

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA - SCIENZE E INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA E SCIENZE INFORMATICHE

PROGETTO KM3NET: SISTEMI  
ELETTRONICI, NETWORK E MODELLO  
COMPUTAZIONALE  
DELL'INFRASTRUTTURA

Tesi di Laurea in  
ELETTRONICA PER L'INFORMATICA

*Relatore:*  
Dott. Giuseppe Levi

*Presentata da:*  
Ismam Abu

*Correlatore:*  
Dott. Daniele Vivolo

---

III Sessione  
Anno Accademico 2019 - 2020



# PAROLE CHIAVE

KM3NeT  
Photomultiplier  
Central Logic Board  
Digital Optical Module  
Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss



*Dedico il presente lavoro ai miei nonni,  
primo tra tutti Harunor Rashad.  
Egli mi ha incoraggiato sin dall'inizio dei miei studi,  
ma non ha potuto vederli compiuti.  
Spero possa sorridere in questo momento, guardando suo nipote  
compiere un altro passo per divenire uomo.*



# Sommario

KM3NeT è una struttura di ricerca Europea, in costruzione sul fondo del Mar Mediterraneo, che ospiterà i due futuri telescopi per l'osservazione di neutrini: ARCA e ORCA. Il telescopio ARCA (*Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss*) è dedicato alla rivelazione di neutrini ad alta energia di origine astrofisica; è in fase di installazione in un sito situato al largo della costa della Sicilia, in Italia, a una profondità approssimativa di 3500 m. Il telescopio ORCA (*Oscillation Research with Cosmics in the Abyss*), invece, si trova a una profondità di circa 2400 m al largo di Tolone, in Francia; sarà ottimizzato per la rilevazione di neutrini a bassa energia per consentire lo studio delle proprietà fondamentali dei neutrini.

La sede amministrativa di KM3NeT si trova nei Paesi Bassi, i suoi repository di dati e centri di elaborazione dati in Francia e in Italia, in figura 1 vengono identificati i siti. I dati vengono continuamente trasmessi tramite Internet pubblico al repository di dati e ai centri di calcolo a Lione, Bologna e nel sud Italia. La sede amministrativa dell'infrastruttura di ricerca KM3NeT si trova ad Amsterdam, Paesi Bassi. ARCA e ORCA condividono le stesse tecnologie di rivelazione. L'effetto fisico su cui è basato il rilevamento è la radiazione di Cherenkov, questa è prodotta da particelle cariche indotte dai neutrini viene rilevata da una serie di moduli ottici nel volume d'acqua del telescopio (Questo volume d'acqua è di 1 km cubo). Il telescopio sottomarino cercherà sorgenti galattiche ed extra-galattiche di neutrini, integrando IceCube nel suo campo visivo. Il rivelatore avrà una struttura modulare e si compone di sei elementi costitutivi, ciascuno dei quali comprende circa cento unità di rilevamento (DU). Ogni DU sarà dotata di 18 moduli ottici digitali multi-PMT.

È iniziata la prima fase di costruzione e sono in preparazione le infrastrutture costiere e d'alto mare che ospitano il futuro rivelatore KM3NeT in Francia, vicino a Tolone e in Italia, vicino a Capo Passero, in Sicilia. All'interno della tesi verranno presentate e discusse le soluzioni tecnologiche per KM3NeT e le prestazioni attese dal rivelatore. La complessità e il volume dei set di dati generati rappresentano una sfida per l'analisi e l'archiviazione dei dati stessi e richiedono notevoli risorse di elaborazione. Verranno quindi presentate il modello creato per ottimizzare la gestione dei dati e verrà dato uno sguardo generale alla gestione della qualità.

La tesi è articolata in 6 capitoli. Nel primo capitolo viene fornita un'introduzione ge-

nerale dei concetti di cui si andrà a parlare nei successivi capitoli, verrà chiarito che genere di esperimento si sta cercando di realizzare e gli obiettivi che ci si è posti. Nel secondo capitolo si parla della componentistica hardware e dei sistemi elettronici del telescopio, principalmente si parlerà delle schede elettroniche che vi sono alla base e di come comunicano tra di loro e tra i sensori che sono stati utilizzati. Nel terzo capitolo si spiega come funziona il dispiegamento della struttura sottomarina e di come vengono acquisiti e spostati la grande mole di dati. Nel quarto capitolo si parla nello specifico del sistema software che è stato adottato. Nel quinto capitolo si parlerà del sistema QA/QC adottato per il progetto. Infine nell'ultimo capitolo verranno espresse le conclusioni che si sono tratte dalle osservazioni effettuate fino ad ora dal telescopio.

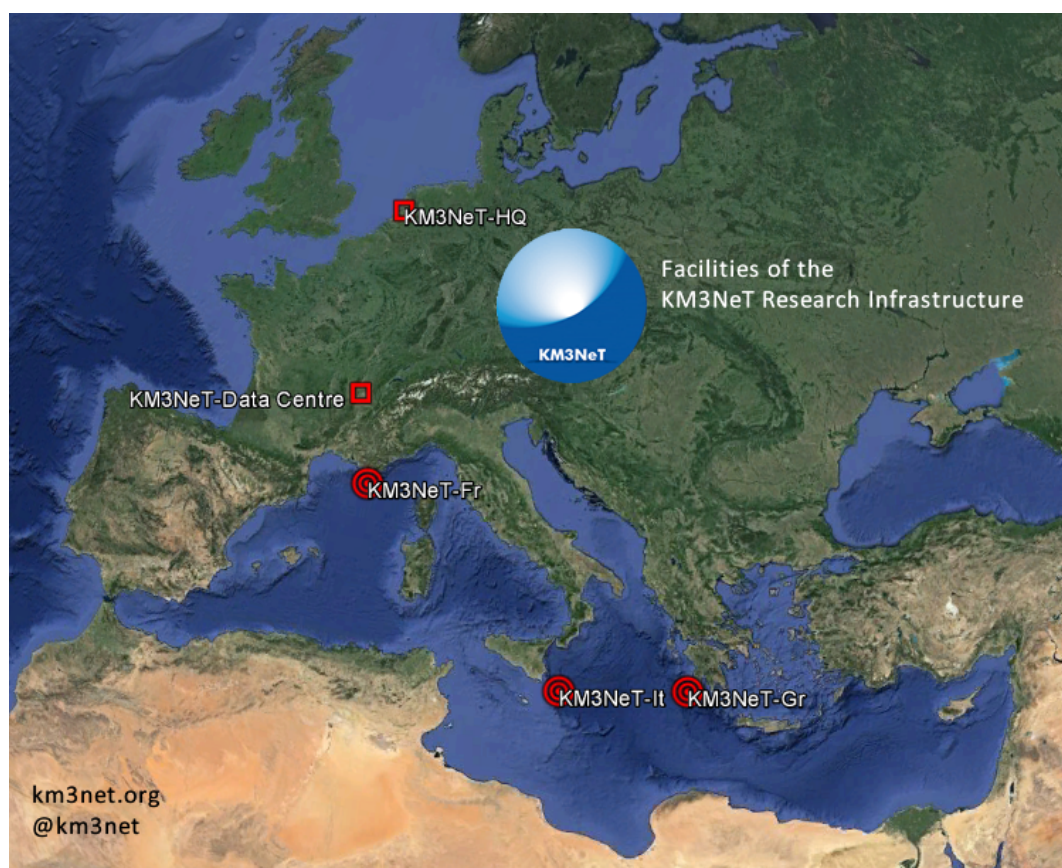


Figura 1: Luogo dove si trovano i siti del progetto, KM3NeT-Fr, off-shore Toulon, KM3NeT-It, off-shore Portopalo di Capo Passero e KM3NeT-Gr, off-shore Pylos.





# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>16</b>
1.1	L'esperimento KM3NeT . . . . .	16
1.2	Cos'è un neutrino . . . . .	16
1.3	Radiazione Cherenkov . . . . .	17
1.4	Obiettivi . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Hardware e sistemi elettronici</b>	<b>20</b>
2.1	Aspetto hardware generale . . . . .	20
2.2	Elementi del DOM . . . . .	21
2.3	Central Logic Board CLB . . . . .	22
2.3.1	Central Logic Board Software . . . . .	23
2.3.2	Central Logic Board Hardware . . . . .	24
2.3.3	Time to Digital Converter . . . . .	25
2.3.4	Microcontrollore . . . . .	27
2.3.5	Macchina a stati . . . . .	28
2.4	Photomultiplier Base PMT . . . . .	29
2.5	Power Board PB . . . . .	30
2.5.1	Avviamento del sistema . . . . .	31
2.6	Scheda della raccolta del segnale . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Rilevamenti e struttura del network</b>	<b>38</b>
3.1	Integrazione del DOM . . . . .	39
3.2	Distribuzione e installazione . . . . .	39
3.3	Network sottomarino . . . . .	41
3.4	Controllo rilevatori e acquisizione dei dati . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Gestione dei dati</b>	<b>49</b>
4.1	Componenti Software . . . . .	50
4.2	Identificazione e autenticazione - LAP . . . . .	51
4.2.1	Accesso a servizi . . . . .	52
4.3	Esecuzione dei Controlli . . . . .	52

---

4.4	Interazioni con il database - DBI . . . . .	54
4.5	Gestione dei Rilevatori - DM . . . . .	56
4.6	Gestione TriDAS - TM . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Quality Assurance e Quality Control</b>	<b>65</b>
5.1	Sistema di gestione del QA . . . . .	66
5.1.1	Elementi per l'integrazione nel sistema di gestione della qualità .	66
5.2	Piano qualità . . . . .	67
5.2.1	Sistema di gestione del documento . . . . .	67
5.2.2	Processi . . . . .	67
5.2.3	Design e produzione . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>71</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>73</b>

# Elenco delle figure

1	Luogo dove si trovano i siti del progetto, KM3NeT-Fr, off-shore Toulon, KM3NeT-It, off-shore Portopalo di Capo Passero e KM3NeT-Gr, off-shore Pylos. . . . .	8
2.1	Esempio di un DOM reale. . . . .	22
2.2	Esempio di una DU. . . . .	23
2.3	Struttura sottomarina del telescopio ARCA. . . . .	24
2.4	Rappresentazione bidimensionale e tridimensionale di un DOM. . . . .	25
2.5	Diagramma a blocchi delle schede elettroniche del DOM, alimentato da 12 V genera tutti i voltaggi richiesti dalle altre componenti. . . . .	26
2.6	Rappresentazione delle connessioni di un singolo DOM. . . . .	27
2.7	Diagramma a blocchi del firmware del FPGA del CLB. . . . .	28
2.8	Grandezza di un CLB rapportato alla grandezza di una scheda di memoria. . . . .	29
2.9	Immagine del processore del CLB. . . . .	30
2.10	Distribuzione ToT in un DOM di KM3NeT DU. Tutti i canali sono stati calibrati per rendere affini tutti i dati provenienti dai differenti PMT. . . . .	31
2.11	Schema dei componenti della scheda del PMT. . . . .	33
2.12	Fotomoltiplicatore collegato insieme alla sua base. . . . .	34
2.13	Sequenza di avvio. L'immagine mostra il grafico dato dai dati di un oscilloscopio. . . . .	35
2.14	Scheda di alimentazione del DOM rapportata con una scheda SD per avere un'idea della grandezza. . . . .	36
3.1	Procedura di integrazione per fasi. . . . .	40
3.2	Laboratorio dove vengono assemblati e tenuti i DOM. . . . .	41
3.3	Laboratorio dove viene creato il lanciatore. . . . .	42
3.4	Veicolo di lancio caricato con un'unità di rilevamento del tipo ARCA. . . . .	43
3.5	Nel laboratorio, il lanciatore insieme all'unità di rilevamento con funi, cavo dorsale e 18 moduli ottici sono avvolti attorno al telaio del lanciatore. . . . .	44
3.6	Varo del veicolo nel porto di Malta. . . . .	44
3.7	Veicolo di lancio con unità di rilevamento avvolta attorno ad esso in attesa della nave. . . . .	45

3.8	Inizio del dispiegamento del lanciatore. . . . .	46
3.9	Recupero del frame vuoto del lanciatore una volta terminato il proprio compito. . . . .	47
4.1	Componenti della CU e le loro relative relazioni, le frecce nere e bianche rappresentano i flussi di informazioni relative al controllo e la monitoraggio, mentre quelle rosse rappresentano flussi di informazioni relative all'autenticazione e/o all'autorizzazione. . . . .	51
4.2	Logica e protocolli di rete. Nel punto (a) si ha il flusso di dati del rilevatore, nel (b) il flusso dei dati di Runsetup ed infine nel (c) vi è il flusso dei dati di calibrazione. . . . .	57
4.3	Macchina a stati per l'acquisizione dei dati. Gli stati sono boxed, mentre gli eventi sono abbinati alle frecce tratteggiate che indicano le relative transizioni di stato. . . . .	60
4.4	Sketch della struttura del thread del DM. Il pool di thread HTTP non viene visualizzato. Il thread di controllo invia messaggi a tutti i controller CLB, che non dispongono di thread propri. I thread di elaborazione (due nello sketch) alimentano i controller CLB condividendo il carico di lavoro. I thread SRP (tre nello sktech) leggono i messaggi trovati in due buffer di socket UDP e li convertono in eventi per i controller CLB. Le frecce grandi mostrano il flusso di comunicazione verso i controller CLB. Le piccole frecce mostrano la condivisione del carico di lavoro del controllo CLB tra i thread di elaborazione. . . . .	61
4.5	Interfaccia utente grafica del DM per una DU e un DOM. Sono visualizzati i dati di monitoraggio in <i>real time</i> ottenuti tramite il protocollo HTTP. .	62
4.6	Struttura del TriDAS Manager . . . . .	63
5.1	Diagramma dei processi. . . . .	68

# Elenco delle tabelle

2.1	Tabella delle specifiche del PROMiS. . . . .	30
2.2	Tabella delle specifiche del CoCo. . . . .	32



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 L'esperimento KM3NeT

L'esperimento consiste nell'osservare ed identificare le sorgenti astrofisiche dei raggi cosmici e dell'antimateria tramite un telescopio per neutrini cosmici di alta energia. In generale, tutto questo permetterà di studiare i fenomeni "esplosivi" dell'universo. Il telescopio sarà costituito da migliaia di DOM; questi formeranno un'antenna sottomarina in grado di identificare la scia luminosa prodotta in mare dalle rare interazioni dei neutrini di origine astrofisica con l'acqua. È un progetto che coinvolge l'INFN, numerose Università Italiane e Istituti di ricerca di 18 Nazioni su 4 Continenti, riuniti nel progetto KM3NeT.

### 1.2 Cos'è un neutrino

I neutrini sono particelle indivisibili e prive di carica elettrica e hanno, inoltre, una massa estremamente piccola. Questa massa dovrebbe essere da 100 mila a 1 milione di volte più piccola di quella di un elettrone.

Al momento si conoscono 3 famiglie (o sapori) di neutrini, detti: neutrini elettronici, neutrini muonici e neutrini tau; ogni tipo di neutrino è associato ad una corrispondente particella leptonica: elettrone, muone e tau. Le tre tipologie di neutrino sono soggette ad un fenomeno denominato "oscillazione di sapore", per cui, in certe condizioni, i neutrini si possono trasformare l'uno nell'altro: l'esistenza di questo fenomeno implica il fatto che i neutrini devono avere una massa, seppur piccolissima, diversa tra loro. Le sorgenti di neutrini sono molteplici; fino ad ora si sono studiati quelli terrestri, atmosferici, solari, fossili e quelli generati da esplosioni di supernovae.

I neutrini possono essere prodotti artificialmente dall'uomo; ad esempio alcuni sorgenti artificiali sono:



- neutrini da acceleratori di particelle: questi sono in grado di produrre e accelerare particelle cariche. Facendo collidere i protoni accelerati da un acceleratore con uno strato compatto di materiale si riescono a produrre particelle che decadendo originano neutrini e/o antineutrini di diversi sapori;
- neutrini da reattori nucleari: durante le reazioni di fissione nucleare, all'interno dei reattori vengono prodotti antineutrini elettronici; ogni reattore nucleare è una sorgente di antineutrini elettronici.

