiscono il tensionamento della torre.

Il corpo morto è realizzato con una struttura portante in titanio, appesantita con opportuna zavorra in pietra lavica, che rappresenta il miglior compromesso costo-volume. Poiché il fondale marino su cui poggia il basamento non è perfettamente orizzontale è previsto un sistema di ancoraggio della struttura al basamento tale da non produrre distorsioni alle torri. Un possibile sistema prevede l'uso di un cinematismo simile ad un giunto cardanico.

Installazione e posizionamento

Una delle fasi più complesse nella realizzazione del Progetto NEMO è senza dubbio la posa del cavo ombelicale di connessione a terra e l'installazione in mare delle strutture meccaniche (torri e/o stringhe).

Questa sezione sintetizza le operazioni necessarie all'esecuzione delle seguenti fasi per l'installazione del rivelatore, che sono:

- installazione delle junction box (JB);
- connessione delle junction box con le rispettive derivazioni (DER) poste lungo la dorsale del cavo principale mediante cavo elettro-ottico (cavo JB-DER);
- connessione di due successive junction box mediante cavo elettro-ottico (cavo JB-JB);
- installazione del singolo elemento a cavo tensionato detta "stringa" selezionata come elemento base della architettura del telescopio per il progetto NEMO
- connessione delle singole stringhe con le junction box mediante cavo elettro-ottico (cavo secondario).

La collocazione temporale di questa successione di fasi segue la installazione del cavo principale elettro-ottico dalla stazione di controllo e raccolta dati a terra fino al sito sottomarino previsto per l'installazione del rivelatore come descritto nel paragrafo successivo. Nell'ultimo tratto in corrispondenza dell'area dove si dovrà installare il rivelatore sottomarino, il cavo principale è equipaggiato con 8 scatole di derivazione (branching unit) montate ad una distanza costante di 200m l'una dall'altra lungo il cavo principale stesso. Questo tratto finale del cavo principale è chiamato "Dorsale".

Posa del cavo

Il cavo ombelicale è di tipo elettro-ottico ed è un componente altamente critico perché una sua eventuale rottura potrebbe pregiudicare il funzionamento dell'intero sistema. Pertanto si prevede una serie di accorgimenti sia in fase di progetto sia in fase di installazione:

- il dimensionamento è ridondante;
- il cavo è ad armatura multipla ed ha un rivestimento esterno in materiale plastico: le armature conferiscono resistenza meccanica ai conduttori e alle fibre ottiche proteggendole da eventuali azioni esterne quali torsioni o deformazioni catenarie che possono insorgere durante la sua posa, mentre il rivestimento protegge i conduttori e le armature da infiltrazioni d'acqua e/o dall'attacco di agenti chimici;
- le parti del cavo in prossimità della riva e sulla terra ferma sono alloggiate in trincea.

La considerevole lunghezza del cavo ombelicale (circa 100 km) e la notevole differenza di profondità tra installazioni 'on shore' e telescopio sottomarino (circa 3000 m) rendono necessarie accurate rilevazioni batimetriche prima della posa dell'ombelicale stesso. Per le

esigenze della posa, il cavo va suddiviso in sezioni, da 3 a 5 a seconda della scelta della nave che effettuerà l'operazione e delle relative attrezzature. Occorreranno quindi da 2 a 4 junction boxes complete di connettori operabili da ROV.

Mezzi ed attrezzature per l'installazione delle stringhe

La procedura prevista nella varie fasi di installazione richiede almeno i seguenti mezzi navali, attrezzature e componenti:

- Una nave con doppio sistema per il posizionamento dinamico dotata di una area minima sul ponte di lavoro di 15 x 50m . La nave deve essere equipaggiata con un carro ponte con due verricelli posizionati a poppa, una gru per la movimentazione delle gabbie e di un argano, con una capacità di 3500-4000m di cavo, per calare e posizionare le stringhe.
- N° 1 ROV per l'assistenza durante le operazioni sottomarine appartenenti alla classe "Innovator".

Figura VI_5: ROV Innovator

- N° 2 mezzi navali di supporto per il trasporto delle gabbie contenenti le stringhe.
- N° 2 rimorchiatori.
- 1 Modulo con Verricello Idraulico (MVI).

Occorre tenere presente che per la installazione di qualsiasi elemento appartenente alla stringa (struttura del modulo ottico, basamento e boa) oppure alla junction box occorre prevedere un sistema per l'aggancio dei verricelli o dell'argano.

Inoltre, tutti i ganci, gli occhielli e qualsiasi altro sistema di connessione utilizzato nelle operazioni di installazione deve essere progettato per essere operabile da ROV.

Installazione delle junction box

Ciascuna delle 8 junction box previste dovrà essere installata in prossimità della rispettiva scatola di derivazione (branching unit) già presente lungo la dorsale del cavo principale, ad una distanza di circa 40m.

Le junction box saranno collocate in modo tale da disporsi, in relazione alle tolleranze dell'installazione, parallelamente alla dorsale stessa. Quindi, ogni junction box dovrà essere connessa sia alla rispettiva scatola di derivazione che alla junction box adiacente mediante dei cavi elettro ottici dotati di connettori manovrabili tramite ROV, questi cavi sono rispettivamente; cavo JB-DER e cavo JB-JB, rispettivamente.

Le singole junction box, , saranno equipaggiate con:

- 2 sedi per l'innesto dei penetratori dei cavi JB-JB che servono per il collegamento con la Junction Box precedente e quella successiva;
- 8 sedi per l'innesto dei connettori di altrettanti cavi secondari provenienti dalle singole strutture meccaniche (stringhe e/o torri);
- il cavo JB-DER già connesso alla junction box e avvolto in un raccoglitore montato direttamente sulla junction box stessa.

La procedura di installazione delle junction box prevede le seguenti fasi:

- Tutte le junction box sono posizionate in prossimità dell'argano montato nella poppa della nave DP impiegata per tutte le fasi di installazione previste. La prima junction box è connessa sia alla gru che all'argano della nave DP, (Fig.VI_6 – Step 1).
- La gru solleva fuori bordo la junction box e comincia a calarla in acqua mentre il cavo dell'argano è mantenuto in bando. Alcuni metri sottobordo avviene il passaggio di carico dalla gru all'argano. L'intervento del ROV consente di sganciare il cavo della gru che viene recuperato. La junction box continua ad essere calata mediante il cavo dell'argano fino in fondo al mare, (Fig.VI_6 - Step 2).
- La prima junction box è depositata a circa 40m dalla rispettiva scatola di derivazione. Il ROV provvede allo sgancio del cavo dell'argano che viene recuperato a bordo per procedere alla installazione della successiva junction box, (Fig.VI_7 – Step 3).
- Tale sequenza di operazioni viene ripetuta sino alla installazione di tutte le 8 junction box previste. Le junction box disteranno approssimativamente 200m l'una dall'altra in relazione alle tolleranze di installazione, (Fig.VI_7 – Step 4).

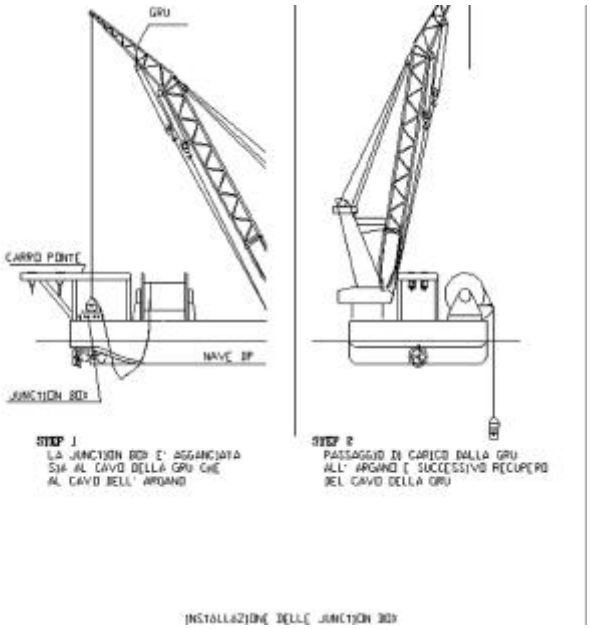

Figura VI_6: Installazione delle JB – Step 1 e 2

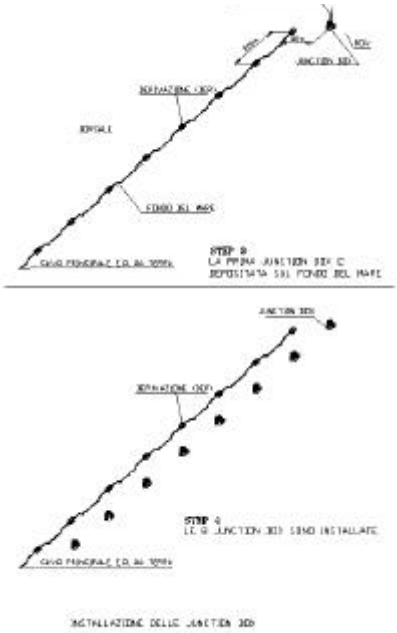

Figura VI_7: Installazione delle JB – Step 3 e 4

Connessione delle junction box con le rispettive derivazioni

Questa fase consiste nella connessione delle singole junction box con le rispettive scatole di derivazione per mezzo del cavo elettro-ottico JB-DER. Questo è già connesso alla propria junction box ed avvolto nel raccoglitore montato sulla junction box stessa.

La procedura di connessione delle junction box con le rispettive derivazioni prevede:

- Il ROV preleva il cavo JB-DER dal raccoglitore sulla junction box e inizia a svolgerlo dirigendosi verso la rispettiva scatola di derivazione, (Fig.VI_8 – Step 1).
- Il ROV esegue l'operazione di connessione del connettore del cavo DER-JB nell'innesto previsto nella scatola di derivazione, (Fig.VI_8 – Step 2).
- Tutte le altre junction box sono connesse alle rispettive scatole di derivazione, (Fig.VI_9 – Step 3).