L'universo abbonda di neutrini, ma nonostante ciò è raro che interferiscano con la materia. Inoltre, sono particelle che non sono soggette né alla forza elettromagnetica, né a quella nucleare forte ma solamente alla forza nucleare debole (e anche a quella gravitazionale). Questa forza è caratterizzata da un raggio d'azione molto limitato e proprio per questo motivo le probabilità di interazione tra due particelle sono molto basse.

Per questo motivo, per rivelare un neutrino è necessario costruire telescopi che occupano grandi volumi. Da qui il progetto KM3NeT, che prevede l'installazione sul fondale marino di un rivelatore dell'ordine del chilometro cubo. L'acqua, nella quale sarà immerso il telescopio, ha il duplice scopo di schermare il rivelatore dalla radiazione cosmica che viene a costituire rumore di fondo e quello di consentire la rivelazione dei neutrini attraverso l'osservazione del cosiddetto "effetto Cherenkov". Quando un neutrino interagisce con l'acqua del mare, infatti, produce dei muoni che, viaggiando nell'acqua a una velocità superiore a quella della luce, producono una debole scia luminosa, la "radiazione di Cherenkov", appunto. Il rivelatore, grazie ai suoi fotomoltiplicatori, sarà in grado di raccogliere questo debole lampo e di trasmetterlo ai laboratori di superficie per l'analisi dei dati.

### 1.3 Radiazione Cherenkov

L'effetto fisico su cui si basa l'esperimento è la radiazione di Cherenkov. La radiazione Cherenkov è la luce prodotta da particelle cariche quando passano attraverso un mezzo otticamente trasparente a velocità superiori alla velocità della luce (all'interno quel mezzo). Dispositivi sensibili a questa particolare forma di radiazione, chiamati rivelatori Cherenkov, sono stati ampiamente utilizzati per rilevare la presenza di particelle subatomiche cariche che si muovono ad alta velocità. Poiché hanno una massa infinitamente piccola, la forza gravitazionale causata dai neutrini si è dimostrata troppo debole per essere rilevata; il tutto lasciando le interazioni deboli come metodo principale per la rilevazione:

- in un'interazione di corrente neutra, il neutrino entra, e successivamente, lascia il rivelatore dopo aver trasferito parte della sua energia e quantità di moto a una particella bersaglio. Se la particella bersaglio è carica e sufficientemente leggera (ad esempio un elettrone), può essere accelerata a una velocità relativistica e

di conseguenza può emettere la radiazione Cherenkov, che può essere osservata direttamente. Tutte e tre le tipologie di neutrino (elettronico, muonico e tauonico) possono partecipare indipendentemente dall'energia del neutrino. Tuttavia, nessuna informazione sul tipo del neutrino può essere rilevato;

- in un'interazione di corrente carica, un neutrino ad alta energia si trasforma nel suo partner leptonic (elettrone, muone o tau). Tuttavia, se il neutrino non ha energia sufficiente per creare la massa del suo partner più pesante, l'interazione della corrente carica non è disponibile per lui. I neutrini del sole e dei reattori nucleari hanno energia sufficiente per creare elettroni. La maggior parte dei fasci di neutrini basati su acceleratori possono anche creare muoni e alcuni possono creare dei tauoni. Un rivelatore in grado di distinguere tra questi leptoni può rivelare la tipologia del neutrino incidente in un'interazione di corrente carica. Poiché l'interazione comporta lo scambio di un bosone carico, anche la particella bersaglio cambia (ad esempio neutrone  $\rightarrow$  protone).

## 1.4 Obiettivi

Nella presente tesi si parlerà nello specifico dei neutrini atmosferici. L'atmosfera terrestre è bombardata continuamente dai cosiddetti raggi cosmici, particelle cariche ad alta energia che si muovono nello spazio. Quando questi raggi cosmici penetrano nell'atmosfera, collidono con i nuclei degli atomi e innescano delle reazioni durante le quali vengono prodotte molte particelle secondarie, che decadendo originano neutrini e antineutrini.

Le aspettative sullo studio dei neutrini sono molteplici, in quanto con lo studio del neutrino si affrontano vari campi di ricerca. In primo luogo, sono utili per lo studio dell'universo, un'analisi sempre più "a molti messaggeri": mentre per molti secoli si poteva indagare il cosmo sfruttando solo la luminosità delle stelle (quindi, solo un determinato spettro di frequenze delle onde elettromagnetiche), si è poi imparato ad usare anche altre frequenze, come gli infrarossi, i raggi x e i raggi gamma; a questi si è aggiunta da qualche tempo anche l'analisi attraverso i neutrini e, recentemente, anche le onde gravitazionali. Si contano, dunque, molti modi diversi e complementari per leggere l'universo. In particolare, sarà interessante studiare quei neutrini più numerosi e più antichi (che noi chiamiamo relici) che vengono da decimillesimi di secondo dopo il Big Bang; questi, praticamente permetterebbero di "osservare" l'universo al momento della sua nascita.

Un altro aspetto riguarda le caratteristiche intrinseche dei neutrini, che hanno una loro massa, anche se non ne conosce ancora il valore; non si sa nemmeno come questa massa venga acquistata.

I modelli teorici utilizzati fino ad ora nella fisica delle particelle, in particolare il cosiddetto Modello Standard, non riescono a spiegarlo; quindi, ci si trova davanti alla necessità di ampliare e rivedere i propri modelli. Anche questa sarà una sfida importante.



# Capitolo 2

## Hardware e sistemi elettronici

### 2.1 Aspetto hardware generale

Il telescopio è composto da migliaia di moduli; ciascuno di essi è una sfera di vetro di 17 pollici di diametro e resistente all'alta pressione, in figura 2.3 possiamo notare come sono strutturati e disposti tutti questi DOM all'interno del telescopio ARCA. Questa sfera contiene 31 tubi Fotomoltiplicatori (PMT) grandi 3 pollici l'uno, la strumentazione per la calibrazione e il posizionamento e tutte le schede elettroniche associate. I moduli sono denominati *Digital Optical Module* (DOM), in figura 2.1 troviamo un DOM reale. Vi sono diciotto DOM, distribuiti uniformemente lungo una struttura sottile verticale; questa struttura è denominata stringa di rilevamento (*Detection Unit*, DU), in figura 2.2 possiamo vedere la rappresentazione di una DU. I DOM all'interno della DU sono tenuti in posizione per mezzo di due corde sottili. Il DU è ancorato sul fondo del mare e mantenuto in posizione quasi verticale da una boa sommersa alla sua sommità. Un cavo *backbone* elettro-ottico, con *breakout* in ogni DOM, corre lungo l'intera lunghezza della DU fornendo il collegamento per l'alimentazione e la trasmissione dei dati. In ogni DOM, i 31 PMT sono organizzate in 5 anelli da 6 PMT, più uno singolo in basso rivolto verso il basso. In figura 2.4 troviamo una rappresentazione dell'interno di un DOM, dove i PMT sono posizionati da una struttura di supporto. L'emisfero inferiore e quello superiore del modulo contengono rispettivamente 19 e 12 PMT. Nell'emisfero superiore una struttura in alluminio fornisce supporto alle 4 schede elettroniche del DOM. La superficie superiore è incollata alla sfera di vetro per fornire la dissipazione del calore grazie all'acqua di mare, mentre la scheda di alimentazione, che fornisce tutte le tensioni CC necessarie all'elettronica, è fissata al tappo a fungo. Questa scheda verrà descritta più nello specifico nei capitoli seguenti. La *Central Logic Board* (CLB), che contiene un *Field Programmable Gate Array* (FPGA), è collegata direttamente alla scheda di alimentazione. Nell'FPGA sono incorporati i core di proprietà intellettuale (IP) che catturano i segnali generati da PMT. Nell'FPGA è incorporata anche un'implementazione del *White Rabbit* (WR) 15,

un protocollo di temporizzazione basato su Ethernet completamente deterministico che fornisce sia la trasmissione dei dati che la temporizzazione accurata. La tecnologia WR consente una sincronizzazione dei *clock* di tutti i CLB nel telescopio con una precisione al nanosecondo. Il CLB verrà spiegato nel dettaglio nelle sezioni successive. La scheda base PMT genera e regola l'alimentazione ad alta tensione (HV) del PMT stesso e converte i segnali analogici generati da esso in *Low Voltage Differential Signaling* (LVDS). Due *Signal Collection Board* (SCB), una per ciascun emisfero DOM, collegano il CLB con le PMT consentendo il trasferimento del segnale di comando e dati.

La luce rivelata da un PMT viene convertita in un impulso elettrico. Quando questo impulso elettrico supera una soglia predeterminata, la scheda base PMT imposta la sua uscita LVDS; questa uscita viene ripristinata quando l'impulso elettrico scende al di sotto della soglia. Il primo superamento della soglia del *Time over Threshold* (ToT) sarà misurato dai *Time to Digital Converter* (TDC) implementati nel CLB. Il ToT fornisce una stima dell'ampiezza dell'impulso e della sua carica. La calibrazione del PMT HV fornisce un valore ToT medio di 26,4 ns quando un singolo fotoelettrone colpisce un PMT. Il CLB organizza l'acquisizione dei segnali LVDS in frame, o *timeslices*, di lunghezza fissa nel tempo, tipicamente 100 ms. I dati acquisiti, organizzati in *timeslices*, vengono inviati ad una computer farm onshore tramite una rete ottica integrata nei cavi sottomarini e nelle scatole di derivazione.

L'ancoraggio della DU ospita un modulo base dotato di un ponticello per collegare la DU alla rete del fondo marino. L'elettronica prodotta in serie è operativa in DU distribuite a grandezza naturale con 18 DOM, dimostrando così la sua affidabilità. La figura 2.5 fornisce uno schema a blocchi delle diverse schede elettroniche del DOM e delle loro interconnessioni. Il consumo di energia del DOM verrà approfondito successivamente insieme agli studi di affidabilità eseguiti sulle schede elettroniche DOM. Infine, verrà fornita una anteprima sul sistema elettronico di front-end e di lettura alla luce degli obiettivi di progettazione stabiliti da la collaborazione KM3NeT.

## 2.2 Elementi del DOM

Il DOM [1] è costituito da due semisfere di vetro, all'interno delle quali sono ospitati svariati componenti; tra i più importanti troviamo:

- *Central logic Board* detta CLB
- Scheda base del PMT (*Photomultiplier*)
- *Power Board* detta PB

Una *Detection Unit* (detta DU, stringa) è composta da 18 DOM connessi verticalmente. Un cavo elettro-ottico corre lungo la struttura verticale e porta sia l'alimentazione che la linea di comunicazione. Abbiamo di base 375 V che vengono convertiti in 12 V tramite



Figura 2.1: Esempio di un DOM reale.

una *Break Out Box*. In figura 2.6 notiamo graficamente come è collegato un DOM all'interno della sua DU. Nelle prossime sezioni si parlerà più nello specifico dei 3 punti elencati in precedenza

## 2.3 Central Logic Board CLB

La scheda principale all'interno del DOM è il CLB, di seguito ne verrà spiegato brevemente il funzionamento [2]. Inizialmente le basi del PMT ricevono degli impulsi che vengono convertiti in segnali LVDS. Ogni SCB corrispondente a essi riceve e distribuisce questi segnali al CLB, dove vengono convertiti in dati digitali con risoluzione pari a un nanosecondo grazie al TDC in esecuzione nell'FPGA. I dati, dopo essere stati organizzati e contrassegnati con un *timestamp* dal CLB, vengono trasferiti alla stazione in superficie per ulteriori elaborazioni. La scheda CLB ospita anche una bussola, tre sensori di temperatura e un sensore di umidità. Il CLB deve fornire inoltre una connessione per il *nanobeacon*. Un sensore piezoelettrico è collegato al CLB tramite l'SCB nell'emisfero inferiore della sfera. Il controllo del CLB è ottenuto tramite un apposito software che opera nella logica programmabile dell'FPGA. Il CLB verrà spiegato successivamente a livello hardware e software.

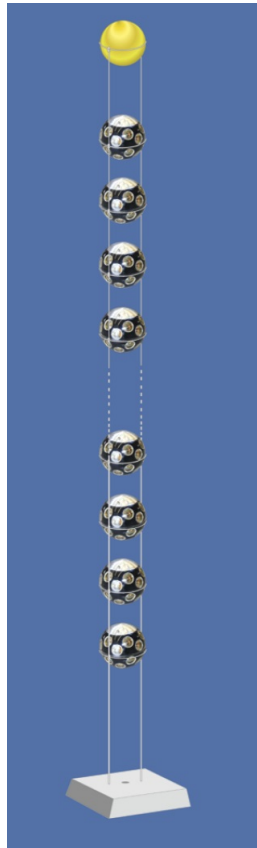


Figura 2.2: Esempio di una DU.

### 2.3.1 Central Logic Board Software

La logica di lettura del DOM viene eseguita nella scheda programmabile dell'FPGA [3]. Uno schema a blocchi della logica di lettura è mostrato in figura 2.7. I suoi blocchi principali sono:

- LM32, che esegue il software di controllo e monitoraggio del PCB;
- *White Rabbit PTP Core* detto WRPC (*Precision Time Protocol* indica il PTP), che implementa il protocollo WR;
- I TDC, che digitalizzano i segnali PMT che arrivano al CLB;
- La macchina a stati finiti e i core IPMux, che raccolgono i dati TDC dai PMT, i dati della *Audio Engineering Society* dal sensore piezoelettrico e i dati di monitoraggio dell'LM32 e li inviano alla stazione in superficie;
- Il *core multiboot*, che consente la riconfigurazione remota del firmware FPGA;

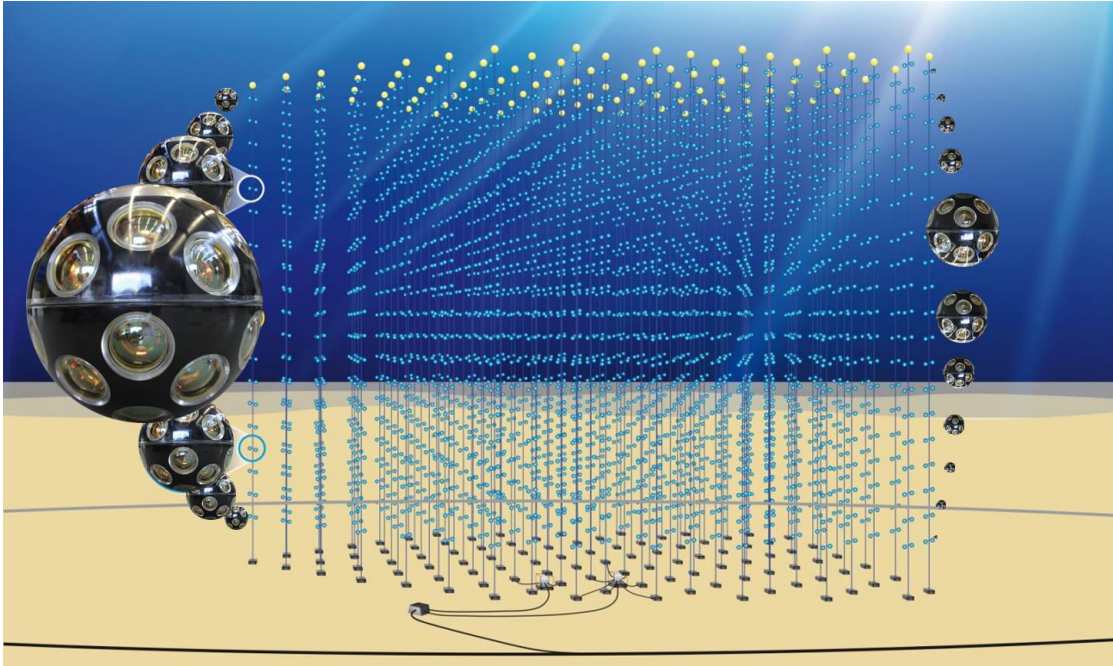


Figura 2.3: Struttura sottomarina del telescopio ARCA.

- I diversi nuclei di controllo per la strumentazione.