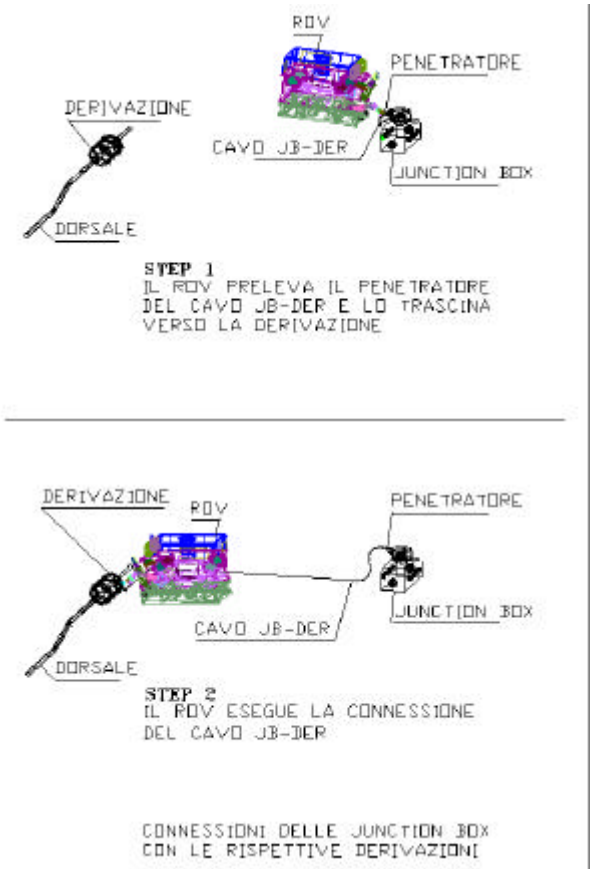

Figura VI_8: Connessione delle JB con le branching unit Step 1 e 2

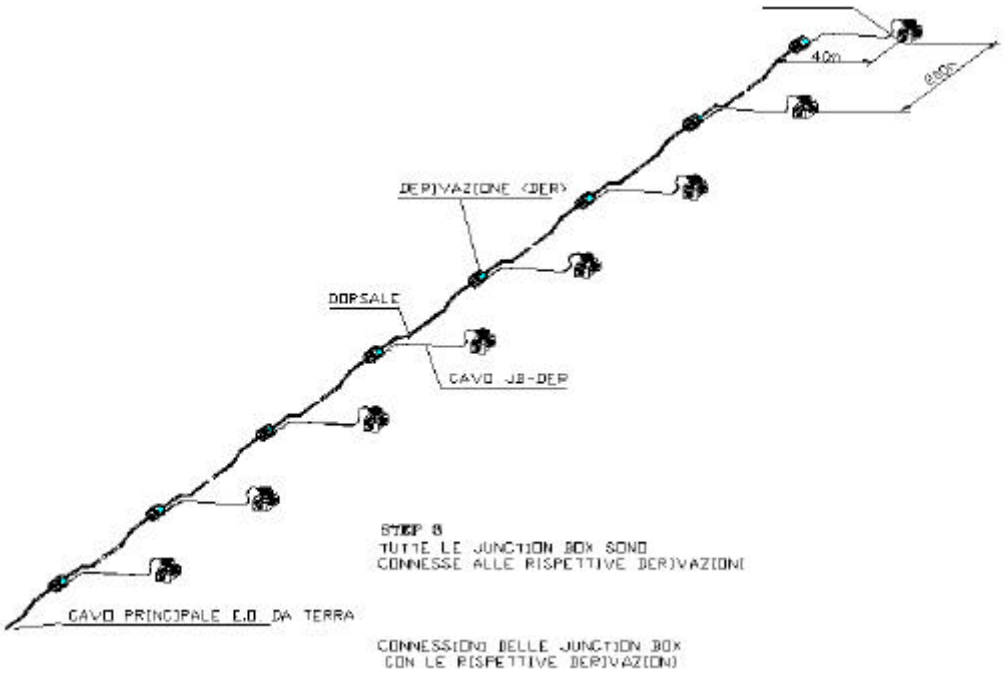

Figura VI_9: Connessione delle JB con le branching unit - Step 3

Connessione delle junction box

Questa fase consiste nella connessione di ogni junction box con quella adiacente. Il cavo JB-JB utilizzato viene depositato e connesso mediante il Modulo con Verricello Idraulico (MVI). Questo è un modulo speciale trasportato ed azionato dal ROV. Il MVI è composto da una struttura nella quale alloggia un verricello, attuato idraulicamente, sul quale si avvolge il cavo JB-JB da installare. Tale modulo è connesso meccanicamente sotto il ROV per mezzo di un sistema di bloccaggio idraulico controllato dal ROV stesso. Tale sistema di connessione provvede anche a collegare il circuito idraulico del ROV con quello del MVI per consentire l'attuazione del verricello. Il ROV è in grado di depositare il MVI sul fondo del mare, sganciarlo, operare indipendentemente da esso, riagganciarlo e recuperarlo a bordo.

La procedura di connessione delle junction box prevede:

a) Il ROV trasporta il MVI equipaggiato con il cavo JB-JB da installare. Lo deposita sul fondo del mare in prossimità della prima junction box, (Fig.VI_10 – Step 1).

b) Il ROV si sgancia dal MVI dopo aver svolto una lunghezza sufficiente di cavo JB-JB per eseguire la prima connessione, (Fig.VI_10 – Step 2).

c) Mediante il manipolatore, il ROV raccoglie l'estremità del cavo JB-JB equipaggiata con il connettore ed esegue la connessione con la junction box, (Fig.VI_10 – Step 2).

d) Il ROV torna sul MVI, lo aggancia e si sposta verso la seconda junction box da connettere svolgendo tutto il cavo JB-JB e depositando l'altra estremità con il connettore in posizione agevole per il recupero, (Fig.VI_10 – Step 3).

e) Analogamente, Il ROV si sgancia dal MVI, raccoglie mediante il manipolatore il connettore del cavo JB-JB ed esegue la connessione nella seconda junction box, (Fig.VI_11 – Step 4).

f) Il ROV riaggancia il MVI e torna a bordo per equipaggiare il MVI stesso con un nuovo rocchetto di cavo JB-JB per le successive connessioni, (Fig.VI_11 – Step 5).

g) La sequenza di operazioni descritta viene ripetuta per le successive connessioni tra le junction box, (Fig.VI_12 – Step 6).

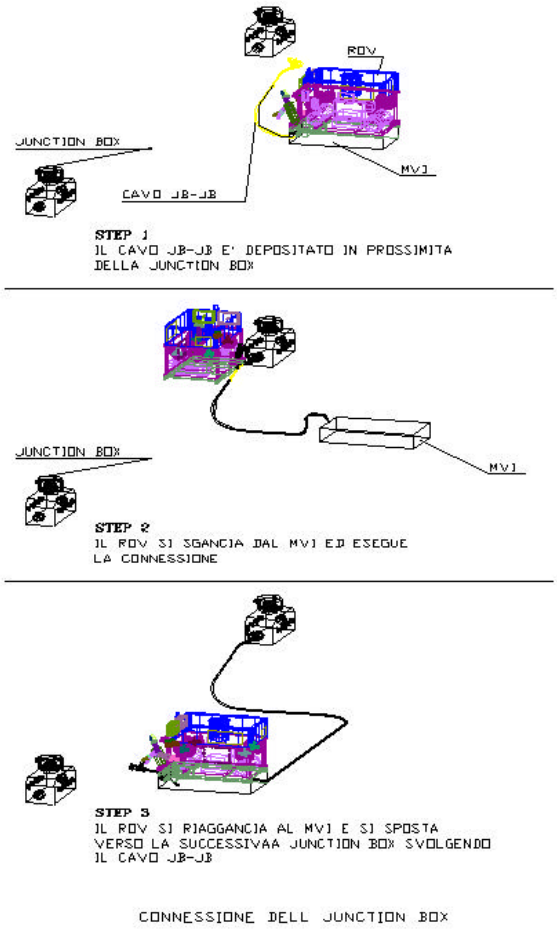

Figura VI_10: Connessione delle JB - Step 1,2 e 3

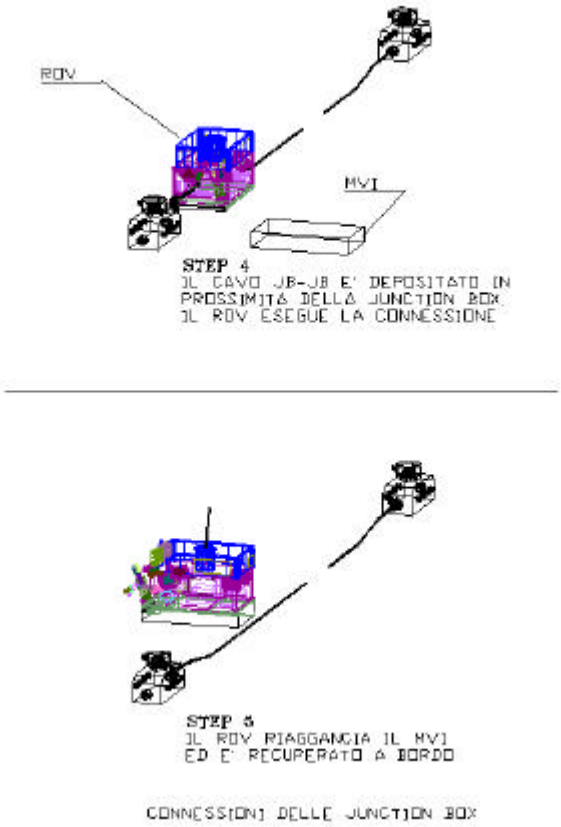

Figura VI_11: Connessione delle JB - Step 5

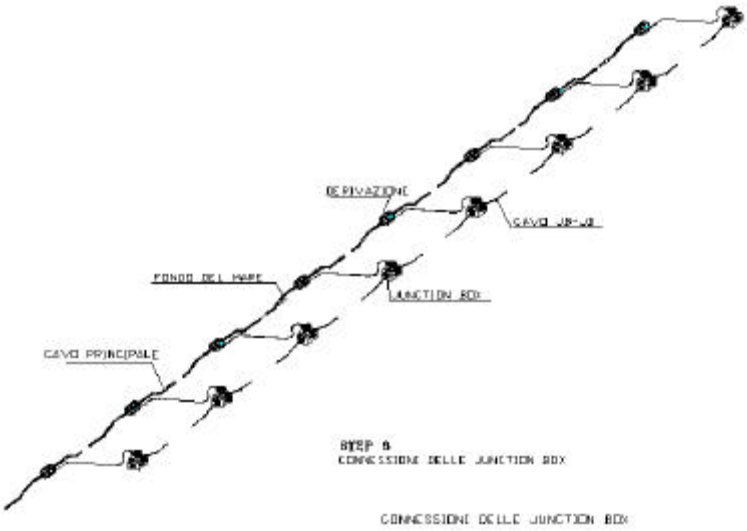

Figura VI_12: Connessione delle JB - Step 6

Installazione della stringa

La procedura di installazione prevista presenta due fondamentali vantaggi:

- la singola stringa da installare è più leggera rispetto ad altre possibili configurazioni alternative;
- la sequenza delle operazioni e le attrezzature necessarie per l'installazione risulta, in linea di principio, abbastanza semplice;

La procedura proposta ha il vantaggio di massimizzare tutte le fasi dall'assemblaggio a terra fino all'installazione in acque profonde e di renderle il più possibile modulari. Con ciò si intende:

- la possibilità di assemblare l'intera stringa a terra;
- eseguire i test di funzionamento a terra;
- utilizzare una struttura di contenimento (gabbia) per la movimentazione della singola stringa sia sulla nave di trasporto che su quella di installazione della stringa stessa
- la possibilità di ottimizzare lo spazio a disposizione sul ponte sia della nave di trasporto che su quella di installazione
- automatizzare le operazioni di installazione della stringa

La procedura qui di seguito descritta fornisce una idea di massima della fase di installazione della singola stringa. Naturalmente, durante lo sviluppo del progetto, occorrerà prevedere in dettaglio anche la procedura per le seguenti fasi:

a) Assemblaggio a terra della stringa.

b) Test della stringa.

c) Assemblaggio della stringa nella gabbia di trasporto.

d) Caricamento delle gabbie sul ponte della nave di trasporto.

e) Trasferimento in alto mare nell'area prevista per l'installazione del rivelatore mediante la nave di trasporto

f) Movimentazione delle gabbie dalla nave di trasporto al ponte della nave per l'installazione già presente nel sito

Dopo aver assemblato a terra una certa quantità di gabbie (il numero deve essere precedentemente definito), la nave per l'installazione con il posizionamento dinamico (nave DP) ha raggiunto il sito per l'installazione e ha effettuato una survey dell'area.

Prima che la survey sia conclusa la prima nave da trasporto viene caricata con un numero di gabbie sufficiente per tenere impegnata la nave DP di installazione fino al prossimo carico e raggiunge il sito.

La nave da trasporto n°1 si affianca sottobordo alla nave DP o è mantenuta ad una distanza di sicurezza mediante un rimorchiatore. La nave da trasporto n°1 serve per rifornire in continuazione la nave DP delle gabbie con le stringhe da installare. Nel frattempo, la nave da trasporto n°2 viene caricata con un nuovo gruppo di gabbie. La nave da trasporto n°2 si alternerà in continuazione con la nave da trasporto n°1 nel rifornire la nave DP.

Mediante la gru presente sulla nave DP le singole gabbie vengono prelevate dalla nave da trasporto e posizionate sul ponte della nave DP nell'area prevista per l'installazione (Fig.VI_13).

Le attrezzature e i componenti coinvolti in tale procedura sono mostrati nelle Fig. VI_13,14, 15 e 16.

La procedura di installazione delle singole stringhe prevede i seguenti passi:

- Il verricello n°1, posto sul carro ponte nella poppa della nave DP, preleva il basamento della stringa e comincia a calarlo in acqua svolgendo il cavo (Fig.VI_14 - Step 1).
- Mentre vengono calati i primi 150m di cavo elettro-ottico armato della stringa, il verricello n°2 preleva il primo elemento presente nella stringa, per esempio il modulo di controllo ottico, (Fig.VI_14 - Step 2).
- I due verricelli continuano a calare la stringa alcuni metri sott'acqua fino che il cavo del primo verricello e il cavo elettro-ottico armato della stringa sono quasi paralleli (Fig.15 - Step 2). A questo punto, il cavo del verricello n°1 viene messo in bando e il carico trasferito al verricello n°2, (Fig.VI_14 - Step 3).
- L'intervento del ROV consente di sganciare il cavo del verricello n°1 che viene recuperato (Fig.VI_14 - Step 3).
- L'elemento successivo della stringa viene prelevato dal verricello n°1 mentre il verricello n°2 continua a calare la stringa in acqua. In analogia alle operazioni descritte nei punti 3 e 4 qui sopra, il cavo viene trasferito dal verricello n°2 al verricello n°1, il cavo del verricello n°2 viene sganciato dall'elemento mediante l'intervento del ROV e viene recuperato. Questa successione di operazioni viene ripetuta per tutti gli elementi della stringa, (Fig.VI_14 - Step 4).
- Il prelevamento degli elementi della stringa da parte dei due verricelli viene agevolato dalla presenza di carrelli che scorrono all'interno della gabbia stessa verso il carro ponte.
- L'ultimo elemento della stringa ad essere calato con il verricello è la boa. Alcuni metri sott'acqua, il ROV connette anche il gancio della gru di bordo alla boa (Fig.VI_15 - Step 5).
- Il cavo del verricello viene messo in bando e il carico trasferito al cavo della gru. Il ROV provvede a sganciare il cavo del verricello che viene recuperato (Fig.VI_15 - Step 6).

- La gru sposta la stringa sul lato della nave DP (Fig.VI_15 - Step 7).
- Il ROV connette il cavo dell'argano principale alla boa (Fig.VI_16 - Step 8).
- Mentre la boa viene calata, il cavo della gru viene messo in bando e il carico trasferito al cavo dell'argano (Fig.VI_16 - Step 9).
- Il ROV disconnette il cavo della gru e la stringa continua ad essere calata mediante il cavo dell'argano principale sul fondo del mare nella posizione prevista (Fig.VI_16 - Step 9).

La architettura finale del rivelatore prevede l'installazione di 64 stringhe disposte su un area di circa 2 km2. Le singole stringhe sono installate in modo da costituire una griglia quadrata di 8x8 stringhe spaziate di 200m come mostrato in Fig.VI_17 - Step 10. La sequenza di installazione prevede che le stringhe siano depositate sul fondo dal mare per file. Al completamento di ogni fila si procede alla fase di connessione della singola stringa con la rispettiva junction box mediante il cavo elettro-ottico (descritta in seguito). Questa sequenza consente di rendere più agevoli le operazioni di connessione mediante l'intervento del ROV. Una volta completata la fase di connessione di una fila di stringhe si procede con l'installazione delle stringhe della seconda fila.

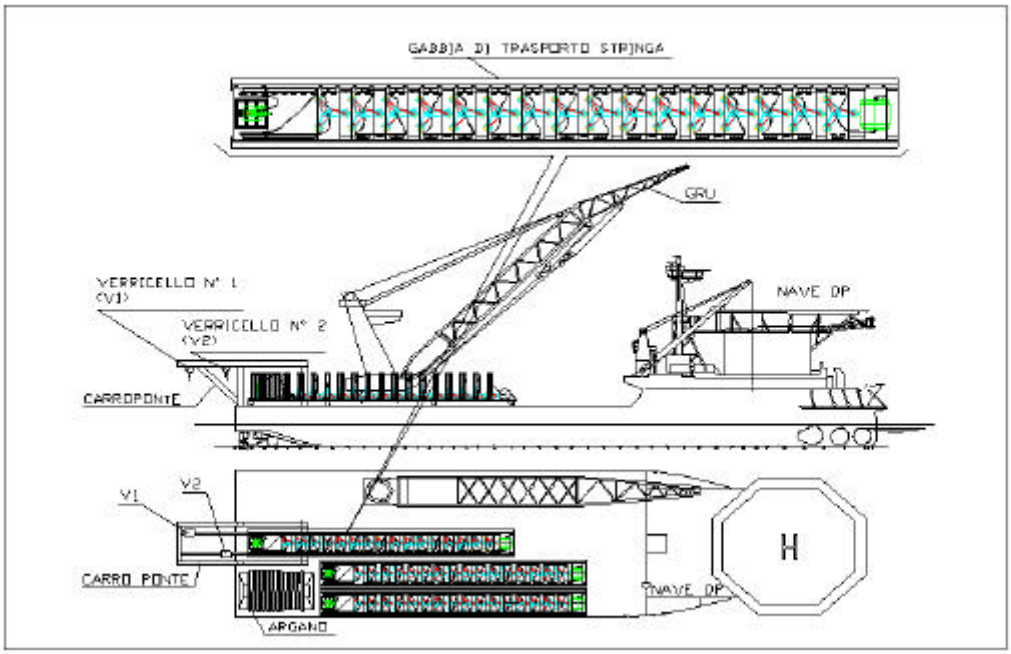

Figura VI_13: Posizionamento delle stringhe sul ponte della nave

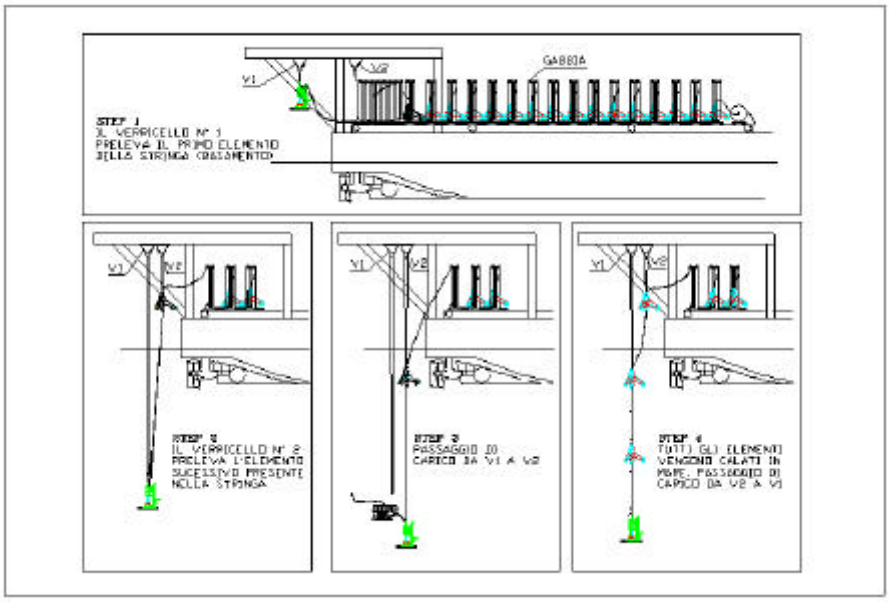

Figura VI_14: Deployment delle stringhe - Step 1,2,3 e 4

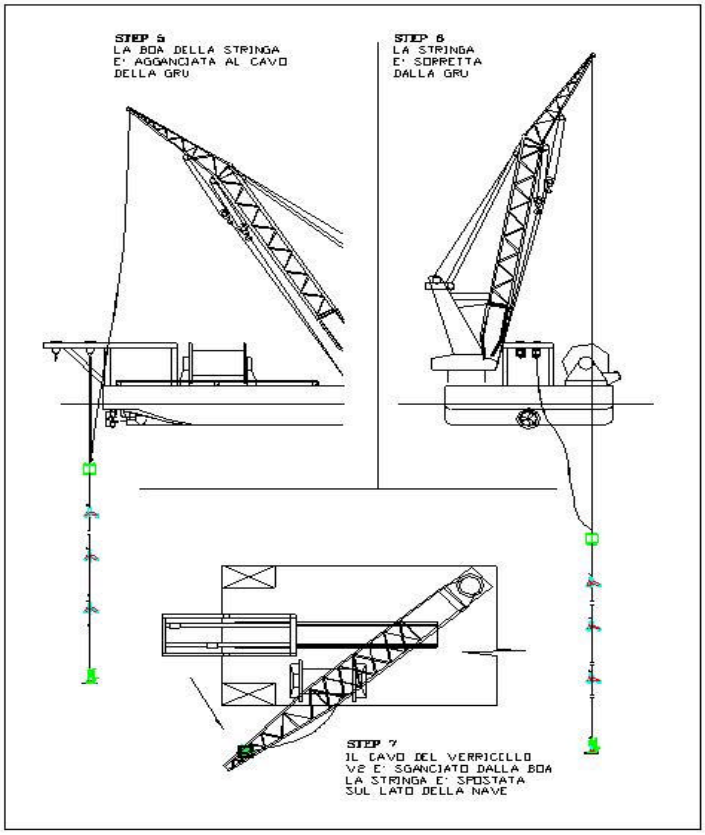

Figura VI_15: Deployment delle stringhe - Step 5,6 e7

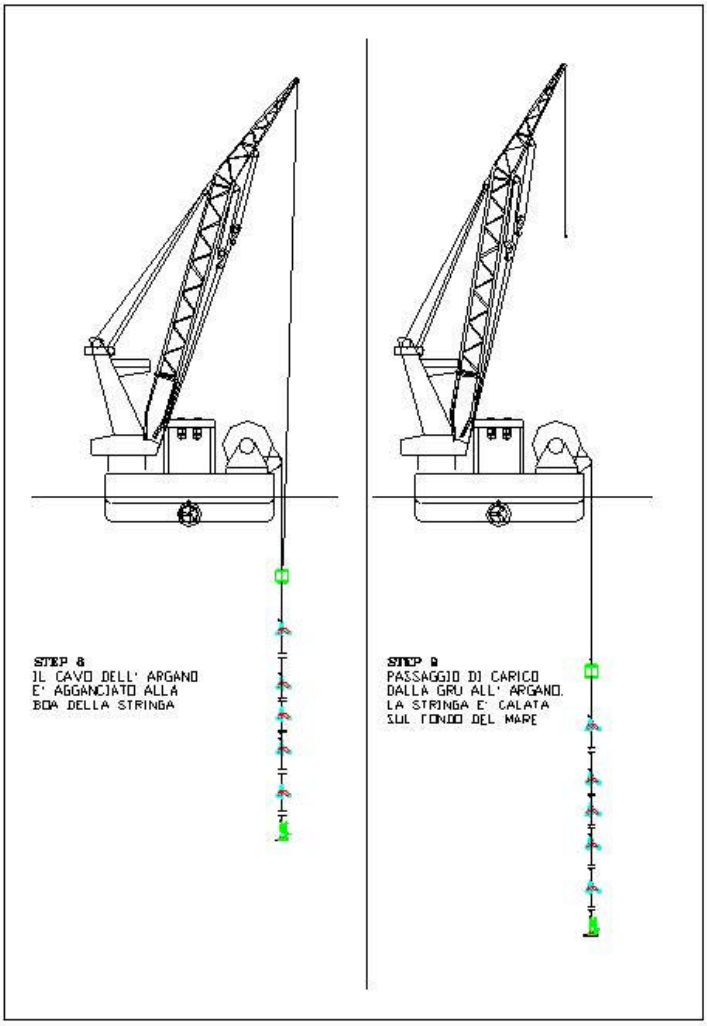

Figura VI_16: deployment delle stringhe - Step 8 e 9

Connessione delle stringhe con le junction box

Questa fase consiste nella connessione di ogni stringa con la rispettiva junction box. Come sottolineato nel punto 13 della sequenza di installazione della stringa, la fase di connessione delle stringhe con le rispettive junction box inizia quando una fila di stringhe è stata installata. Questo accorgimento facilita la manovrabilità e accessibilità del ROV durante le operazioni.

La sequenza di operazioni prevista in questa fase ricalca quasi fedelmente quella descritta per la connessione di due junction box tra loro mediante il cavo JB-JB. A differenza di

quest'ultima, la lunghezza del cavo secondario avvolto nel verricello montato all'interno del MVI ha lunghezza variabile in relazione alla stringa che deve essere connessa. In particolare, si passa da una distanza minima approssimativa di 100m per la connessione delle stringhe più adiacenti alla dorsale, ad una massima di 700m per la stringa più lontana dalla dorsale stessa. Perciò, la descrizione delle operazioni farà riferimento agli sketch mostrati per descrivere la fase di connessione tra due junction box.

La procedura di connessione delle singole stringhe con le rispettive junction box prevede i seguenti passi:

- Il ROV trasporta il MVI equipaggiato con il cavo secondario da installare. Lo deposita sul fondo del mare in prossimità della prima stringa da connettere.
- Il ROV si sgancia dal MVI dopo aver svolto una lunghezza sufficiente di cavo secondario per eseguire la connessione con la stringa.
- Mediante il manipolatore, il ROV raccoglie l'estremità del cavo secondario equipaggiata con il penetratore e esegue la connessione nell'innesto previsto nel basamento della stringa.
- Il ROV torna sul MVI, lo aggancia e si sposta verso la junction box da connettere svolgendo tutto il secondario e depositando l'altra estremità con il penetratore in posizione agevole per il recupero.
- Analogamente, Il ROV si sgancia dal MVI, raccoglie mediante il manipolatore il penetratore del cavo secondario ed esegue la connessione nella junction box.
- Il ROV riaggancia il MVI e torna a bordo per equipaggiare il MVI stesso con un nuovo rocchetto di cavo secondario di lunghezza opportuna per eseguire la connessione successiva.

La sequenza di operazioni descritta viene ripetuta per le successive connessioni tra le stringhe e le junction box.

Di seguito viene sintetizzata la sequenza delle operazioni necessarie per la esecuzione della installazione del singolo elemento "torre tensionata" del rilevatore. Questa sequenza costituisce solo una procedura preliminare che ha principalmente lo scopo di identificare le criticità nelle operazioni previste per la installazione della struttura stessa.

Mezzi ed attrezzature per l'installazione delle torri

La procedura prevista nella varie fasi di installazione richiede almeno i seguenti mezzi navali, attrezzature e componenti:

- Una nave con posizionamento dinamico dotata di una gru e di almeno un davit con una capacità di 3500-4000m di cavo, per movimentare, calare e posizionare le gabbie di pre-assemblaggio sul fondo del mare.

- N° 1 - ROV per l'assistenza durante le operazioni sottomarine appartenenti alla classe "Innovator".
- N° 2/3 – mezzi navali di supporto per il trasporto delle gabbie.
- N° 2/3 – rimorchiatori.

Sequenza delle operazioni per l'installazione della torre

La procedura di installazione proposta, rispetto ad altre valutate (ad esempio quelle precedentemente proposta per le torri e le stringhe) ha il vantaggio di massimizzare tutte le fasi dall'assemblaggio a terra fino all'installazione in acque profonde e di renderle il più possibile modulari. Con ciò si intende:

- la possibilità di assemblare l'intera torre tensionata a terra;
- eseguire i test di funzionamento a terra;
- utilizzare una struttura di contenimento (gabbia) per la movimentazione della singola torre tensionata sia sulla chiatta che sulla nave DP per l'installazione;
- automatizzare e semplificare le operazioni di installazione della torre tensionata.

La procedura qui di seguito descritta fornisce una idea di massima della fase di installazione della singola torre tensionata. Naturalmente, durante lo sviluppo del progetto, oltre che studiare in dettaglio e finalizzare la procedura qui proposta, occorrerà prevedere e definire in dettaglio anche la procedura per le seguenti fasi:

- Assemblaggio a terra della torre tensionata (compreso l'inserimento nella gabbia di pre-assemblaggio).
- Test della torre tensionata.
- Caricamento delle gabbie sul ponte della chiatta.
- Trasferimento in alto mare nell'area prevista per l'installazione del rivelatore mediante la chiatta.
- Movimentazione delle gabbie dalla chiatta al ponte della nave per l'installazione già presente nel sito.

Dopo aver assemblato a terra una certa quantità di gabbie (il numero deve essere precedentemente definito), la nave per l'installazione con il posizionamento dinamico (nave DP) ha raggiunto il sito per l'installazione e ha effettuato una survey dell'area.

Prima che la survey sia conclusa la prima chiatta viene caricata con un numero di gabbie sufficiente per tenere impegnata la nave DP di installazione fino al prossimo carico e raggiunge il sito.

La chiatta n°1 si affianca sottobordo alla nave DP o è mantenuta ad una distanza di sicurezza mediante un rimorchiatore. La chiatta n°1 serve per rifornire in continuazione la nave DP delle gabbie con le stringhe da installare. Nel frattempo, la chiatta n°2 viene caricata con un nuovo gruppo di gabbie. La chiatta n°2 si alternerà in continuazione con la chiatta n°1 nel rifornire la nave DP.

Mediante la gru presente sulla nave DP le singole gabbie vengono prelevate dalla chiatta e posizionate sul ponte della nave DP nell'area prevista per l'installazione o calate direttamente in mare una volta imbragata correttamente.

Qui di seguito sono descritte le singole fasi previste durante la installazione.