### 2.3.2 Central Logic Board Hardware

Il *Printed Circuit Board* (PCB) del CLB comprende ben dodici strati: sei di essi sono dedicati ai segnali, due al layer di alimentazione e i restanti quattro sono a terra. Gli strati di massa racchiudono i layer di potenza, al fine di ridurre le interferenze elettromagnetiche dai layer di alimentazione a quelli di segnale, mantenendo così l'integrità del segnale stesso [4]. Per le stesse ragioni, anche il numero di vie in questi strati è stato ridotto al minimo dove possibile. È stata dedicata particolare cura a come si è svolto l'instradamento dei segnali LVDS generati dalle scheda base PMT. La differenza di lunghezza tra una qualsiasi delle coppie differenziali è stata mantenuta sotto i 100 ps. Inoltre, nel caso dei segnali di clock, questa differenza è stata addirittura ridotta a 20 ps. Il componente di coordinamento centrale del CLB è un *Xilinx Kintex-7 FPGA (XC160 T)*, mostrato in figura 2.9, scelto per il suo consumo di energia estremamente basso. Altri componenti rilevanti sono:

- *Serial Peripheral Interface flash memory* (detta SPI), che memorizza quattro immagini dell'FPGA e dei parametri di configurazione del CLB;
- Oscillatori, che forniscono i segnali di clock appropriati necessari al protocollo WR;



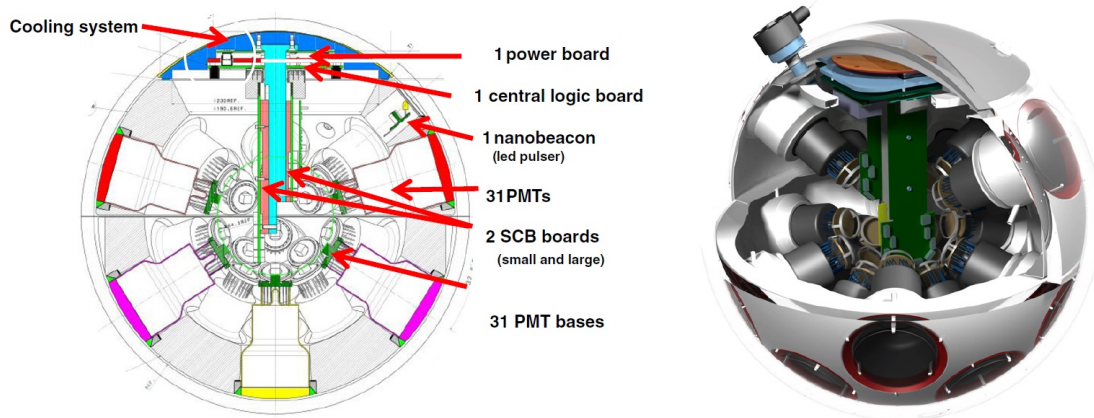


Figura 2.4: Rappresentazione bidimensionale e tridimensionale di un DOM.

- Connettori a pressione, che forniscono una solida connessione meccanica ed elettrica tra il CLB e l'SCB.

La scheda CLB include un oscillatore a cristallo da 25 MHz. Il segnale dell'oscillatore viene prima trasferito da un pin di clock a un buffer nell'FPGA, per poi essere inviato a ventaglio al *Phase Locked Loop* (detto PLL) interno per fornire due clock ad alta frequenza (250 MHz), ma con uno spostamento di fase di  $90^\circ$ , necessario al nucleo del TDC. Il componente principale utilizzato per le comunicazioni con la stazione a terra è il ricetrasmittitore *Small Form-Factor Pluggable* (detto SFP), che intensifica l'elettronica con il sistema ottico. In figura 2.8 è rappresentato un CLB.

### 2.3.3 Time to Digital Converter

I TDC campionano i segnali dalle basi dei PMT e sono implementati nelle FPGA delle CLB con un canale TDC per PMT, per un totale di 31 core (IP). I core misurano sia il tempo di arrivo dell'impulso che la durata dell'impulso (ToT). La distribuzione della lettura dei dati ToT misurata da un DOM è mostrata in figura 2.10. Il core TDC produce 48 bit per evento, dove i primi otto bit più significativi vengono utilizzati per l'identificatore PMT mentre i successivi 32 bit codificano l'evento rispetto all'ora di inizio del *timeslice* e gli ultimi otto bit codificano la durata. Gli eventi vengono, dunque, inviati alla macchina a stati, che organizza anche l'acquisizione del TDC in *timeslices*. Il *clock system* del firmware FPGA è derivato da un hardware al quarzo con frequenza 25 MHz e si trova nel PCB. Questo segnale di clock viene trasferito a un PLL digitale, per generare la frequenza di sistema di 62.5 MHz. Il protocollo *White Rabbit* regola la fase e la frequenza del clock di sistema FPGA sul master clock di riferimento. Infine, il clock di sistema regolato viene distribuito ai PLL interni all'interno dell'FPGA, per fornire due clock ad alta frequenza di 250 MHz con uno sfasamento di  $90^\circ$ . I segnali di ingresso TDC

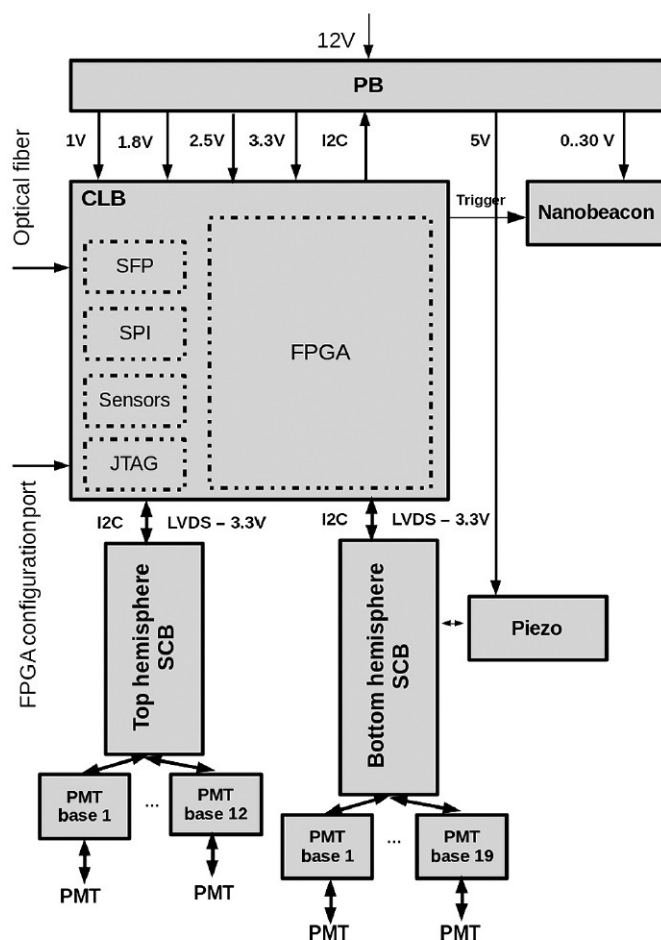


Figura 2.5: Diagramma a blocchi delle schede elettroniche del DOM, alimentato da 12 V genera tutti i voltaggi richiesti dalle altre componenti.

vengono sovracampionati a una velocità di 1 ns utilizzando il fronte di salita e di discesa dei due clock di 250 MHz. Le informazioni del campionamento sono organizzate dai TDC, dove l'ora di arrivo e la lunghezza dell'impulso sono codificate. Come tutti gli altri core IP CLB collegati all'LM32, anche il TDC è controllato dall'LM32 stesso, consentendo di abilitare / disabilitare uno qualsiasi dei 31 canali TDC. I TDC implementano le funzionalità *Multihit* e *High Rate Veto* (detto HRV), che limita il numero totale di hit acquisiti in un intervallo di tempo. Se il numero di eventi in un canale TDC supera una soglia predeterminata, l'acquisizione viene interrotta in quel canale fino all'inizio della fascia temporale successiva. In questo modo è possibile limitare la quantità di dati inviati a terra, prevenendo il blocco dell'acquisizione dei dati. L'opzione *Multihit* permette, invece, di ampliare la portata dei TDC, limitati dalla codifica ToT di otto bit. Se questa opzione è attiva, gli hit con un ToT più lungo di 255 ns vengono codificati



Figura 2.6: Rappresentazione delle connessioni di un singolo DOM.

come due o più eventi consecutivi.

### 2.3.4 Microcontrollore

Il centro per il controllo e monitoraggio del CLB è affidato all'LM32, una CPU dotata di memorie ad accesso casuale e periferiche per la temporizzazione e comunicazione (*Universal Asynchronous Receiver / Transmitter detta UART*), che adotta la SPI e la I<sup>2</sup>C (Inter Integrated Circuit). L'LM32 è stato scelto in quanto utilizza pochissime risorse FPGA rispetto alle altre CPU e ha una *Wishbone bus interface* [5]. Per questo bus esistono molteplici periferiche logiche programmabili, come controller SPI / I2C, co-processor, timer e contatori. Inoltre, l'LM32 viene usata anche nel WRPC, facilitando l'integrazione. La CPU funziona a soli 62.5 MHz e dispone di 125 kB di RAM combinata per programmi e dati [6]. Inoltre, il bus si collega anche agli specifici core logici programmabili di

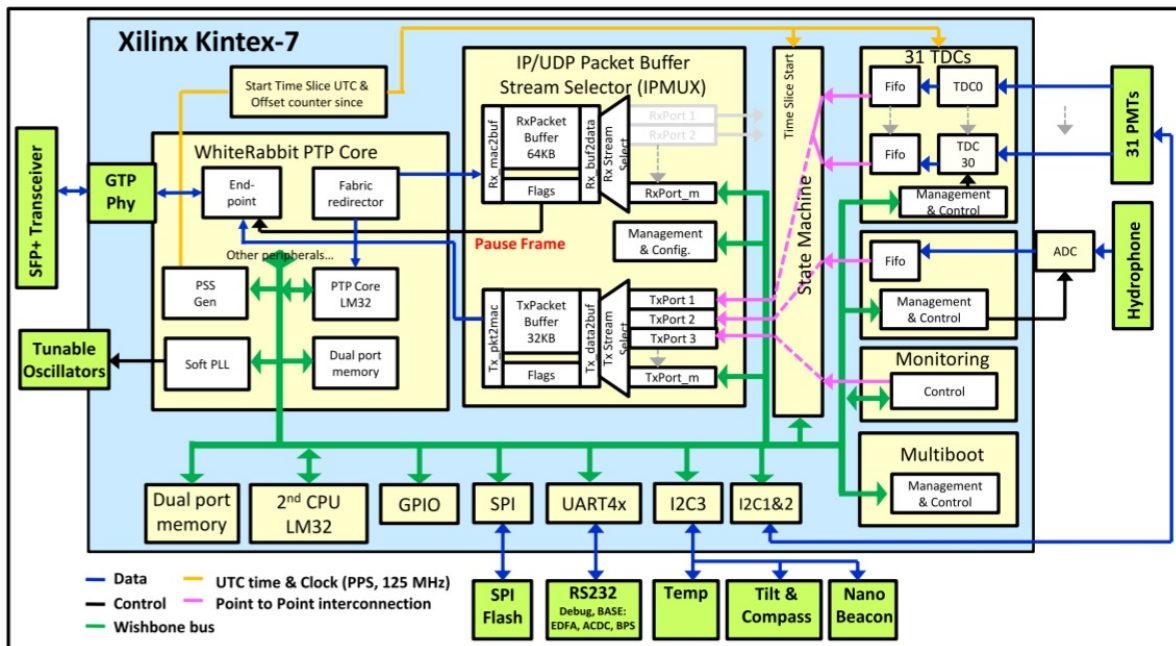


Figura 2.7: Diagramma a blocchi del firmware del FPGA del CLB.

KM3NeT, in modo tale che l'LM32 possa controllare e monitorare le periferiche.

### 2.3.5 Macchina a stati

L'acquisizione dei dati è organizzata in frame consecutivi con un periodo tipicamente di 100 ms, chiamati *timeslices*. Il core della macchina a stati pianifica l'acquisizione dei dati per il CLB. In primo luogo, è responsabile della generazione dell'inizio periodico del segnale *timeslice*. Questo segnale è sincronizzato all'inizio di un secondo UTC e si ripete all'inizio di ogni periodo. Tutti i dati che acquisiscono i core IP sincronizzano la loro acquisizione con questo segnale di *timeslice* di inizio, quindi, tutti i dati acquisiti vengono sezionati e contrassegnati con la data e l'ora. In secondo luogo, la macchina a stati è responsabile della raccolta dei dati acquisiti e dell'unione fra questi e l'ora UTC del segnale di avvio del *timeslice*, chiamato *super time*. Combinando il tempo relativo e il *super time*, l'ora UTC per tutti i dati acquisiti può essere risolta dal sistema di acquisizione (*Data Acquisition System* detto DAQ). Una volta che i dati acquisiti sono pronti, l'ultimo compito della macchina a stati è impacchettare i dati da inviarli attraverso il protocollo UDP (*User Datagram Protocol*). Questi dati vengono suddivisi in frame in modo da adattarsi al carico utile di un pacchetto jumbo UDP. Viene inoltre preparata un'intestazione di frame contenente metadati, come l'identificatore del flusso o il numero di esecuzione.

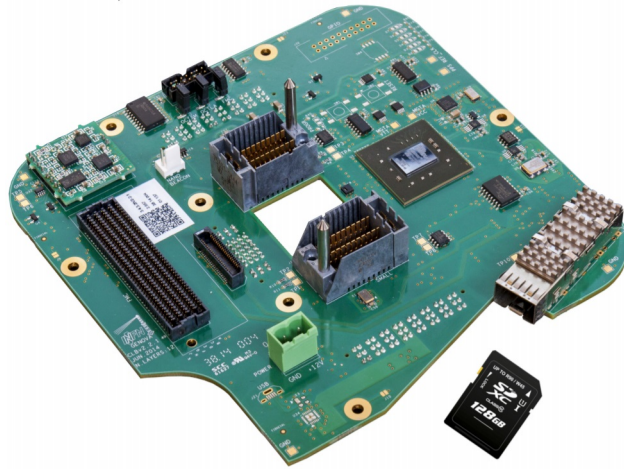


Figura 2.8: Grandezza di un CLB rapportato alla grandezza di una scheda di memoria.

## 2.4 Photomultiplier Base PMT

La scheda base [7] PMT si occupa sia della generazione dell’HV che della digitalizzazione del segnale. Prima di essere digitalizzato, il segnale PMT viene amplificato da un preamplificatore integrato nella base PMT. In figura 2.12 troviamo un singolo PMT collegato alla sua base. Uno dei componenti principali della base PMT è un comparatore, che fornisce un segnale logico alto quando l’uscita del PMT è oltre la soglia impostata tramite I<sup>2</sup>C. La durata del segnale primario (ToT) fornito dalle basi PMT è misurata accuratamente dai TDC del CLB. Oltre al segnale logico, la base PMT emette anche il segnale PMT analogico amplificato, che viene utilizzato solo per il test. Le 31 schede base PMT sono collegate all’SCB tramite PCB flessibile. L’HV, configurabile da remoto tramite I<sup>2</sup>C, viene generato indipendentemente in ciascuna base PMT. Ciò consente di regolare il guadagno dei singoli PMT al fine di equalizzare la risposta dei fotoni PMT incrociati. Il valore HV può essere regolato a distanza, da -800 a -1400 V [8]. La Figura 16 mostra un diagramma della scheda base PMT con i suoi componenti principali. In figura 2.11 è mostrato un diagramma della scheda alla base del PMT con le proprie componenti. Al fine di ridurre lo spazio occupato dalla scheda base del PMT e anche il suo costo e il consumo di energia, sono stati sviluppati due *Application Specific Integrated Circuits* (ASIC). Il primo ASIC è il PROMiS ASIC, con il compito di eseguire la lettura dei segnali PMT e ha due parti differenti, una digitale e una analogica. Il secondo è l’ASIC CoCo, che controlla l’alimentatore *CockroftWalton* HV fornendo un guadagno di 106. Nella tabella 2.1 verranno elencate le caratteristiche principali PROMiS mentre nella tabella 2.2 verranno elencate le caratteristiche dei CoCo.