1. La gabbia di pre-assemblaggio della torre tensionata è posizionata sul ponte della nave DP (fig. VI_17)
2. Il verricello della gru principale aggancia la gabbia in corrispondenza del basamento. Successivamente, il verricello del davit della nave DP preleva la gabbia nell'estremità superiore in corrispondenza della boa di sommità. La gabbia viene sollevata e calata fuori bordo (fig VI_18, 19)
3. Il verricello del davit comincia a svolgere il cavo contemporaneamente al verricello della gru consentendo alla gabbia di disporsi verticalmente appena sotto la chiglia della nave DP (fig. VI_20).
4. Man mano che la gabbia si dispone verticalmente il cavo del verricello della gru viene messo in bando e il carico trasferito al verricello del davit (fig. VI_20).
5. Il verricello del davit continua a calare gabbia fino a posizionarla sul fondo del mare (fig. VI_20).
6. Una volta raggiunta la posizione prevista per il basamento della gabbia, il ROV disconnette il cavo del verricello del davit (fig. VI_21).
7. Il ROV sgancia la boa di sommità della torre dalla gabbia. La boa risale esercitando la sua spinta idrostatica sui cavi che legano i piani della torre stessa (fig. VI_22).
8. Il ROV sgancia un dispositivo di rilascio meccanico presente sulla gabbia in modo che la spinta idrostatica della boa consenta di estrarre i singoli bracci della torre tensionata e di svolgere i cavi che collegano i piani della torre (fig. VI_23).

9. I piani della torre uno dopo l'altro risalgono liberandosi dalla gabbia di pre-assemblaggio in modo da disporsi, man mano che i cavi di collegamenti vengono tensionati dalla boa, ortogonalmente l'uno rispetto l'altro (fig. VI_23).
10. Uno dopo l'altro i piani vengono svolti assumendo così la configurazione finale prevista per la torre tensionata (fig. VI_23).
11. Il singolo elemento base dell'architettura del telescopio sottomarino costituito dalla torre tensionata assume la configurazione finale in cui i cavi che collegano i piani sono tensionati dalla concomitante azione del basamento e della boa di sommità (fig. VI_23).

Occorre sottolineare che le fasi individuate dai punti 7-11 in cui si prevede l'intervento del ROV per lo sganciamento dei bracci e lo svolgimento dei cavi che li tensionano dalla gabbia di pre-assemblaggio già depositata sul fondo del mare, può essere eseguita indipendentemente dalle fasi precedenti. Questo implica che mentre la nave DP continua a depositare sul fondo del mare le torri tensionate, una nave di supporto più piccola della nave DP potrebbe eseguire mediante ROV le operazioni sottomarine di installazione delle torri stesse in tempi e modalità indipendenti da quelli della nave DP. Ne consegue che questa procedura di installazione consente di:

- ridurre i tempi complessivi per la installazione del rilevatore sottomarino;
- ottimizzare e/o ridurre l'impiego della nave DP per l'installazione delle torri tensionate;
- ridurre i costi di installazione.

In alternativa alla sequenza di installazione descritta può essere considerata una sequenza alternativa che prevede lo svolgimento dei singoli bracci (e quindi dei piani) della torre tensionata subito dopo essere stata calata sotto la chiglia della nave DP anziché dopo essere stata posizionata sul fondo del mare . Una rappresentazione schematica di questa seconda procedura di installazione è mostrato nelle immagini fig.VI_24, 25 ,26, 27, 28. E' da osservare che le prime fasi dell'operazione ricalcano esattamente le fasi analizzate nella sequenza dal fondo.

Questa sequenza operativa presenta il vantaggio di poter monitorare e/o controllare lo svolgimento dei piani della torre tensionata in superficie e quindi di poter predisporre eventuali interventi di emergenza sia con una maggiore disponibilità di mezzi che in condizioni operative più agevoli rispetto al fondo del mare. Contemporaneamente occorre sottolineare che tale procedura da un lato implica maggiori difficoltà nel depositare sul fondo del mare nell'ambito delle tolleranze previste la torre tensionata completamente svolta e dall'altro richiede l'impiego della nave DP per tutte le fasi operative dell'installazione. Ne consegue che tale procedura risulta molto più onerosa sia in termini di tempi complessivi di

installazione che ovviamente di costi perché richiede un maggiore utilizzo della nave DP rispetto alla procedura sopra descritta.

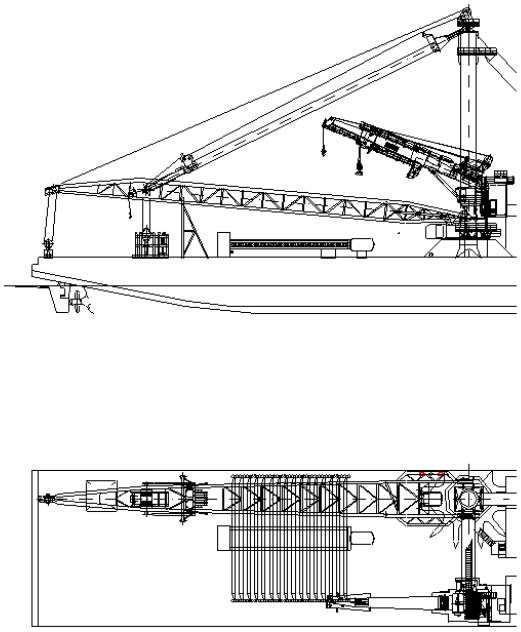

Figura VI_17: Deployment della torre-NEMO - Step

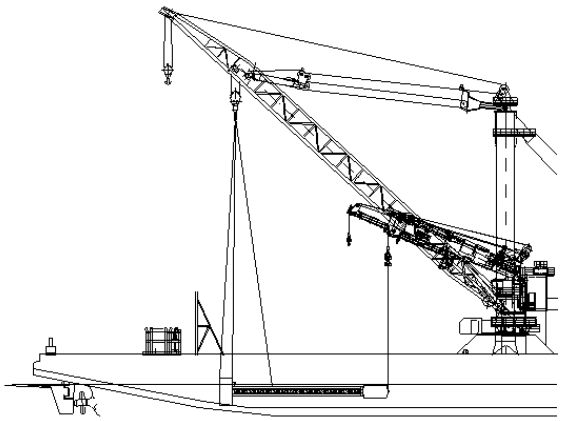

Figura VI_18: Deployment della torre-NEMO - Step

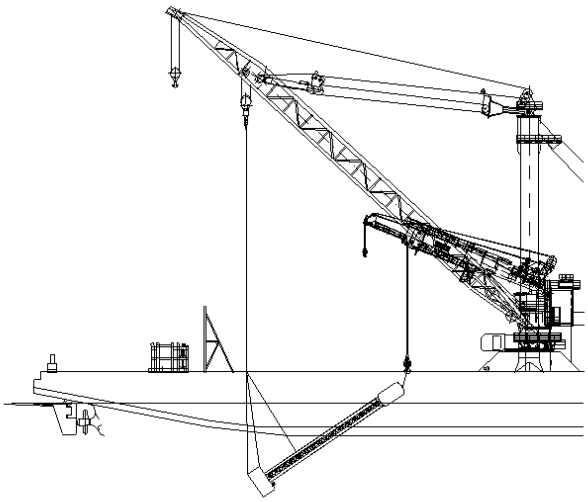

Figura VI_19: Deployment della torre-NEMO - Step

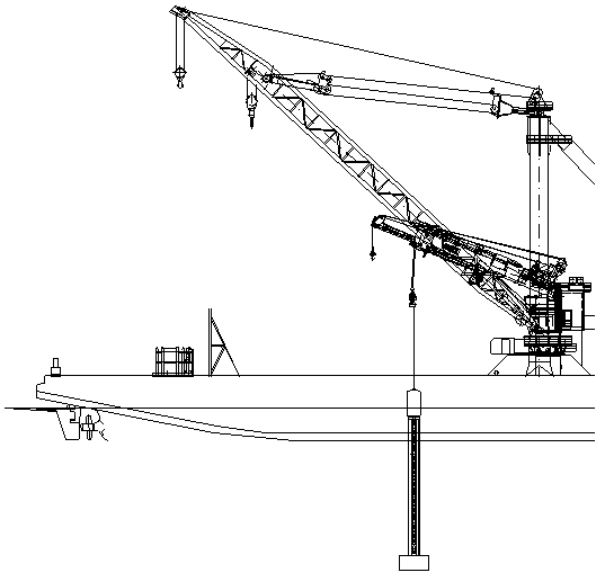

Figura VI_20: Deployment della torre-NEMO - Step

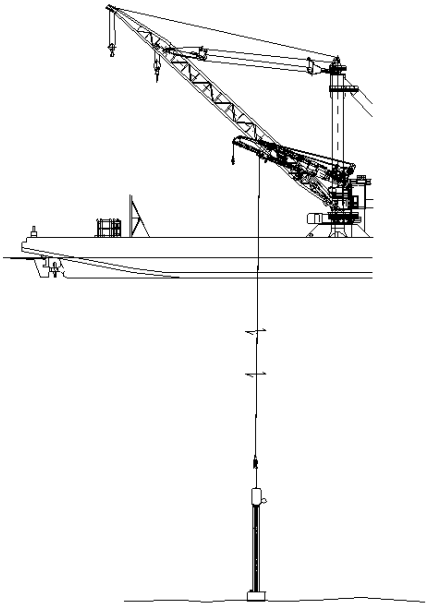

Figura VI_21: Deployment della torre-NEMO - Step

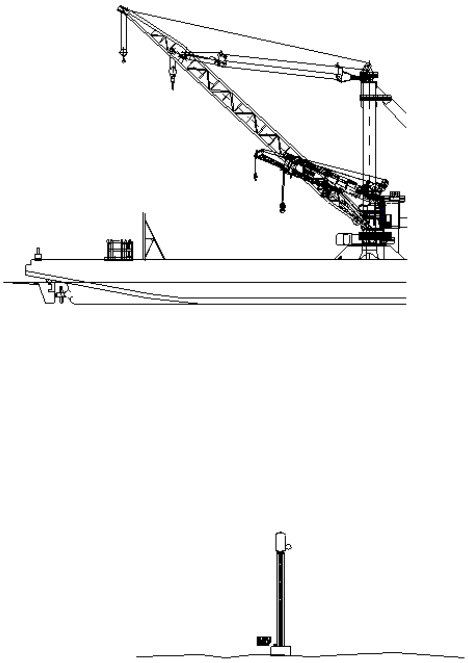

Figura VI_22: Deployment della torre-NEMO - Step

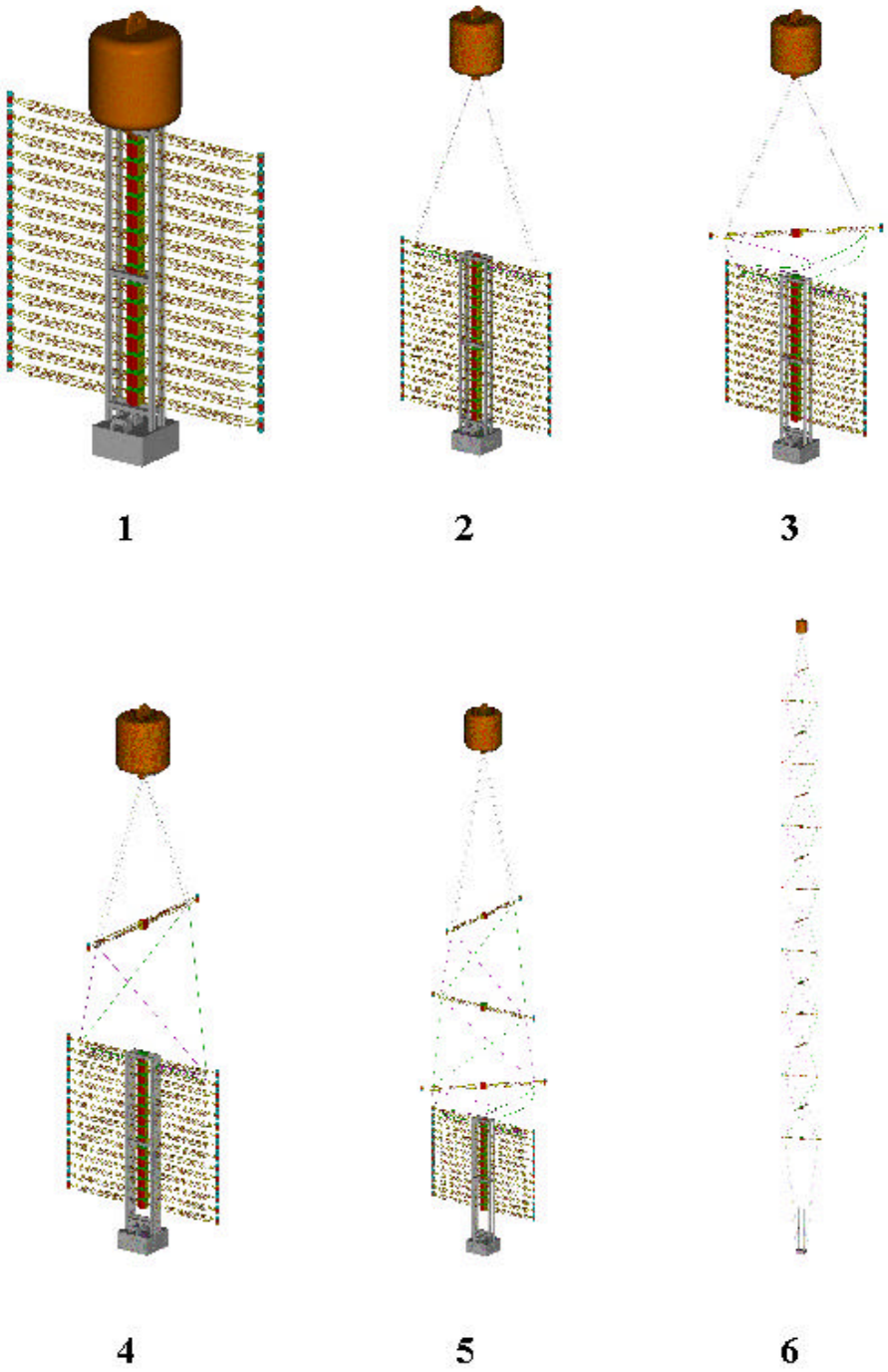

Figura VI_23: Deployment della torre-NEMO - Step

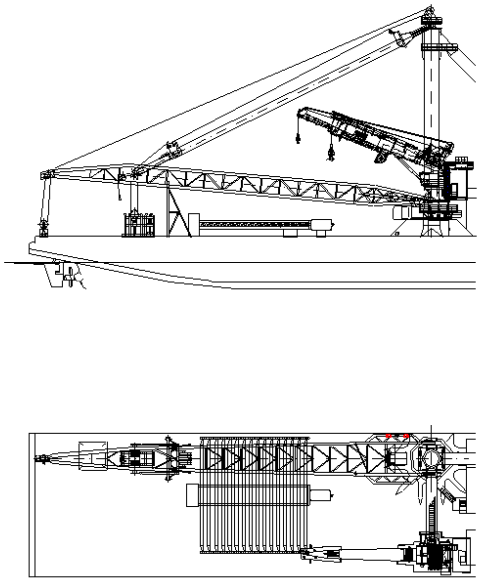

Figura VI_24: Sequenza dall'alto per il deployment della Torre "Nemo" – Posizionamento della torre sul ponte della nave

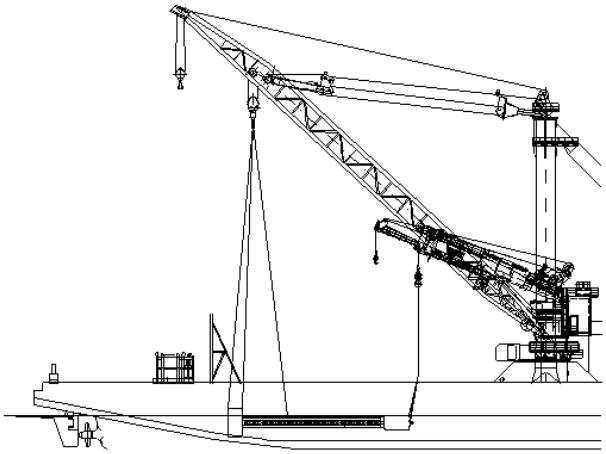

Figura VI_25: Sequenza dall'alto per il deployment della Torre "Nemo" – La torre viene portata fuori bordo

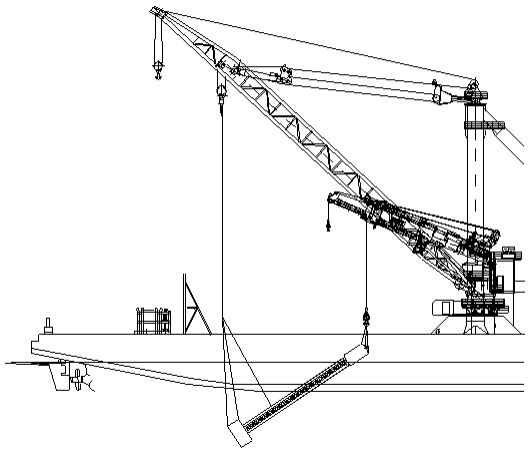

Figura VI_26: Sequenza dall'alto per il deployment della Torre "Nemo" – passaggio di carico tra le gru

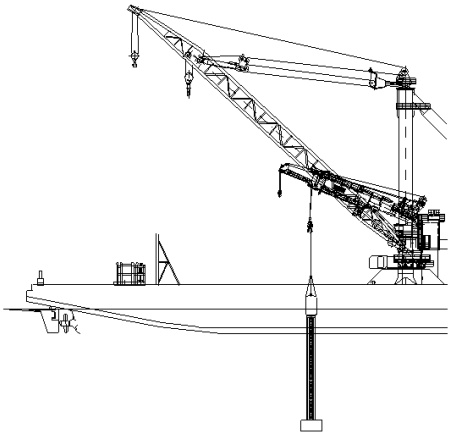

Figura VI_27: Sequenza dall'alto per il deployment della Torre "Nemo" – I piani della torre cominciano ad essere sganciati.

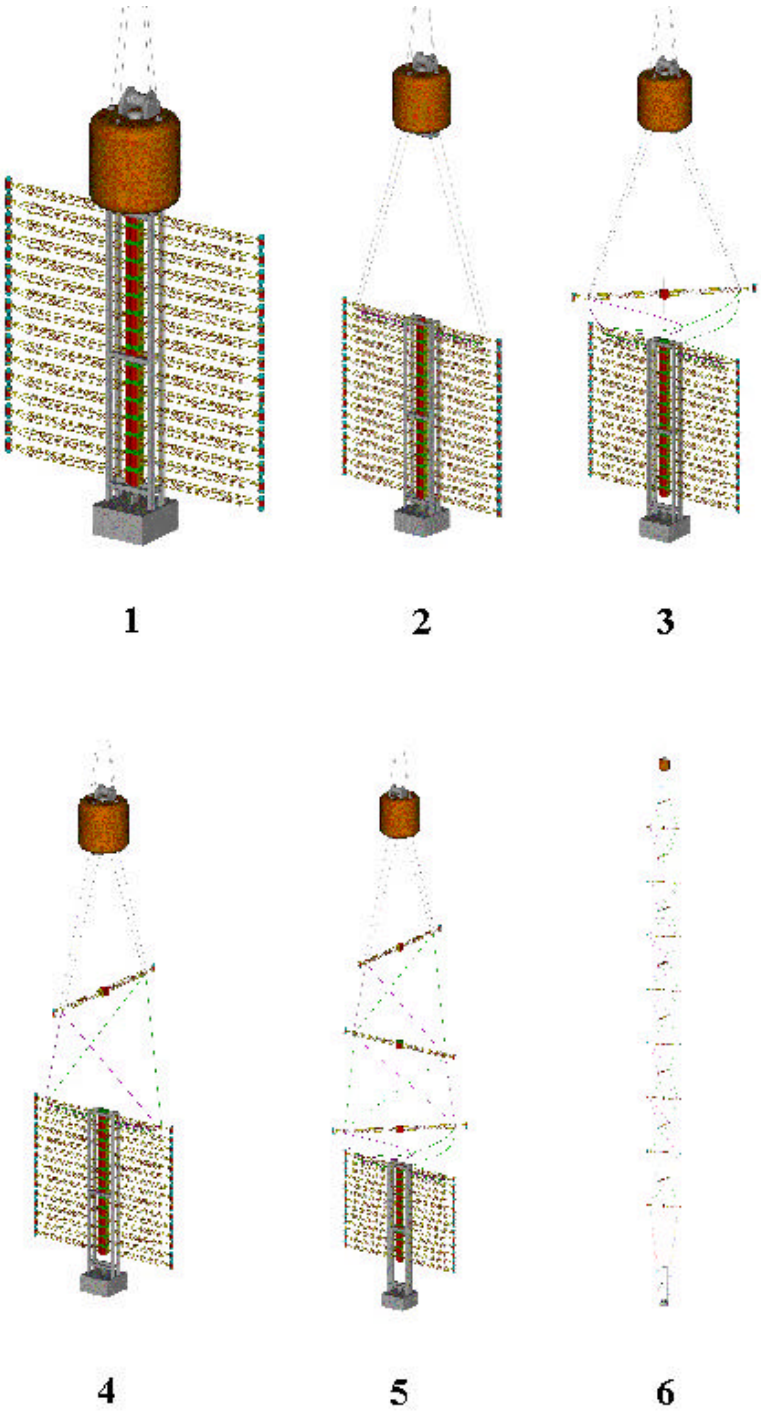

Figura VI_28: Sequenza dall'alto per il deployment della Torre "Nemo" – Sequenza di sgancio dei piani della torre.