Figura 2.9: Immagine del processore del CLB.

## 2.5 Power Board PB

La scheda di alimentazione, mostrata nella Figura 2.14, ha l'obiettivo di fornire alimentazione al CLB e all'intero DOM [9]. L'alimentazione di ingresso alla scheda di alimentazione è di 12 V. Sono disponibili sei tensioni regolabili (1 V, 1,8 V, 2,5 V, 3,3 V, 3,3 V PMT e 5 V), generate partendo da 12 V utilizzando convertitori DC / DC. Le uscite 1 V, 1,8 V, 2,5 V e 3,3 V sono utilizzate dal CLB per alimentare l'FPGA. L'uscita PMT a 3,3 V alimenta le 31 schede base PMT e la tensione a 5 V viene utilizzata per alimentare il sensore piezoelettrico acustico. Inoltre, la scheda di alimentazione fornisce

Risoluzione in funzione del tempo	< 2 ns
Separazione temporale a due fasi	< 25 ns
Consumi energetici	3,3 V, 0.35 $\mu$ m CMOS AMS
Adeguamento della soglia di riferimento	8 bits (0,8 V - 2,4 V)
HV <i>feedback control</i>	8 bits (0,8 V - 2,4 V)
<i>Slow-Control Communication</i> e uscite digitali e analogiche	I <sup>2</sup> C, LVDS e rispettivamente un buffer analogico

Tabella 2.1: Tabella delle specifiche del PROMiS.

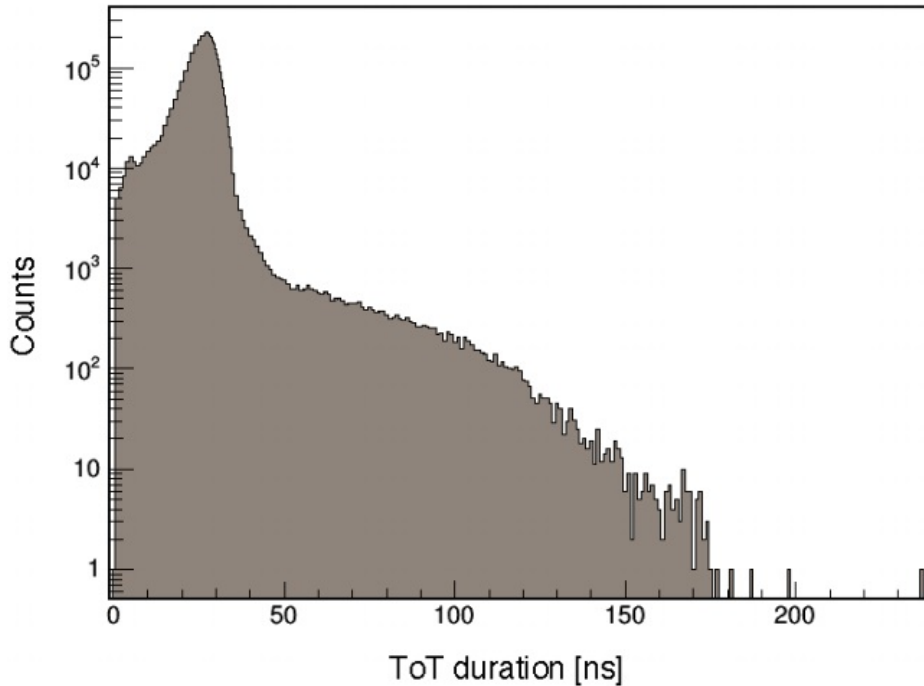


Figura 2.10: Distribuzione ToT in un DOM di KM3NeT DU. Tutti i canali sono stati calibrati per rendere affini tutti i dati provenienti dai differenti PMT.

un'altra uscita, impostabile tramite un convertitore digitale-analogico (DAC, *Digital-to-Analog Converter*) I<sup>2</sup>C, che si traduce in una tensione configurabile compresa tra 0 V e 30 V. Il canale impostabile viene utilizzato dal Nanobeacon. La scheda di alimentazione utilizza convertitori CC / CC ad alta efficienza per ridurre al minimo il consumo di energia nel DOM. Al fine di proteggere l'elettronica sensibile all'interno del DOM dalle interferenze del rumore ad alta frequenza prodotto dai convertitori DC / DC, la scheda di potenza si trova nella parte schermata della struttura. La posizione scelta fornisce anche un migliore raffreddamento della scheda di alimentazione.

### 2.5.1 Avviamento del sistema

Una delle funzioni della scheda di alimentazione è fornire una corretta sequenza di avvio della tensione all'FPGA. A tale scopo, nella *Power Board* è stato implementato un *sequencer* per fornire la sequenza di tensioni necessaria (come mostrato in figura 2.13). La scheda di alimentazione genera due segnali di alimentazione. Il primo indica che l'uscita PMT da 3,3 V è stata avviata con successo (PMT *power-good*); il secondo indica il completamento con successo della sequenza di accensione. L'ultima funzione implementata

Frequenza di output	< 50 kHz (max.)
Larghezza di impulso	< 6,5 $\mu$ s (max.)
Consumo energetico	< 1 mW
Voltaggio e PSU	3,3 V 0,35 $\mu$ m CMOS AMS
Corrente	100 mV su 1,5 $\Omega$
Riferimento amplificatore operativo	1.2 V

Tabella 2.2: Tabella delle specifiche del CoCo.

nella Power Board è un ciclo di isteresi per evitare instabilità all'avvio. I regolatori della Scheda di Potenza sono abilitati solo quando la tensione in ingresso supera gli 11 V, mentre vengono disabilitati quando il valore in ingresso scende sotto i 9,5 V. In questo modo si evitano fluttuazioni nei regolatori della Scheda di Potenza al punto di inizio della tensione in ingresso.

## 2.6 Scheda della raccolta del segnale

I segnali LVDS che sono generati dalla PMT vengono raccolti su una scheda chiamata SCB [10]. La funzione di questa scheda è trasferire i segnali dalla base del PMT ai TDC incorporati nel CLB. L'SCB trasferisce i segnali di comando I<sup>2</sup>C dal CLB alle basi dei PMT, al fine di monitorare e controllare i PMT. Ogni DOM comprende due SCB, uno *large* e uno *small*. L'architettura dell'SCB è composta dalle seguenti componenti:

- Connettore *backplane* al CLB;
- *Xilinx Coolrunner Complex Programmable Logic Device* (CPLD);
- Multiplexer I<sup>2</sup>C;
- Switch per limitare corrente;
- Canali PMT: 19 nel *large* e 12 nello *small*;
- Connettore piezoelettrico (solamente nell'SCB *large*).

Il segnale LVDS, usato tra la base del PMT e il CLB, non è suscettibile al *cross-talk* poiché le due linee di segnale dell'LVDS sono accoppiate elettricamente con un'impedenza corrispondente per tutto il percorso dalla base del PMT al CLB. Il segnale che può essere accoppiato alla linea LVDS verrà accoppiato contemporaneamente ad entrambe le linee di segnale. Per questo motivo, la distorsione diventa modalità comune e non influirà sull'integrità del segnale. Per proteggere i singoli PMT e il CLB da cortocircuiti si utilizza un fusibile IC ripristinabile, che è integrato sull'SCB, per ogni PMT. Per il



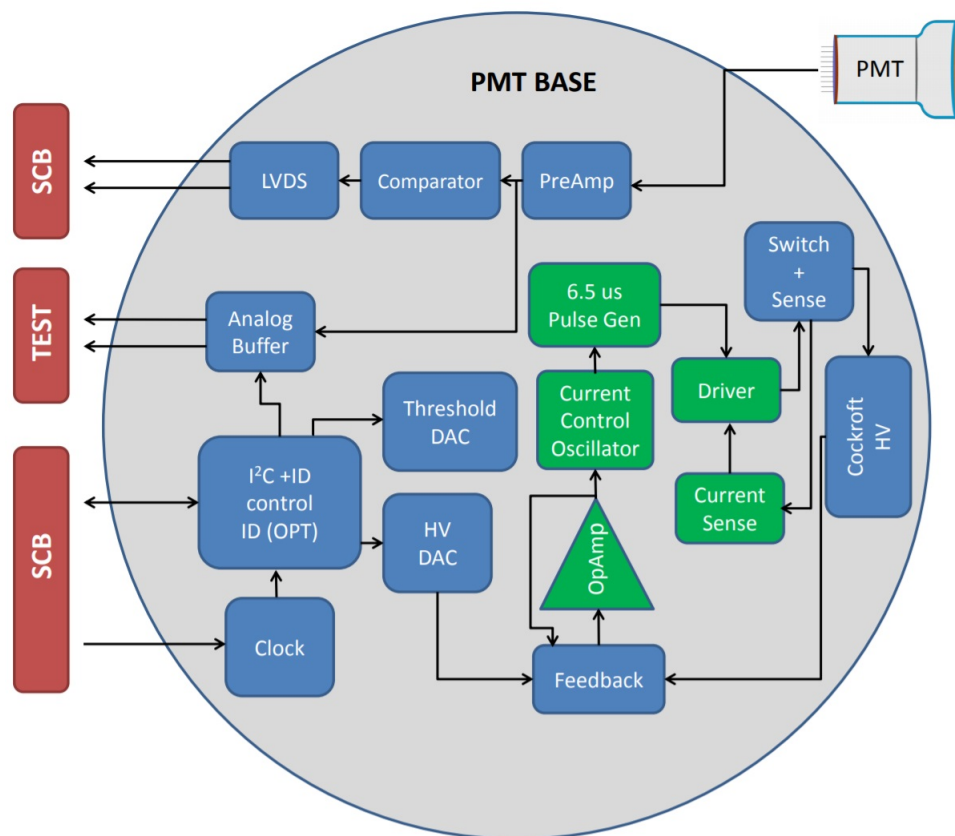


Figura 2.11: Schema dei componenti della scheda del PMT.

controllo e il monitoraggio del SCB è stato aggiunto un CPLD, accessibile tramite I<sup>2</sup>C. Il CPLD permette di leggere e resettare i sensori e disabilitare l'orologio digitale della base del PMT, per eliminare possibili interferenze da questo orologio sui segnali PMT. Anche il sensore piezoelettrico acustico è collegato al CLB tramite il *large* SCB. Come nel caso dei PMT, l'SCB fornisce al piezo la tensione necessaria e trasferisce i dati acquisiti. I segnali LVDS e la tensione di 5 V necessari per alimentare il sensore piezoelettrico sono collegati dal connettore del *backplane* al connettore piezo. La tensione di 5 V non viene misurata e non può essere commutata dall'SCB. Lo *small* SCB ha 12 canali PMT e tre canali di riserva.

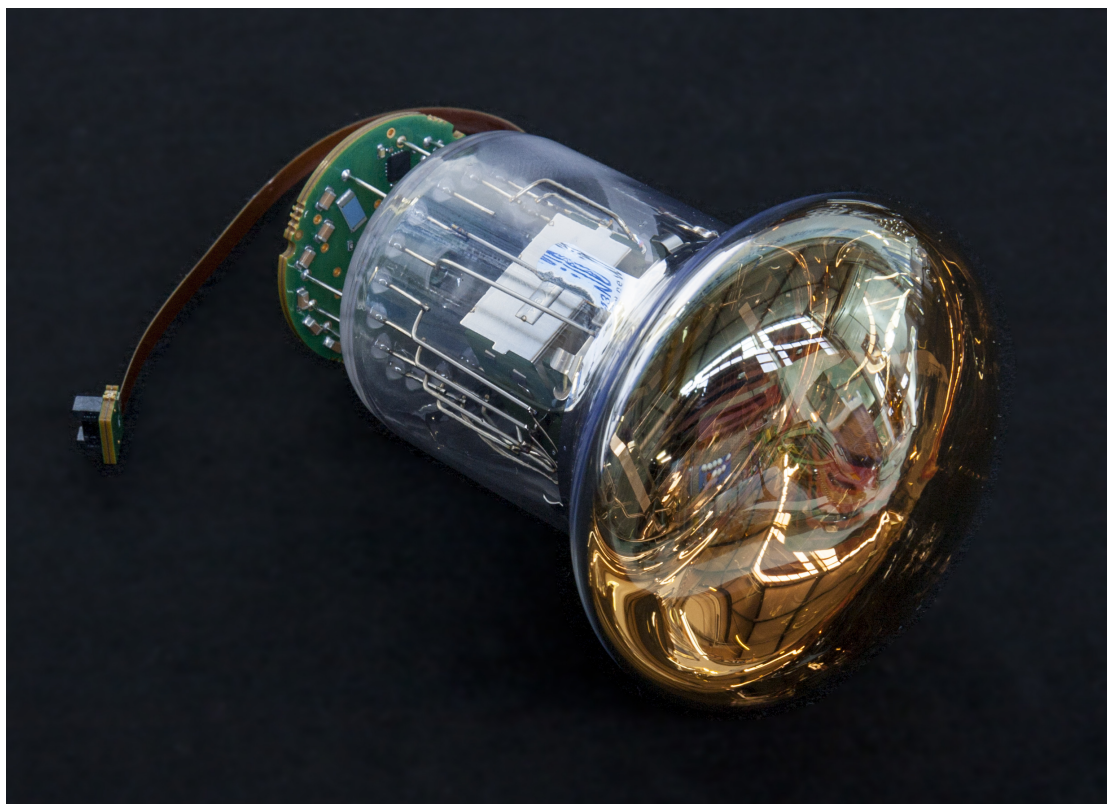


Figura 2.12: Fotomoltiplicatore collegato insieme alla sua base.

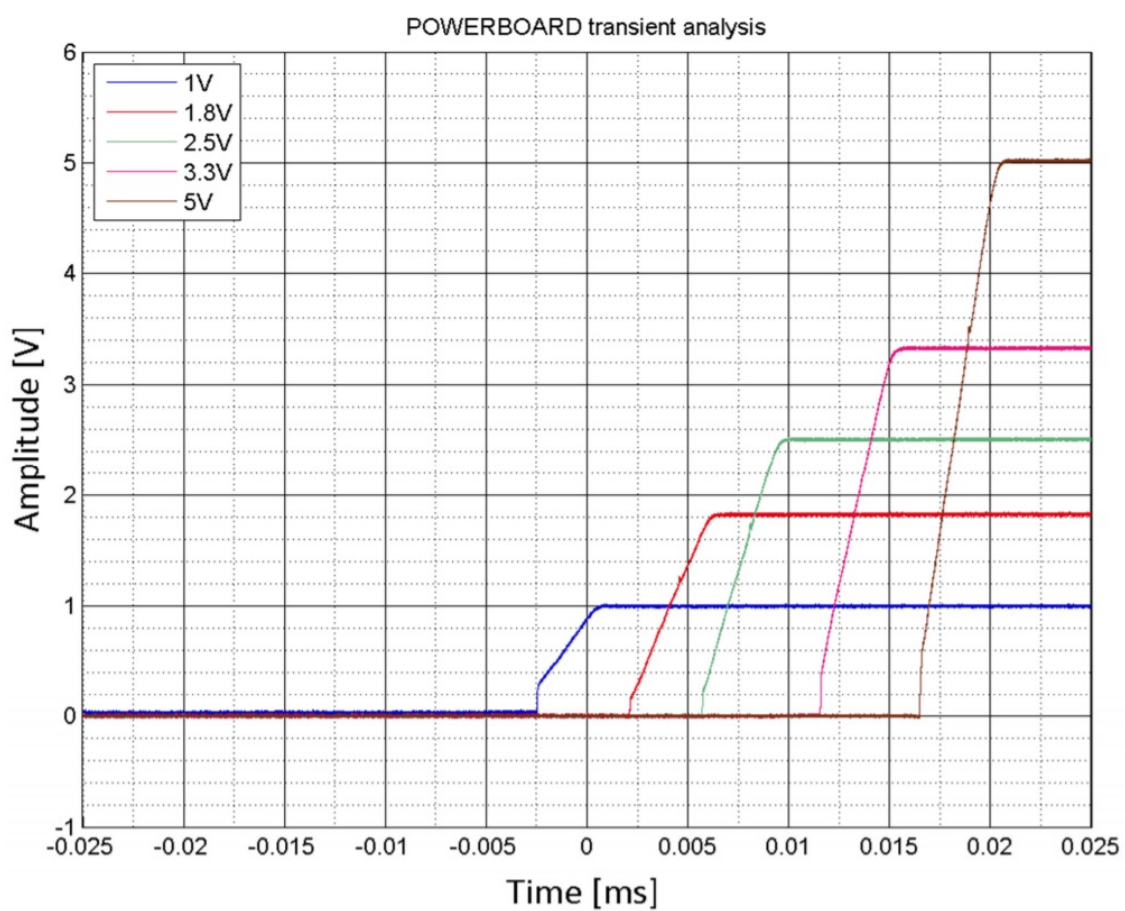


Figura 2.13: Sequenza di avvio. L'immagine mostra il grafico dato dai dati di un oscilloscopio.

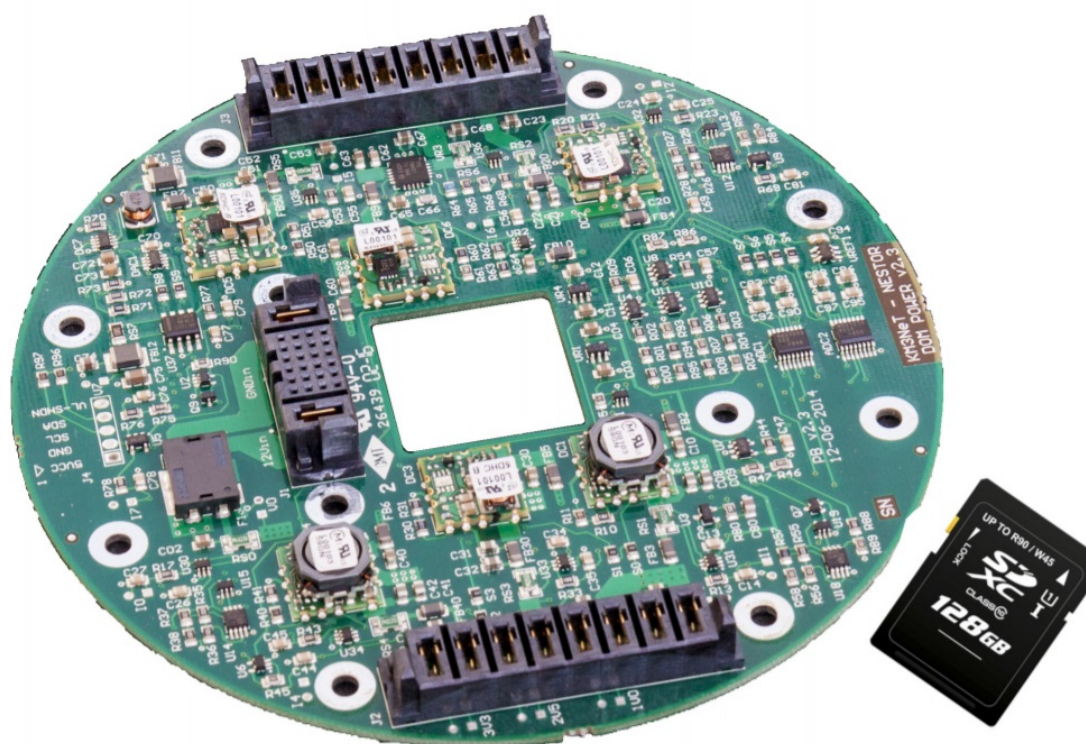


Figura 2.14: Scheda di alimentazione del DOM rapportata con una scheda SD per avere un'idea della grandezza.



## Capitolo 3

# Rilevamenti e struttura del network

L'infrastruttura di KM3NeT [11] consiste di tre elementi costitutivi principali: stringhe, moduli ottici e tubi fotomoltiplicatori. Vi sono complessivamente 115 stringhe, ciascuna delle quali comprendente 18 moduli ottici, a loro volta composti da 31 tubi foto-moltiplicatori (PMT). I moduli ottici costituiscono, dunque, una matrice tridimensionale e vengono utilizzati per rilevare il fenomeno dell'onda di Cherenkov, prodotta da particelle relativistiche emergenti dalle interazioni dei neutrini.

Come si è visto nell'introduzione, l'esperimento ha due grandi telescopi per poter effettuare le osservazioni; grazie al design flessibile di KM3NeT, l'implementazione tecnica di ARCA e ORCA è quasi identica. I siti di acque profonde sono collegati alla costa con una rete di cavi per l'energia elettrica e la comunicazione dati a banda larga. Sul posto, le stazioni di terra sono attrezzate per fornire alimentazione, elaborazione e una connessione Internet a larghezza di banda elevata ai repository di dati. La lettura dei rilevatori si basa sul concetto "*All-data-to-shore*", sperimentato in ANTARES [12]. La progettazione complessiva consente un'implementazione flessibile ed economica dell'infrastruttura di ricerca e il suo funzionamento a basso costo. I costi operativi sono stimati in circa 2 milioni di euro all'anno, pari a meno del 2% dei costi di investimento totali.

L'intero progetto è organizzato in un'unica Collaborazione, con una gestione centrale e con centri comuni di analisi e deposito dei dati. Per la prima fase (Phase-1), è stato firmato dai rappresentanti delle corrispondenti agenzie di finanziamento un *Memorandum of Understanding*, che copre il budget attualmente disponibile di circa 31 milioni euro. Durante la Fase-1, il progetto tecnico è stato validato attraverso prototipi in sito e sono stati sviluppati strumenti di analisi dei dati. Sono stati, inoltre, allestiti siti di assemblaggio per la produzione di moduli ottici e stringhe, mentre lo spiegamento e il collegamento di stringhe in acque profonde vengono ottimizzati per la velocità e l'affidabilità. Durante la fase successiva (Fase 2.0), la Collaborazione completerà la costruzione di ARCA e ORCA entro il 2020. L'obiettivo finale è quello di sviluppare completamente l'infrastruttura di ricerca KM3NeT per procedere con un'installazione distribuita nei tre siti previsti (Fase 3) e farlo funzionare per dieci anni o più. La Collaborazione aspira

a creare un consorzio europeo per l'infrastruttura di ricerca (ERIC) ospitato nei Paesi Bassi.

## 3.1 Integrazione del DOM

La creazione del DOM prevede i seguenti passaggi e caratteristiche:

- tutti i componenti hanno un proprio codice di identificazione e il database ne tiene traccia;
- le due metà vengono costruite e montate separatamente per essere infine assemblate;
- la giunzione delle fibre ottiche è necessaria per creare una connessione tra il rice-trasmittitore laser e l'esterno attraverso il penetratore;
- tutti i comportamenti critici subiscono test prima dell'integrazione nel sistema;
- si prosegue con un collaudo funzionale di tutti i sistemi prima che vengano intraprese operazioni meccaniche irreversibili (per esempio la colata del gel):
  - funzionalità dell'elettronica e di tutti i sensori;
  - verificare il cablaggio del PMT;
- viene eseguito il riempimento dello spazio compreso tra la struttura di supporto e la sfera di vetro con del gel ottico per garantirne l'accoppiamento;
- dopo la chiusura del DOM si eseguono test di accettazione finale, che vengono eseguiti per determinare tutti i parametri rilevanti e decidere se il DOM sia idoneo o meno.

Nella figura 3.1 notiamo le fasi descritte in precedenza. In figura 3.2 troviamo un esempio di laboratorio dove vengono assemblati i DOM.

## 3.2 Distribuzione e installazione

La distribuzione e l'installazione delle unità di rilevamento e dei componenti della rete nel fondale marino è un aspetto molto impegnativo. Come si vedrà di seguito, sono stati sviluppati degli strumenti per poter dispiegare le unità di rilevamento nelle profondità di svariati chilometri. Per effettuare il dispiegamento e lo stoccaggio delle unità, queste devono essere avvolte attorno ad un telaio sferico, detto veicolo di lancio LOM (creato in un laboratorio apposito, come notiamo in figura 3.3), in cui i moduli del sensore si

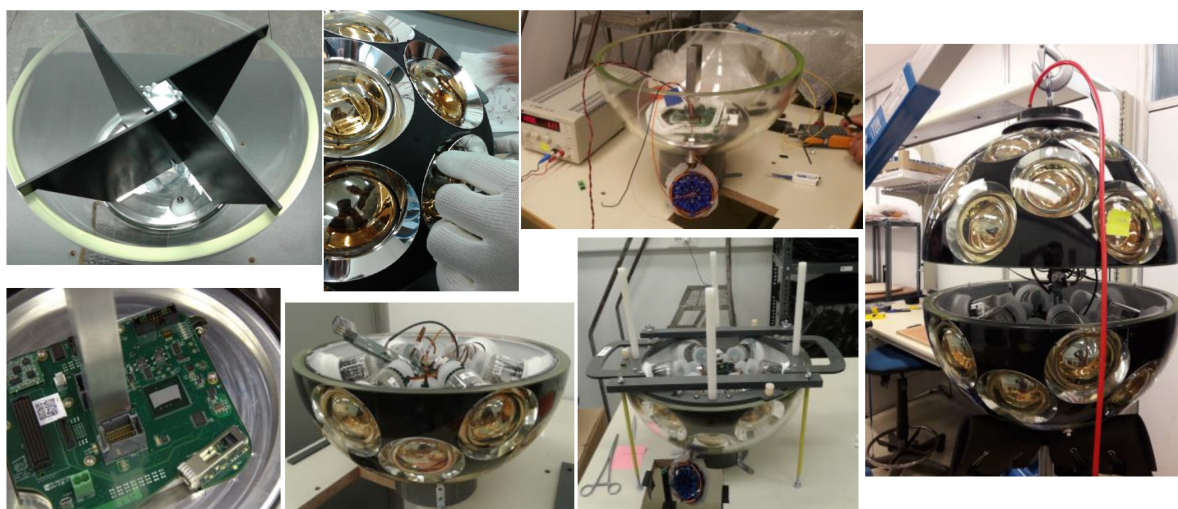


Figura 3.1: Procedura di integrazione per fasi.

inseriscono in apposite cavità. Le unità di rilevazione nella loro parte inferiore sono dotate di un'ancora; quest'ultima è utilizzata per interfacciarsi con l'infrastruttura del fondale. L'ancora è esterna al lanciatore ed è sufficientemente pesante da mantenere l'unità fissata nelle profondità marine; oltretutto, ospita un cavo dotato di un connettore accoppiabile a umido e il contenitore di base. Il contenitore di base incorpora, invece, un convertitore di alimentazione CA/CC, componenti ottici dedicati e un ricevitore acustico utilizzato per il posizionamento degli elementi del rivelatore. In superficie è necessario che una nave dispieghi il LOM (vedi in figura 3.4 vedi DOM sul veicolo di lancio); la precisione con cui deve essere fatta questa operazione è di 1 m. In figura 3.5, invece, troviamo il lanciatore preparato nel laboratorio; in figura 3.7 si vede il veicolo di lancio con unità di rilevamento in attesa della nave, mentre in figura 3.6 troviamo il caricamento del lanciatore nella nave. Una macchina (ROV) viene utilizzata per distribuire e collegare i cavi dalla base di una stringa alla scatola di giunzione, precedentemente distribuite in *daisy chaining*. In figura 3.8 lo schieramento del lanciatore. Verificato il collegamento a terra dell'unità di rilevamento, un segnale acustico fa scattare lo spiegamento dell'unità. Durante questo processo il veicolo lanciatore inizia a salire in superficie e, mentre ruota, lancia i moduli. Lo stesso veicolo lanciatore, una volta vuoto, galleggerà in superficie e verrà recuperato dalla nave, come mostrato in figura 3.9. L'uso di corde consente il trasporto di molte unità a bordo e, quindi, più dispiegamenti durante un singolo viaggio. Questo metodo riduce i costi e il tempo di installazione del rivelatore.



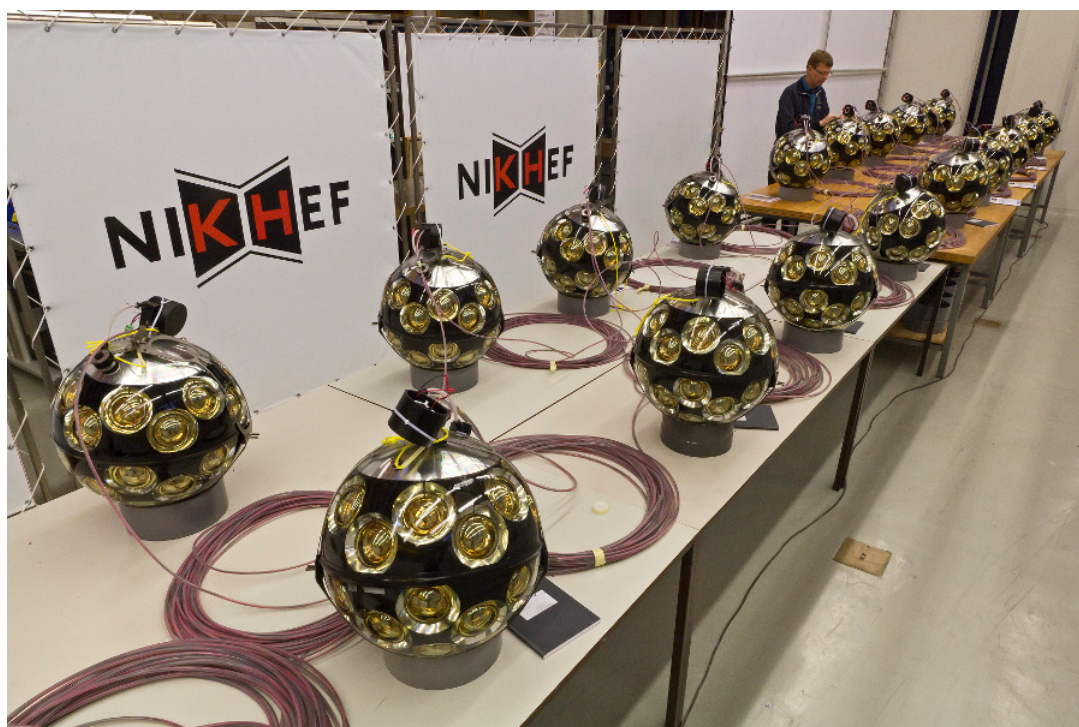


Figura 3.2: Laboratorio dove vengono assemblati e tenuti i DOM.

### 3.3 Network sottomarino

Le reti nelle profondità marine sono complessi sistemi di cavi elettro-ottici e di fibre ottiche. Forniscono il collegamento tra i sensori nelle profondità marine e il luogo dove si trova la stazione di controllo principale in superficie. Questo ha lo scopo di facilitare la distribuzione dell'energia elettrica per il funzionamento e per i comandi impartiti (per quanto riguarda le connessioni che vanno dal laboratorio alle unità di rilevamento); al contrario, dall'unità di rilevamento al laboratorio, si ha una risposta ai comandi e ai segnali misurati. Le unità di rilevamento sono collegate a scatole di giunzione (un involucro che ospita dei collegamenti elettrici e li protegge tramite una barriera di sicurezza) in fondo al mare, e sono dotate di più connettori, ognuno dei quali può alimentare più unità (il tutto collegato in *daisy chaining*). Il collegamento subacqueo fra le unità e le scatole di giunzione avviene attraverso cavi che sono disposti sul fondale marino. Un cavo elettro-ottico principale collega i rilevatori in fondo al mare con il laboratorio di superficie, fornendo così l'alimentazione e permettendo il trasferimento di dati per ricevere informazioni o controllare i rilevatori stessi. Si utilizza il *multiplexing* a divisione di lunghezza; questo metodo ha il vantaggio di consentire il passaggio di segnali di diverse frequenze attraverso una singola fibra. Ogni sensore di un set ha quattro unità di rilevamento e trasmette i propri dati utilizzando la propria frequenza portante univoca. Nella



Figura 3.3: Laboratorio dove viene creato il lanciatore.

parte inferiore dell'unità di rilevamento delle stringhe vengono caricate 18 frequenze in una fibra; più avanti, nella rete, queste fibre "caricate" si uniscono e sono ulteriormente concentrate in una singola fibra, che trasporta 72 frequenze. Questa fibra arriva fino alla riva, dove le frequenze vengono nuovamente separate; in questo modo ogni sensore ha il proprio percorso unico verso la superficie. Nel laboratorio i dati del rivelatore possono essere raccolti e analizzati per le tracce delle particelle subatomiche che sono passate attraverso il rivelatore.