Sistema di recupero della torre/stringa

Come già detto sia torre che stringa hanno una base identica; la base è collegata meccanicamente alla zavorra per mezzo di due sganciatori (fig VI_29). L'apertura, comandata dalla superficie per mezzo di opportuni segnali acustici, anche di uno solo dei due sganciatori permette alla stringa di liberarsi della zavorra e quindi di risalire alla superficie per essere recuperata, la struttura verrà inoltre dotata di un sistema meccanico in grado di poter sganciare la stringa mediante l'intervento di ROV o AUV nel caso in cui il sistema di sgancio acustico presenti condizioni di malfunzionamento. Questa operazione può rendersi necessaria:

- in caso di un guasto talmente esteso da rendere inutilizzabile in parte o totalmente la stringa
- in caso di manutenzione programmata dopo un certo numero di anni di funzionamento (per es. diminuzione della resa ottica dei rivelatori a causa del deposito di sedimenti)
- qualora si voglia sostituire una struttura a stringa con una a torre o viceversa.

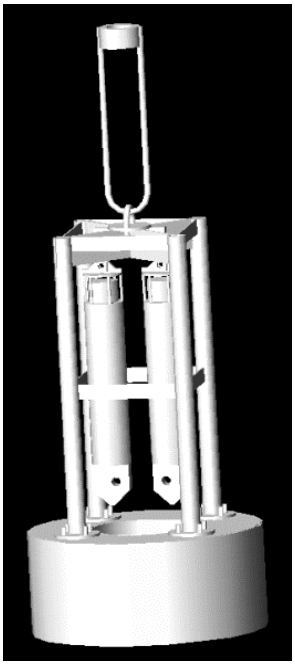

Figura VI_29: Base della stringa. Sistema di sgancio della zavorra

Elettronica sottomarina

Struttura

Il collegamento fra rivelatore e la costa dovrà assicurare il trasporto di tutte le informazioni da/verso il telescopio e quello dell'energia verso gli apparati sommersi. La tecnologia attuale delle telecomunicazioni è in grado di assicurare tale collegamento con i necessari requisiti di affidabilità, costo e facilità di manutenzione, tanto da poter scegliere con un notevole grado di sicurezza il collegamento con un singolo cavo a molte fibre come avviene già per le comunicazioni transoceaniche. Tuttavia i problemi connessi con l'affidabilità di quelle parti di

apparato che da sole assicurano il buon funzionamento di tutto il sistema non sono banali. Dal punto di arrivo del cavo elettro-ottico, nel sito del telescopio, inizia una struttura di distribuzione di dati e dell'energia a tutto l'apparato. È opportuno suddividere l'apparato in tante sotto-unità, possibilmente ridondanti, ognuna delle quali sia capace di autoescludersi in caso di guasto senza compromettere il funzionamento degli apparati circostanti.

La struttura che al momento sembra più ragionevole prevede l'apparato racchiuso in un immaginario parallelepipedo d'acqua a base quadrata, di lato pari a 1400 m ed alto 750 m. La struttura è logicamente costituita da opportuni settori. Una prima suddivisione è in 8 macroregioni. Ognuna di esse gestisce una microregione con 8 stringhe ciascuna. Una stringa è formata da 16 piani. Su ogni piano sono ospitati 4 PMT, per un totale, come già visto, di 4096 PMT.

Questa struttura corrisponde ad una distribuzione ad albero come quella riportata in figura

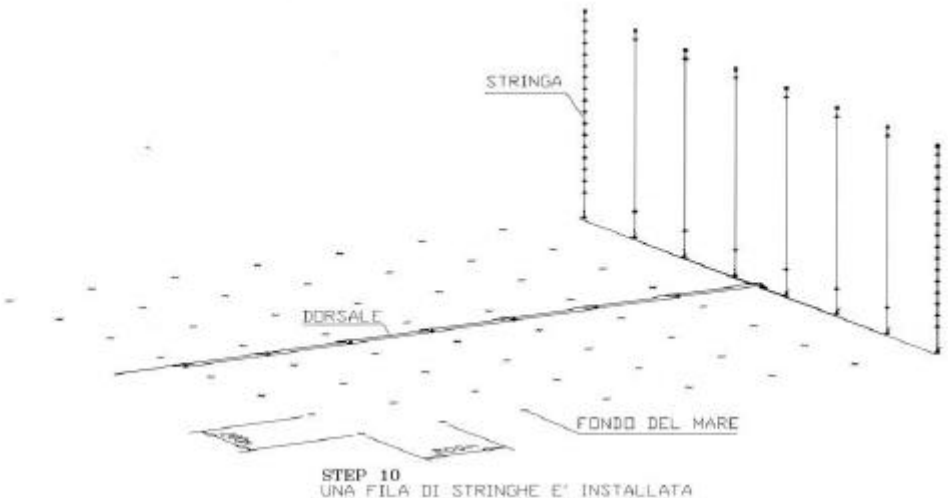

Figura VI_29: Immagine della distribuzione ad albero

Il cavo elettroottico principale, proveniente da terra, viene sfioccato in 8 diramazioni. Queste si collegano ad 8 junction box per mezzo di connessioni sottomarine effettuate con ROV.

Le junction box hanno le seguenti funzioni di collegamento:

- con le 8 stringhe
- con la stringa precedente e quella successiva
- con la corrispondente diramazione del cavo principale

tutti questi collegamenti verranno effettuati da un ROV per mezzo di un cavo elettroottico terminato con due speciali connettori sottomarini. È importante quindi che tutte le connessioni siano operabili con ROV di profondità. Oggi questa tecnologia è abbastanza sviluppata, congiuntamente a quella dei connettori. Per le connessioni tra i dispositivi presenti all'interno di una stessa stringa sono previste soluzioni differenti e comunque più semplici e meno costose.

Le junction box ospitano all'interno:

- il concentratore di dati WDM che permette di spedire/ricevere tutto il flusso dati da e per le 8 stringhe collegate
- il sistema di alimentatori DC-DC converter, resistenze di protezione, teleruttori, nonché sistemi di diagnostica varia
- elettronica di controllo e sensoristica

Le junction box sono collegate con un cavo elettroottico mediante i connettori sottomarini alla base delle stringhe, dove è fissato un contenitore che ospita l'unità di concentramento dei dati da e per i vari piani della stringa, nonché elettronica di alimentazione, di controllo e sensoristica. Ad ogni piano si trova un contenitore dove arrivano i segnali dei PMT, dei sistemi di slow control e quelli provenienti dalla base della stringa. Inoltre su ogni piano si troverà un sistema bussola + inclinometro per determinare l'orientamento e l'inclinazione del piano, onde risalire alla posizione dei PMT rispetto al centro del piano.

Infine, ad ogni certo numero di piani (presumibilmente ad ogni 4 piani) si troverà un ricevitore acustico per consentire, attraverso un sistema di triangolazione acustica, di determinare la posizione del centro del piano, rispetto ad un sistema di riferimento acustico,costituito da una serie di trasmettitori-ricevitori acustici, posti alla base delle stringhe. La posizione dei piani intermedi, non serviti da un ricevitore acustico, sarà determinata con una opportuna interpolazione dei dati relativi ad ogni stringa.

Comunicazioni

Dall'esperienza maturata in altre situazioni simili relative ad altre collaborazioni internazionali (NESTOR, ANTARES), risulta che i segnali di nostro interesse provenienti dai PMT hanno una banda di circa 100 MHz ed esigono, per una buona descrizione, una risoluzione di ~ 48 dB ed una dinamica di ~ 72 dB. Gli organi di controllo necessitano di una banda notevolmente più limitata, che in prima battuta può essere trascurata.

Controllo dei parametri del rivelatore

Il rivelatore ha bisogno che i suoi parametri (soglie, tempi, tensioni ecc…) siano regolati da terra, con comandi a distanza. Tali informazioni, hanno una larghezza di banda necessaria al loro trasferimento é non superiore a 10 kb/s.

Canale di temporizzazione

Tutti i convertitori associati ai PMT devono essere sincroni tra loro e sincroni con gli apparati di terra. Questa necessità impone la trasmissione da terra di un clock di sincronizzazione ma, poiché già esiste un canale di controllo da terra verso il rivelatore, si può sfruttare questo stesso per veicolare anche il segnale di temporizzazione. Ciò può essere realizzato a patto di scegliere un opportuno codice di trasmissione autosincronizzato (che sia, cioè, un segnale ciclostazionario).

Il Sistema di trasmissione dei dati [1]

Il progetto Nemo come già detto prevede la realizzazione di un detector composto da 64 canali per stringa per un totale di 64 stringhe. Il numero di rivelatori totale sarà di 4096. Ogni stringa alloggerà 4 rivelatori per piano per un totale di 16 piani.

In ogni piano sarà realizzata una scheda elettronica capace di raggruppare i 4 canali provenienti dai quattro fotomoltiplicatori e, tramite un'opportuna interfaccia, S-1.1, sarà connessa, per mezzo di una fibra ottica di tipo monomodale ad un apparato posto alla base della stringa.