### 3.4 Controllo rivelatori e acquisizione dei dati

I rivelatori sono azionati dal laboratorio in superficie e ospitano tutta la potenza, l'informatica e le infrastrutture utilizzate. I rivelatori possono essere azionati da qualunque parte del mondo, basta un piccolo team di supporto tecnico presso la stazione di terra. Il sistema di trasmissione di dati in fibra ottica consente di trasferire sia i dati dal rivelatore al laboratorio che dal laboratorio al rivelatore. La larghezza di banda per ogni modulo è di 1 Gb/s e supera abbondantemente il minimo richiesto che è di circa 20Mb/s. La sincronizzazione temporale è tale da ottenere ritardi minori di 1 ns tra una qualsiasi

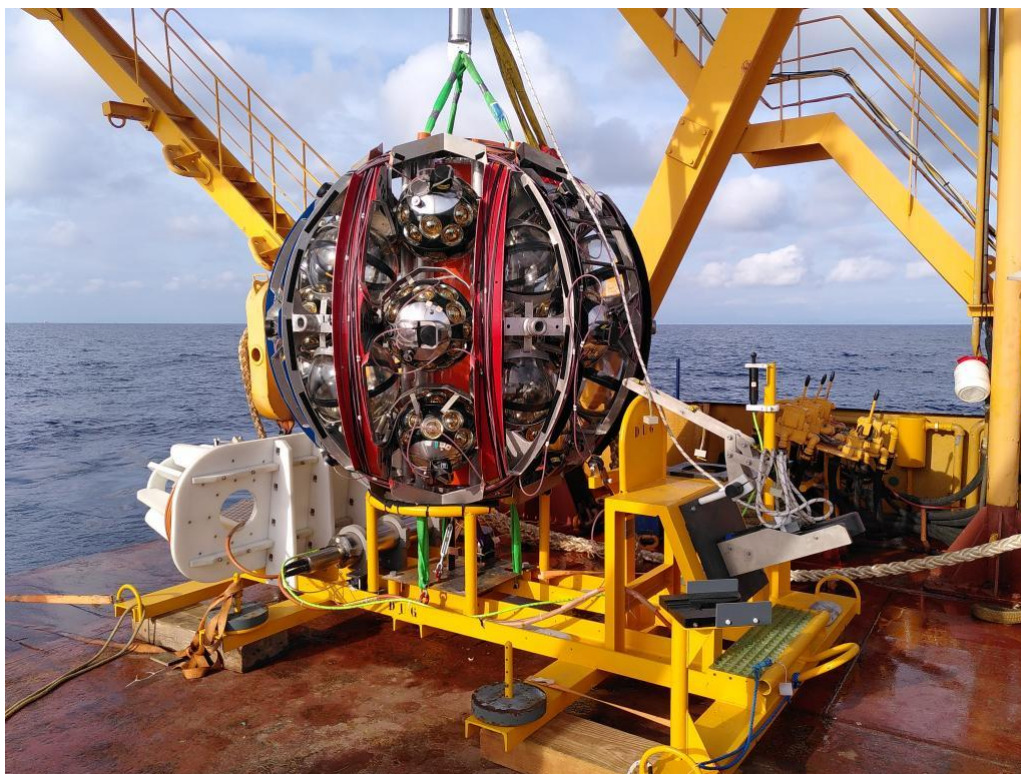


Figura 3.4: Veicolo di lancio caricato con un'unità di rilevamento del tipo ARCA.

coppia di moduli; tutto questo è garantito dal protocollo white rabbit opportunamente modificato. Viene fornito il controllo individuale di ogni:

- modulo sensore;
- unità di rilevamento;
- scatole di giunzione.

Il sistema di controllo è implementato tramite un meccanismo di trasmissione. La lettura del rivelatore si basa su un concetto per cui tutti i dati digitali, in arrivo (dai tubi fotomoltiplicatori) che superano una certa soglia preimpostata vengono inviati a terra, dove vengono elaborati su un cluster di calcolo in real time. Gli eventi fisici vengono filtrati utilizzando una serie di algoritmi di filtro specifici, implementati nel software; è possibile applicare filtri diversi ai dati contemporaneamente. La velocità totale per un singolo blocco di costruzione, composto da 115 stringhe, ammonta a circa 25 Gb/s ed è necessaria una riduzione della velocità di un fattore (di circa 104) per memorizzare i dati filtrati su un disco. Questo per ulteriori elaborazioni successive (calibrazione, ricostruzione dei parametri dell'evento, analisi). Parallelamente ai dati ottici, vengono elaborati i dati del sistema di pos.



Figura 3.5: Nel laboratorio, il lanciatore insieme all'unità di rilevamento con funi, cavo dorsale e 18 moduli ottici sono avvolti attorno al telaio del lanciatore.



Figura 3.6: Varo del veicolo nel porto di Malta.

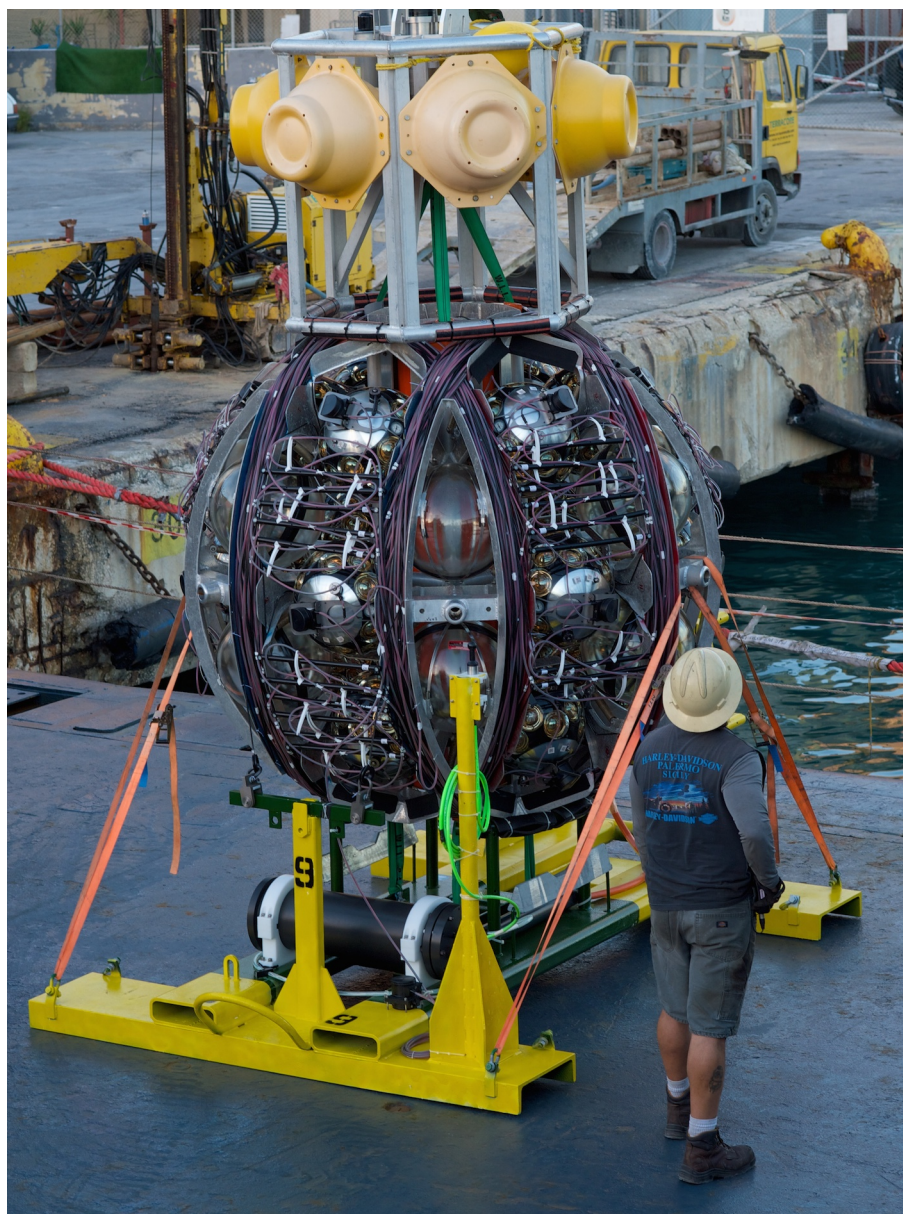


Figura 3.7: Veicolo di lancio con unità di rilevamento avvolta attorno ad esso in attesa della nave.

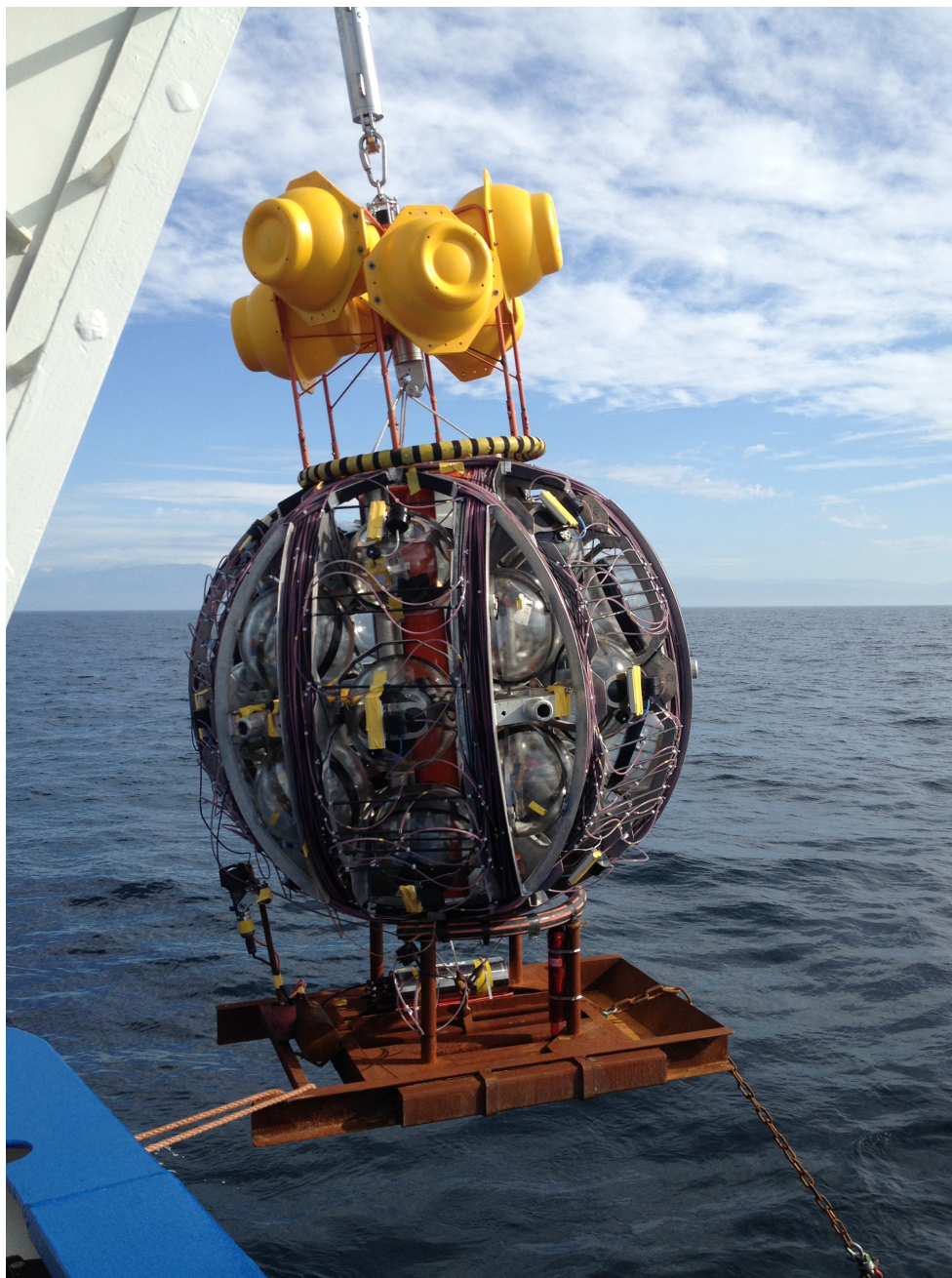


Figura 3.8: Inizio del dispiegamento del lanciatore.

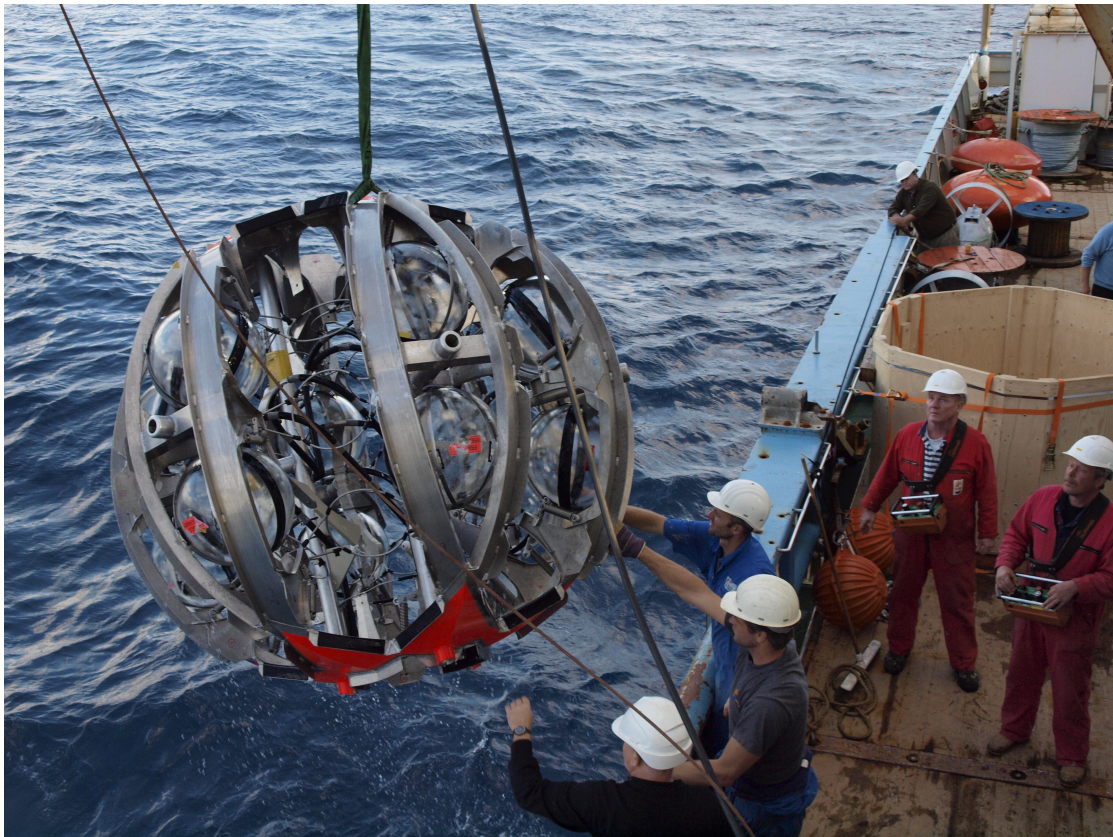


Figura 3.9: Recupero del frame vuoto del lanciatore una volta terminato il proprio compito.





## Capitolo 4

# Gestione dei dati

In questo capitolo si parlerà principalmente del lato software del progetto KM3NeT [13]. Alla base del sistema software vi è il *Trigger and Data Acquisition System* (detto TriDAS) [14], questo si basa su un'architettura distribuita e scalabile. I processi di elaborazione che implementano il TriDAS hanno un numero di istanze in esecuzione che possono crescere in base alle necessità, superando alcune centinaia su decine di server in una singola installazione. Ogni rilevatore può eseguire attività diverse, con strategie di acquisizione dati variabili. L'unità di controllo (CU, Control Unit), un insieme di processi informatici che espone i servizi distribuiti, ha il compito di dirigere tutti questi componenti hardware e software affinché lavorino insieme. L'Unità di Controllo è, inoltre, incaricata di raccogliere e conservare i log delle operazioni idonee sia alla lavorazione della macchina che all'accesso umano. Le procedure di qualificazione e certificazione per singoli PMT, DOM o interi DU richiedono l'esecuzione di una o più attività di acquisizione dati in ambienti controllati e con più protocolli di test [15], per garantire che tutti i dispositivi funzionino entro le specifiche. Il software in esecuzione durante il funzionamento del rilevatore viene utilizzato anche per la produzione e il collaudo dei componenti. Le stazioni da banco di prova [16] funzionano effettivamente in un modo molto simile alle stazioni a terra dei rivelatori per l'acquisizione di dati fisici. Gli eventi che si stanno cercando sono molto rari e l'ottimizzazione del tempo di vita del rilevatore è un requisito fondamentale per raccogliere statistiche elevate. L'affidabilità dell'Unità di Controllo e la possibilità di operare in modo continuativo nonostante i guasti hardware o software hanno un impatto diretto sulla significatività statistica dei dati dei risultati. I rivelatori sono progettati per funzionare almeno per 10 anni in mare. Il software fa uso di standard ampiamente adottati alla sua fondazione, con un ampio sviluppo e una base di utenti che dovrebbe garantire il supporto per un lungo periodo di tempo. Tutto il codice personalizzato è completamente sotto il controllo di *KM3NeT Collaboration*, il cui piano di qualità del software include la conservazione del software a lungo termine. Nelle sezioni successive verranno descritti argomenti quali: l'architettura distribuita e i servizi dai quali è composto, l'autenticazione e l'identificazione degli utenti e dei servizi,

la struttura del database e l'interazione con esso.

## 4.1 Componenti Software

L'unità di controllo è composta da cinque servizi indipendenti [17]:

- *Local Authentication Provider* detto LAP;
- *Master Control Program* detto MCP;
- *Database Interface* detto DBI;
- *Detector Manager* detto DM;
- *TriDAS Manager* detto TM.

Questi servizi possono essere eseguiti sulla stessa macchina o su server diversi, nel caso di installazioni con funzioni di failover. Tutti i programmi sono scritti in *C#* e gli eseguibili sono codificati in un linguaggio indipendente dalla macchina, che è compilato in JIT dal compilatore Mono; può, dunque essere eseguito su diversi sistemi operativi, come versioni di GNU / Linux, Microsoft Windows e OS X. Nel contesto KM3NeT, l'unità di controllo è ospitata da alcuni server che eseguono CentOS 7; mentre lo sviluppo e la manutenzione del codice sono gestiti tramite GitLab per il repository del codice sorgente, l'integrazione continua e il test automatico. La distribuzione utilizza un set di strumenti basato su Ansible4 e la "containerizzazione" è stata testata tecnicamente ma finora non è necessaria a causa della portabilità intrinseca dei binari Mono / .NET. Tutti i servizi sono stati sviluppati per avere un ingombro ridotto in termini di utilizzo della CPU e della memoria; possono essere eseguiti in più di un processo su macchine diverse per scopi di failover o per soddisfare elevate esigenze in termini di carico di lavoro. Quest'ultimo caso è previsto per DM che controlla grandi rivelatori, come l'intera installazione ARCA (con un totale di 230 DU). Ogni servizio ha un punto di accesso univoco tramite HTTP5 e l'interfaccia utente, quando presente, viene offerta come servizio simile al Web. Ciò consente di utilizzare un browser Web per eseguire la maggior parte delle attività ed evita di aggiungere dipendenze software su librerie grafiche / interattive. È possibile accedere alla GUI tramite HTTP su VPN da controller remoti che superano sia l'autenticazione VPN che l'autenticazione CU. Per scopi di gestione altamente critici e configurazione di base, viene fornita una console locale, accessibile solo agli amministratori tramite terminale. Il rischio di errata configurazione è considerato essere maggiore se proviene da utenti inesperti, piuttosto che da aggressori remoti, perché gli unici modi per danneggiare il rivelatore e la capacità di acquisire dati sono le funzioni di alimentazione e la configurazione del sistema. Qualsiasi altro errore verrebbe rapidamente risolto passando al set corretto di parametri operativi. Oltre al controllo e alla registrazione, l'unità di

controllo è anche il ponte tra gli utenti, il database centrale KM3NeT, il rilevatore *off-shore* e il sistema di trigger online. In figura 4.1 sono mostrate le connessioni logiche tra i servizi, del TriDAS e delle componenti del rilevatore.

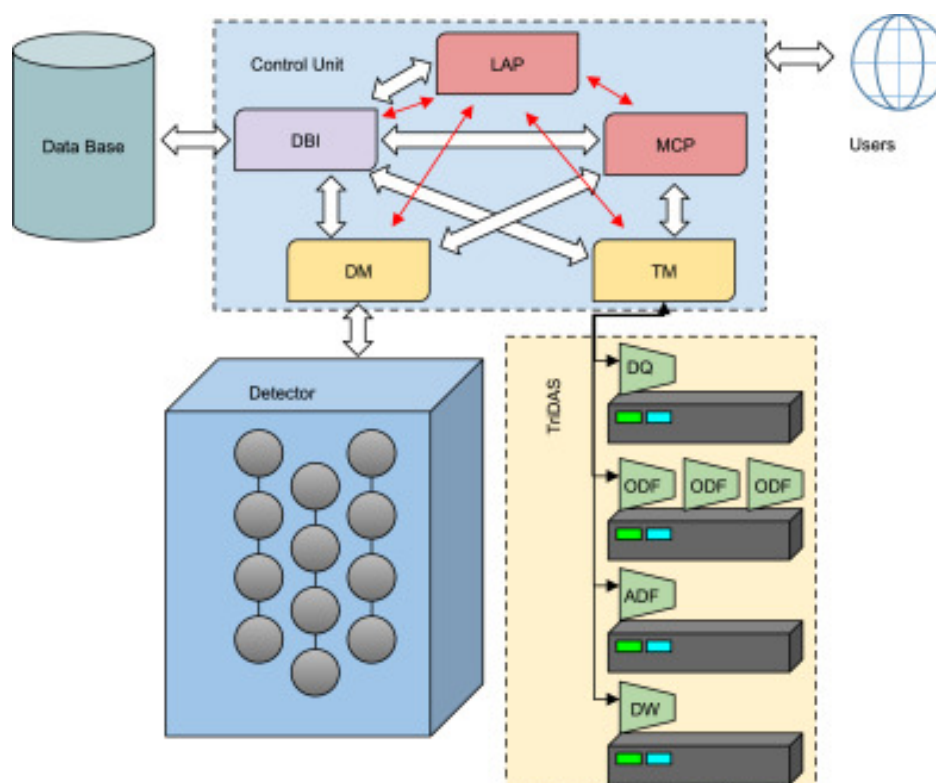


Figura 4.1: Componenti della CU e le loro relative relazioni, le frecce nere e bianche rappresentano i flussi di informazioni relative al controllo e la monitoraggio, mentre quelle rosse rappresentano flussi di informazioni relative all'autenticazione e/o all'autorizzazione.

## 4.2 Identificazione e autenticazione - LAP

Il *Local Authentication Provider* (detto LAP) [18] gestisce l'autenticazione degli utenti che vogliono accedere e controllare i vari sensori. Per l'identificazione e l'autenticazione il LAP utilizza dei token per ogni account. Quando viene ricevuta una richiesta di *login* i permessi dell'account vengono copiati all'interno del *token* che gli viene assegnato e scadono al *logout*. Agire con certi privilegi permette agli utenti di abilitare alcune funzioni come, il controllo totale della stazione o la messa a punto di singoli parametri. Si noti che le funzioni di un servizio dipendono dal livello di privilegio e non dal loro nome; questo permette flessibilità nel design. In futuro, un singolo processo potrà incorporare più

funzioni e questo necessiterà solamente un cambio della registrazione nel LAP, piuttosto che sistemare staticamente le associazioni tra nomi e funzioni. A un utente vengono concessi privilegi *one by one* o in gruppi, chiamati *ruoli*. Poiché i rilevatori acquisiscono dati durante tutto l'anno, 24 ore su 24, *KM3NeT Collaboration* segue un piano a turni per condividere il carico del controllo del rivelatore; ogni turno dura sette giorni e un team di turno comprende un cambio e un capo turno, che ha il compito di monitorare il funzionamento del rivelatore e controllare la qualità dei dati. Il *Run Coordinator* rimane in carica per un periodo di tempo più lungo (di solito quattro-otto settimane), collegando l'attività di ogni squadra di turno a quella successiva e supervisionando l'ottimizzazione delle prestazioni del rivelatore. Il sistema dei ruoli è particolarmente utile per la gestione dei turni: quando un utente è registrato nel database centrale per un turno, ottiene automaticamente, per la finestra temporale corrispondente, tutti i privilegi che sono definiti nel ruolo di *Shifter / Shift Leader / Run Coordinator*. Questi privilegi sono tutti revocati al termine del turno. Un utente registrato come *DAQ Expert* (esperto di *Data Acquisition*, comunemente tra i principali sviluppatori di componenti hardware o software) o *Detector Operation Manager* (responsabile della gestione del rivelatore, solitamente per diversi anni) sul database centrale, così, ottiene automaticamente tutti i relativi privilegi su tutte le installazioni. Ad esempio, si suppone che gli *shifter* azionino i rilevatori utilizzando configurazioni predefinite, mentre gli esperti possono regolare singoli parametri per scopi diagnostici e di test.

### 4.2.1 Accesso a servizi

Il concetto di accesso a servizi è più complesso e meno intuitivo dell'accesso di un utente; il semplice fatto che un programma sia installato e in esecuzione su un server non è sufficiente perché sia noto al LAP (e quindi ad altri servizi CU). Quando il programma deve accedere al LAP riceve il proprio token di sicurezza e diventa noto a tutti gli altri servizi CU. Questo requisito di accesso esplicito garantisce che l'utilizzo delle risorse hardware possa essere ottimizzato e che i servizi possano essere spostati da una macchina all'altra in base alle esigenze; ciò semplifica anche la configurazione iniziale, poiché non è necessario creare manualmente un file di configurazione statico. Lo stesso LAP mantiene un database locale di risorse hardware come file XML. Gli amministratori possono creare la configurazione indirettamente inviando comandi incrementali ai LAP per registrare nuove istanze di servizi.

## 4.3 Esecuzione dei Controlli

Il *Master Control Program* (MCP) [19] ha il compito di mantenere lo stato di esecuzione del rivelatore e del TriDAS. Le informazioni complete sullo stato della corsa sono costituite dalle seguenti parti:

1. *Current detector*: un rilevatore cambia quando si aggiungono o rimuovono DU o per una riconfigurazione del failover;
2. *Current runsetup*: l'insieme dei valori dei parametri di ingresso che controllano il rivelatore, come la tensione di alimentazione del PMT e le grandezze da leggere per la registrazione;
3. Numero corsa corrente: una corsa è un periodo di tempo durante il quale un rilevatore viene azionato con lo stesso *runsetup*; per motivi pratici un lungo periodo può essere diviso in due o più con lo stesso *runsetup* per avere file di dati di output più piccoli;
4. Obiettivo attuale: l'obiettivo complessivo della CU può essere uno dei seguenti (notare che un cambio di obiettivo non implica un cambio di marcia):
  - Off: tutti i PMT sono disattivati, l'acquisizione dei dati è disattivata, nessun trigger o post-elaborazione;
  - On: tutte le PMT sono attive, il rilevamento dei dati è disattivato, nessun trigger o post-elaborazione;
  - Esegui: tutti i PMT sono attivi, l'acquisizione dei dati è attiva, il trigger e l'esecuzione di post-elaborazione;
5. Calibrazione ora / posizione corrente: l'insieme di posizioni regolate e offset temporali per i singoli PMT che viene utilizzato per l'attivazione in linea;
6. Lavoro corrente: un lavoro è un programma di esecuzione con un grado di priorità. Un'analisi può iniziare con o senza una pianificazione predefinita poiché all'MCP può essere comandato di cambiare immediatamente il numero di esecuzione. Un lavoro è una voce in una pianificazione che specifica come, a un certo punto, una nuova esecuzione inizierà con un'impostazione definita in anticipo e che durerà per un certo periodo di tempo; questo a meno che non venga preceduta da lavori con priorità più alta. Un lavoro può corrispondere a una o più esecuzioni;

I lavori possono essere modificati prima che inizino e possono essere troncati quando sono stati avviati. Lo stato di esecuzione, la cronologia dello *switch* di esecuzione e la cronologia di aggiunta / eliminazione / modifica del lavoro sono conservati in un file locale dedicato, che funge da registro delle transazioni. Tali informazioni vengono periodicamente estratte dal DBI per essere registrate nel database centrale; solo dopo che le informazioni sono state scritte con successo in questo database, il file viene eliminato. Inoltre, tutte le opzioni di esecuzione vengono registrate in un file di registro leggibile dall'uomo, ma la sintassi è tale che, in caso di perdita o danneggiamento del file di stato di esecuzione, sia possibile ricostruire il secondo dal primo. Un'archiviazione locale basata su file è un'opzione migliore di un'istanza di database locale per diversi motivi:

- è più veloce di un database completo;
- non richiede quasi nessuna competenza per essere gestito;
- non richiede costi di licenza;
- evita di introdurre ulteriori dipendenze da componenti software esterni, che potrebbero diventare obsoleti o non supportati.

Nelle operazioni standard, può essere necessario che un rilevatore funzioni per mesi con gli stessi parametri operativi. A tale scopo, è possibile utilizzare la funzione "auto-schedule" che riempie automaticamente una riga di priorità con lavori di uguale durata e un *runsetup* e un target specifici; ciò libera i cambi da attività ripetitive soggette a errori. Ogni volta che lo stato di esecuzione cambia, l'MCP notifica la variazione a tutti i servizi registrati nel LAP con il privilegio `Status_Notification_Privilege`, che di solito significa almeno DM e TM. Si tratta di una notifica di tipo "push", finalizzata alla comunicazione veloce.

La tolleranza ai guasti è assicurata dalla modalità di comunicazione "pull": il DM e il TM aggiornano periodicamente la loro conoscenza dello stato di esecuzione recuperando tali informazioni dall'MCP. Trascorrerà un tempo finito tra il cambio di marcia dell'MCP e la reazione nel DM e nel TM; tutto questo viene registrato ed è possibile identificare con precisione il tempo di latenza dello switch di esecuzione in ogni caso. Un *run switch* viene attivato anche da una riconfigurazione del sistema dopo un guasto. Si sottolinea che l'MCP deve fornire una coppia univoca di rilevatore e numero di corsa per ogni corsa. Rilevatori differenti in siti KM3NeT diversi possono utilizzare lo stesso numero di esecuzione senza conflitti. L'MCP offre una GUI per eseguire tutte le attività di routine, ad eccezione della configurazione del servizio e del ripristino di emergenza. La GUI impone la conformità dei privilegi utente: la pianificazione del lavoro non è consentita agli utenti, che non sono né in turno né titolari dei privilegi DAQ Expert. Un ulteriore livello di controllo della sicurezza che coinvolge le *query* LAP è il filtraggio delle *query* HTTP contraffatte, che potrebbero tentare di bypassare la GUI. In questo contesto, il protocollo HTTPS sarebbe possibile, ma eccessivo, poiché la sicurezza è focalizzata sulla conformità da parte degli utenti e dei processi automatizzati. Tutte le comunicazioni avvengono già su una rete privata e gli utenti si connettono tramite una VPN.