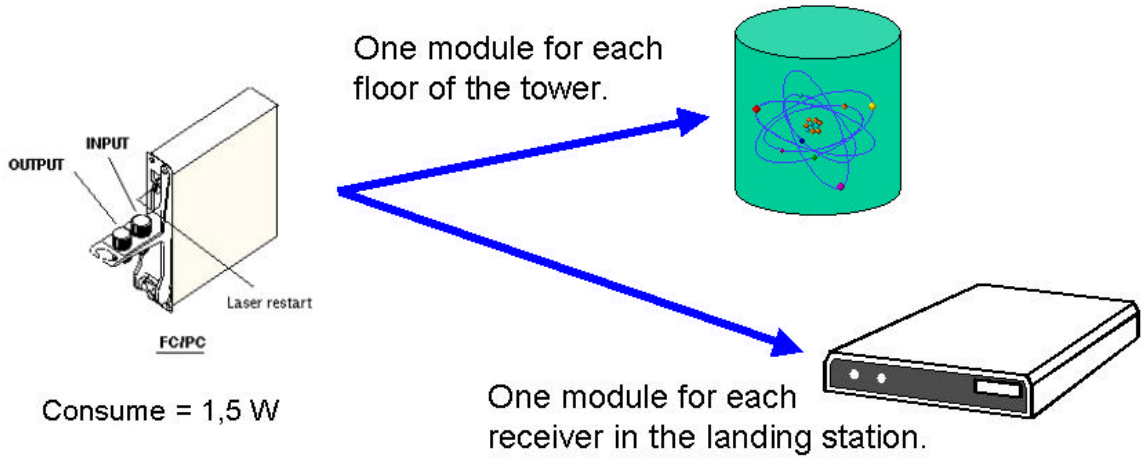

Figura VI_30: Interfaccia S-1.1

Questo apparato, denominato 1660 SM Synchronous Add/Drop Multiplexer, è realizzato dalla società Alcatel, esso è basato su standard SDH (Synchronous Digital Hierarchy defined in

[1] Per maggiori informazioni sul progetto del sistema di trasmissione dati vd allegato : trasmissione NEMO.ppt

ITU---T Recommendation G.707). Questo standard attualmente è in uso nel settore delle telecomunicazioni e permette un trasferimento bidirezionale di dati ad alta velocità.

L'apparato contiene 16 moduli STM-1 in grado di accettare i dati provenienti da ogni singolo

Figura VI_31: Modulo 1660 SM Synchronous Add/Drop Multiplexer

piano e raggrupparli in una unità centrale di raccolta denominata STM-16 che invierà i dati, (2.5 Gbps), in fibra ottica su una lunghezza d'onda ben definita.

L'apparato è dotato di una ridondanza in caso di guasti che commuterà i dati in trasmissione su un secondo modulo STM-16, la cui uscita, sempre in fibra ottica, lavorerà su una differente lunghezza d'onda.

La raccolta dei dati provenienti dalle 8 stringhe che compongono una delle 8 righe del reticolo del telescopio verrà realizzata internamente alla rispettiva junction box, in essa sarà alloggiato un sistema denominato 1686 WM, wavelength-multiplexing, realizzato dalla società Alcatel, system compliant with G.692 ITU-T standards.

Figura VI_31: Modulo 1686 WM

Questo sistema, basato sul multiplexing di lunghezze d'onda è composto da 16 moduli d'ingresso che accetteranno i segnali provenienti dalle 8 stringhe della riga inoltre è prevista anche in questo caso un ridondanza che tramite opportuna connessione, in caso di guasto, accetterà i dati provenienti da un secondo gruppo di 8 stringhe.

Alla stazione di terra arriveranno pertanto 8 linee d'uscita da 20 Gbps, che saranno connesse a 8 1686 WM che a sua volta saranno indirizzate verso 64 1660 SM, da cui tramite 1024 moduli S-1.1 saranno estratti i 4096 canali, in pratica nella stazione di terra verrà realizzato un sistema speculare a quello presente ad alta profondità.

Oltre i segnali fisici il sistema prevede la connessione di tutti segnali di monitor e controllo che saranno inseriti nella trama di trasmissione.

Il sistema inoltre in quanto bidirezionale permette di trasferire, da terra verso il fondo marino, i segnali di controllo per la sua gestione.

Nella stazione di terra saranno alloggiati due unità NMS (1x1353SH + 1x1354RM) basati su server HP che effettueranno, tramite software, l'intera gestione del sistema permettendone la completa configurazione e in caso di anomalie oltre a rivelarne le cause la commutazione sui moduli ridondanti.

La composizione globale del sistema è la seguente:

Under Sea:

- 64x1660SM (each equipped with 16xSTM-1 and 2xSTM-16)
- 8x1686WM (16 l each)
- 1024 Optical S-1.1 modules.

Landing Station:

- 64x1660SM (each equipped with 16xSTM-1 and 2xSTM-16)
- 8x1686WM (16 l each)
- 1024 Optical S-1.1 modules.
- NMS (1x1353SH + 1x1354RM) based on HP server.

Rumore di fondo

Vi sono due principali cause di rumore di fondo che disturbano ed incidono sulla misura. La prima è dovuta alla presenza di potassio radioattivo nel sale disciolto nel mare. Esso, disintegrandosi spontaneamente, produce luce visibile per i moduli ottici. Di fatto, la maggior parte dei segnali che arrivano dai moduli ottici è dovuta al potassio radioattivo. Un'altra causa di rumore è dovuta all'effetto dei raggi cosmici che lo schermo di 3000 m di acqua non è riuscito ad eliminare. Entrambi questi fattori incidono sulla capacità di ricostruire le tracce dei

neutrini ma soprattutto il primo, data l'elevata frequenza dei suoi segnali, grava sulle bande di comunicazione.

Nell'OM i PMT forniscono segnali la cui banda necessaria a descrivere fedelmente ogni evento è circa 100 MHz e con una conversione logaritmica (a precisione relativa costante) ad 8 bit si coglie ogni aspetto del singolo impulso Quindi e` necessario campionare a 200 MHz ottenendo un rate di circa 2 Gb/s/OM, che da luogo ad un flusso complessivo di 16 Tb/s. Allo stato attuale della tecnologia la soluzione più ragionevole consiste nello spedire i segnali dei singoli OM soltanto quando sono presenti, sia che facciano parte del fondo del potassio che di segnali utili, in maniera da abbattere la larghezza di banda richiesta. Nel sito di Capo Passero il rate di fondo dovuto alla disintegrazione spontanea del ^{40}K ed alla bioluminescenza persistente è stato calcolato in circa r = 100 Keventi/s per PM da 13". Poiché la durata media di ogni impulso è di circa 50 ns, per descriverlo bastano dieci campionature e dunque 80 bit. Se si decide di trasmettere i campioni ogni volta che è effettivamente presente un evento, allora necessiteranno circa 80 x 100 x 10^3 =8 Mb/s/OM. Poiché il numero di canali dell'intero apparato è 7168, il rate totale sarebbe di circa 64 Gb/s, un numero ragionevole per le odierne tecnologie. Con poche fibre si potrebbero così trasmettere dati da tutto l'apparato. Questa circostanza e` molto favorevole poiché consente anche una grande flessibilità progettuale.

Si sono studiati diversi tipi di trigger locali. A meno di imporre trigger molto stringenti, il rate da acquisire risulta così grande rispetto al caso in cui non si fa trigger che non ne vale assolutamente la pena. Per questo motivo si preferisce acquisire tutto quello che supera una prefissata soglia che corrisponde, all'incirca, al singolo fotoelettrone su un OM. Ovviamente la soluzione proposta e cioè soltanto con trigger di livello zero non riduce la quantità totale di elettronica da realizzare, ma la sposta di luogo. Invece che fare selezioni sott'acqua la si fanno a terra e questo in termini di affidabilità e di costo è di estremo interesse.

Bisogna comunque considerare che la tecnologia per la trasmissione di ingenti flussi di dati è in continuo sviluppo. Basti pensare che ad oggi diverse linee di comunicazione transoceaniche terra-terra fanno già uso del sistema DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), che permette di allocare su una singola fibra sino a 80 canali da 2.5 Gb/s per distanze di diverse centinaia di chilometri. L'utilizzo di siffatti sistemi aprirebbe la strada alla trasmissione dei dati integrali campionati a 200 MHz, senza soglia di preselezione di livello zero sui moduli ottici; ciò fornirebbe la massima flessibilità al sistema di trigger che opererebbe completamente a terra. Al momento la limitazione del sistema WDM risiede nella necessità di avere sia il trasmettitore che il ricevitore a terra, poichè ogni canale da 2.5 Gb/s è gestito da un laser di opportuna lunghezza d'onda. L'elevato numero di laser occorrenti, unitamente alla modulistica opto-elettronica per la miscelazione dei diversi canali, rende al momento problematica l'installazione sottomarina; si prevede comunque che nel prossimo futuro nuovi sviluppi possano modificare questo panorama in maniera significativa. Citiamo a titolo di esempio l'imminente avvento dei VCSEL (Vertical Cavity Surface Emission Laser) accoppiati tramite microlenti.

Potenza per i moduli ottici

Gli apparati per la gestione dei dati e dei controlli esigono, negli esperimenti citati, 10 – 40 W di potenza media dissipata per canale. Attualmente, nell'esperimento NEMO, la dissipazione prevista è inferiore a 10 W. L'obiettivo cui si deve necessariamente tendere per la realizzazione del Km^3 è di non superare, in media più di 4 W per canale.

Facendo delle ragionevoli ipotesi sulla dissipazione di potenza nei contenitori si può prevedere 100W ciascuno per i 128 TJB e 2 KW per gli 8 SJB: si arriva a 13 kW. A meno di riuscire a contenere i consumi nei moduli ottici, a potenza da fornire all'intero telescopio sarebbe largamente dominata dalle necessità del singolo canale a causa della sua molteplicità. La trasmissione dagli OM a i TJB si realizza a bassa potenza, così come l'elettronica di front-end e l'alimentazione dei PMT. Ogni fotomoltiplicatore esige circa 100 mW per la sua alimentazione più nel caso più` pessimistico, 500 mW per l'elettronica che comprende il front-end, la codifica e la trasmissione dei dati. A questa potenza va aggiunto quella per i sensori di piano, che e ` circa 3 W, più la potenza per l'elettronica di "Slow Control" uguale circa a 600 mW. In totale si ha 0.1+0.5+(3.4+0.6)/8 = 1.1 W che sull'intero apparato porta ad un consumo di 1.1 x 7168 8 KW. A questa cifra va aggiunta la potenza persa negli alimentatori (~15%) più una potenza di riserva per altri possibili esperimenti. Una potenza totale di 30 KW sembra del tutto ragionevole. Naturalmente tale potenza è possibile soltanto se si riesce a realizzare elettronica di precisione ad alta velocità a bassa potenza con un progetto ad hoc. Nonostante la capillare disseminazione di questa potenza sino ad ogni singolo fototubo, la sua trasmissione è praticamente punto punto in quanto i primi 100 Km di trasmissione avvengono su singolo cavo e solo in fondo, per gli ultimi chilometri, subisce la suddivisione definitiva.