## 4.4 Interazioni con il database - DBI

Il servizio denominato *Database Interface* (DBI) [20] [21] è dedicato alla gestione dell'interazione con il database centrale [22]. Il suo scopo principale è quello di lavorare come un buffer di file per sostituire le interazioni SQL / DML dei programmi con il database [23] come si nota in figura 4.2. I motivi principali per implementare un DBI sono:

- evitare la ridondanza, le credenziali di accesso al database vengono archiviate in un'unica posizione al momento dell'installazione di CU e crittografate per motivi di sicurezza;
- disaccoppiare codice CU e del codice / schema del database. Le query SQL e / o le istruzioni DML non devono essere scritte in alcun codice al di fuori del DBI stesso. Tutte le complicazioni della gestione e della conversione dei tipi di dati del database sono gestite dal DBI e il codice client è scritto in termini di strutture dati CU. Ciò consente il *refactoring* su entrambi i lati, affinché che la CU e il database non entrino in conflitto tra loro;
- affrontare l'instabilità della connessione remota. Il collegamento con il database centrale utilizza una *Wide Area Network*, che è intrinsecamente inaffidabile. Il DBI memorizza tutti i set di dati necessari per il funzionamento della CU in una *cache* locale, velocizzando l'accesso e migliorando l'affidabilità. D'altra parte, i buffer DBI scrivono le operazioni e le riproducono nel caso fallissero, cioè quando il database risulta non accessibile;

I set di informazioni che sono stati scaricati dal database sono salvati in formato XML; questi includono:

- attuale definizione del rilevatore, la quale viene scaricata dagli utenti autorizzati solo quando varia;
- tutti i *runsetup* scritti per il rilevatore corrente (una relazione uno-a-molti). Il DBI interroga regolarmente il database per la comparsa di nuovi *runsetup*, ma l'accesso su richiesta viene tentato per *runsetup* richiesti da MCP / DM / TM che non sono ancora nella cache;
- i set correnti di dati di calibrazione. Questi dati vengono continuamente sottoposti a *polling* per le versioni aggiornate e immediatamente inviati all'MCP e ad altri servizi.

I *runset* di solito sono generati dagli umani, quindi, il momento della loro creazione è ben separato dal tempo in cui vengono utilizzati. I set di dati di calibrazione dovrebbero, invece, essere aggiornati regolarmente e automaticamente, per avere un funzionamento ottimale del rivelatore. Non appena un nuovo set è disponibile ed è stato scaricato con successo, il DBI avvisa l'MCP che decide quando cambiare la corsa e trasmette il segnale ad altri servizi. In questo senso, il DBI è una parte attiva nella raccolta dei dati. La cache di caricamento memorizza i dati in coda, che vengono scritti nel database e sono scaricati a trasferimento riuscito. In questo caso, i file binari sono previsti nel formato nativo generato dai programmi di scrittura; Il DBI gestisce le conversioni necessarie. Al momento, i seguenti tipi di dati sono ospitati nella cache di caricamento:

- *Datalogs* DM, che contengono i dati di monitoraggio del rivelatore e la notifica degli eventi di gestione, come il tempo reale di inizio corsa per ogni CLB (che è diverso dal momento in cui l'MCP emette il comando per cambiare il numero di corsa);
- *Datalogs* TM, contenenti i log dell'attività TriDAS, che documentano i tempi effettivi di inizio e fine di ogni esecuzione processo per processo e anche i possibili arresti anomali;
- *Times-Of-Arrival* (TOA) degli impulsi di onde acustiche rilevati dagli ADF.

Le informazioni sulla contabilità di esecuzione vengono "estratte" dal DBI, che interroga l'MCP, per poi essere scritte nel database senza passare attraverso una cache locale. Ciò riflette il fatto che le tabelle *datalog* e TOA nel database hanno chiavi esterne per la tabella delle esecuzioni: un errore nei *datalog* o TOA rimane limitato a quel *dataset*, ma un errore nella contabilità di esecuzione avrebbe un effetto a cascata di errori su altre tabelle. Il DBI invierà un comando di "eliminazione" all'MCP per le esecuzioni ed i lavori che sono stati scritti correttamente. I *datalogs* e i TOA per le esecuzioni e i lavori che sono stati già comunicati al database e gestiti nella cache di caricamento vengono cancellati per la scrittura nel database, mentre tutti gli altri dati in essi contenuti vengono mantenuti in attesa. Quando la scrittura di un *datalog* o di un set TOA fallisce, non viene ritentata fino a quando un'altra scrittura del *datalog* o di un set TOA non riesce. Questo fa fronte al caso di errore di *Wide Area Network*: per un certo periodo di tempo tutte le scritture falliscono, ma ogni *dataset* viene provato una sola volta. Non appena il database può essere nuovamente raggiunto, vengono eseguite tutte le scritture in coda. Se un set di dati non può essere scritto più volte (di solito la soglia è impostata su 5), viene contrassegnato come "non riuscito" e deve essere rivisto da un esperto di DAQ.

## 4.5 Gestione dei Rilevatori - DM

I sottosistemi del rivelatore funzionano secondo la macchina a stati rappresentata in figura 4.3. I tre stati "Idle" (corrispondente al target "Off"), "Ready" (corrispondente al target "On") e "Running" (corrispondente al target Target "Run") sono stabili, nel senso che dovrebbero essere mantenuti per tutta la durata di un *run job*, che prosegue per diverse ore. Gli stati "Standby" e "Paused" sono di transizione. Il *Detector Manager* (DM) guida la macchina a stati di ogni CLB, che emette eventi trasportati sulla rete. Il compito del *Detector Manager* è triplice:

- impostare dei parametri di *input* dei DOM come specificato nel *runsetup* corrente;
- guidare le macchine a stati dei CLB secondo l'obiettivo attuale;



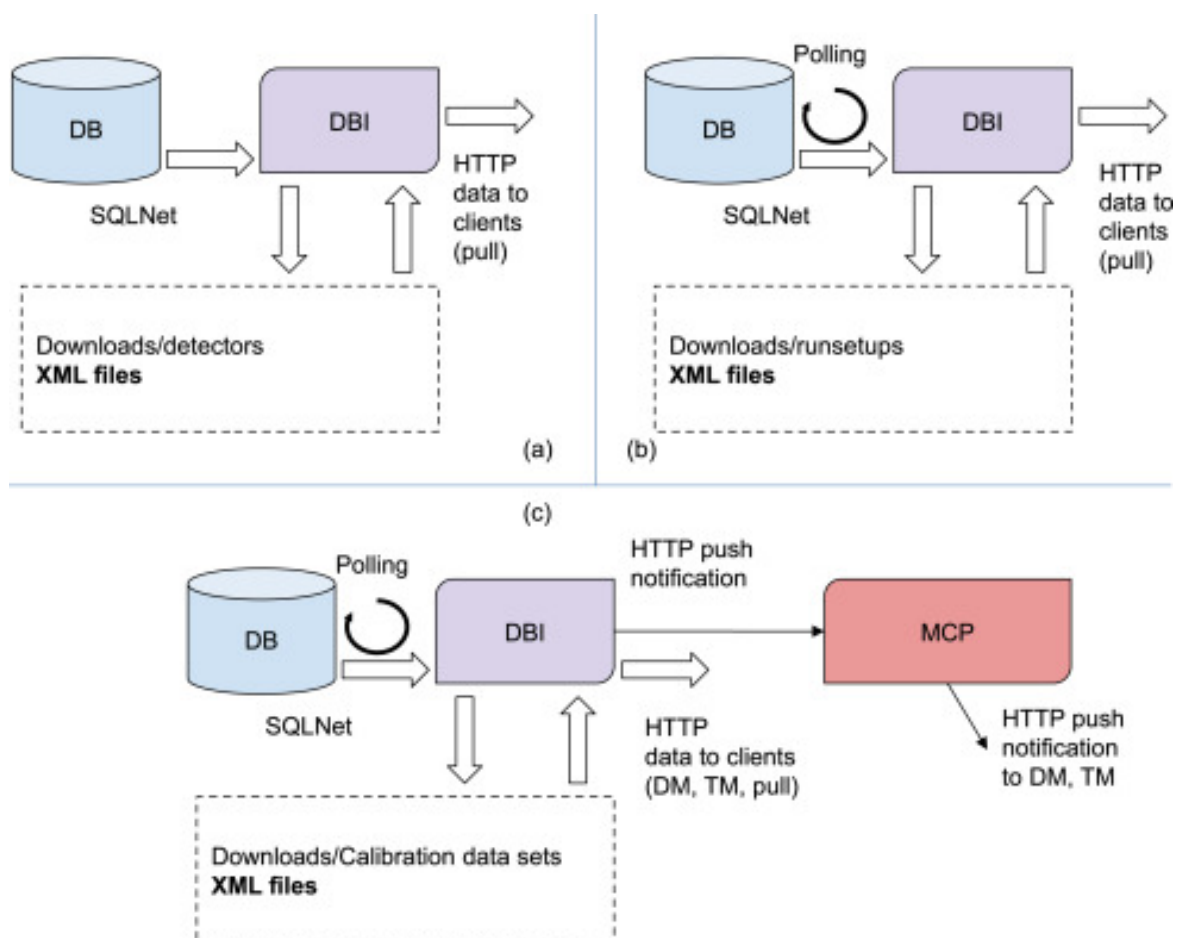


Figura 4.2: Logica e protocolli di rete. Nel punto (a) si ha il flusso di dati del rilevatore, nel (b) il flusso dei dati di Runsetup ed infine nel (c) vi è il flusso dei dati di calibrazione.

- leggere e registrare i parametri di output dei DOM che producono i file datalog pronti per essere scritti nel database dal DBI.

Il DM (*Detector Manager*) è infatti il componente più critico della CU dal punto di vista della scalabilità rapportata alla dimensione di un blocco 115-DU e oltre. Riceve e invia messaggi da tutti i CLB, quindi ci si aspetta anche che abbia impronte di CPU e memoria che dipendono linearmente dal numero complessivo di DOM. Ci si aspetta che il DM riceva tutte le notifiche dall'MCP quando lo stato di esecuzione cambia. Come accennato in precedenza, anche se la modalità "push" perde un battito o si verifica un errore di comunicazione, il DM interroga regolarmente l'MCP per conoscere lo stato di esecuzione. Di conseguenza, questo consente al DM di funzionare anche se il sistema viene riconfigurato durante l'acquisizione dei dati. Qualsiasi modifica dello stato di esecuzione verrà registrata in modo che possa essere scritta nel database. Ogni volta che

il rilevatore o il *runsetup* cambia, il DM passa attraverso tutti i DOM per riconfigurarli; ciò significa elaborare l'elenco completo dei parametri di input, i loro valori e parametri di output. L'elenco è personalizzato al livello di un singolo PMT. Il DM comunica con i CLB tramite il *Simple Retransmission Protocol* (SRP), un protocollo basato su UDP (*User Datagram Protocol*); questo include funzioni per configurare e stabilire il collegamento tra il server DM e i CLB. Ciò è utile sia quando il DM viene avviato per la prima volta, sia quando le DU vengono riavviate, ma anche quando è necessario riavviare un CLB. Uno degli scopi del DM è monitorare l'attività dei CLB e riprendere il controllo di quelli che potrebbero smettere di comunicare, riducendo così al minimo la necessità di interventi umani. SRP consente messaggi *point-to-point* da DM a CLB e viceversa, messaggi *broadcast* e trasmissione dati in *subscription*; questo in modo che il DM richieda una volta il monitoraggio del set di parametri e riceva aggiornamenti regolari (1 Hz o 0,1 Hz) senza la necessità di ulteriori sondaggi. Ogni CLB espone i seguenti sottosistemi:

- Sistema (SYS);
- Network (NET);
- Ottica (OPT, solo per CLB ospitati in DOM);
- Acustica (ACS);
- Strumentazione (INS);
- Base (BSE, solo per moduli base DU).

Ogni sottosistema è controllato indipendentemente dagli altri. Tuttavia, tranne che nei brevi intervalli di tempo delle transizioni, tutti i sottosistemi dovrebbero trovarsi nello stesso stato. Il DM interviene quando riceve un nuovo report di stato CLB: viene confrontato con lo stato attualmente previsto e, solo se non sono d'accordo, viene generato un nuovo evento in modo che la macchina a stati si sposti in un altro stato. L'impostazione del parametro è consentita solo nell'evento *Configure* che collega lo stato *Standby* allo stato *Ready*. Quindi, qualsiasi cambiamento nei parametri implica che la macchina a stati del CLB torni allo stato *Standby*, imposti i parametri e quindi metta la stessa macchina a stati nello stato che è coerente con l'obiettivo corrente. In tal modo, anche il numero di esecuzione viene confrontato con la variabile di monitoraggio corrispondente mostrata dal CLB. Se questi differiscono, il DM ordina al CLB di passare attraverso tutti gli stati necessari, finché il numero di esecuzione del CLB non corrisponde al numero di esecuzione corrente definito dall'MCP.

Per il test e la risoluzione dei problemi, il DM fornisce anche una modalità manuale riservata agli utenti che detengono il privilegio di *Detector Control* (di solito *Run Coordinators* ed esperti DAQ). Questa modalità manuale può essere attivata sui singoli CLB e consente agli operatori di modificare ogni singolo parametro e di controllare

manualmente gli eventi di emissione della macchina a stati tramite una GUI. Quando viene ripristinata la modalità di controllo "automatico" il CLB torna al funzionamento normale, ma i parametri di ingresso appena impostati non vengono ripristinati fino al successivo interruttore di marcia. La capacità di controllare i parametri manualmente è utile per correggere le condizioni critiche, mentre viene preparata una nuova configurazione della corsa e una nuova corsa è pronta per iniziare.

Per i moduli di base DU è anche possibile utilizzare la GUI per alternare l'alimentazione della DU stessa (questa funzione è riservata ai titolari dei privilegi di Detector Control). Alcuni parametri possono essere regolati solo tramite la riga di comando della console DM, poiché potrebbero causare gravi danni al rivelatore, come la sovracorrente.

Come mostrato in figura 4.4, il DM dispone di un *thread* di controllo per gestire una coda seriale di comandi esterni (principalmente dall'MCP, ma anche da *shifter* e comandi di console da parte degli amministratori). Esiste un controller per ogni CLB, ma questo non ha un proprio *thread*; l'utilizzo delle risorse di elaborazione da parte del DM deve essere attentamente controllato. Sebbene sia un'applicazione naturalmente *multi-thread*, l'utilizzo dei pool di *thread* è limitato all'interfaccia HTTP. L'allocazione di memoria e *thread* per le comunicazioni SRP e per l'elaborazione dell'azione CLB è configurata staticamente. Può essere modificata impostando esplicitamente i parametri di configurazione nella console DM, ma non può cambiare durante una corsa. La dimensione del *buffer* di ricezione UDP può essere configurata staticamente; in caso di sottoscrizione eccessiva, ovvero quando arrivano troppi messaggi SRP, una parte di essi viene automaticamente eliminata. I messaggi di monitoraggio sono raggruppati per tipo e origine; in caso di carico eccessivo sul *thread* di elaborazione, il sotto-campionamento avviene eliminando una opportuna frazione di messaggi. Tale perdita di informazioni si traduce in una diminuzione della frequenza media di campionamento del monitoraggio del rivelatore. Il DM fornisce contatori per la diagnostica della comunicazione e il carico di elaborazione, in modo che gli esperti di DAQ possano regolare l'allocazione delle risorse. Come riferimento, il campionamento di una DU a 1 Hz utilizza circa il 10% di un tipico core della CPU (*Intel Xeon Silver 4116 a 2,1 GHz*); ciò implica che circa 12 core dovrebbero essere sufficienti per il monitoraggio di un intero blocco di 115 DU. È stato dimostrato che un singolo *socket* con *buffer* di ricezione da 64 KiB può monitorare almeno tre DU. Il numero di prese può essere regolato in base alle esigenze, consentendo di scalare a un rivelatore completo di più blocchi.

Lo stesso programma per DM viene utilizzato nei vari ambienti KM3NeT di controllo rivelatori, come stazioni di terra, banchi di prova di qualificazione e installazioni di sviluppo. In alcuni casi, azioni specifiche normali in altri contesti possono comportare rischi elevati a causa delle peculiarità dei componenti hardware precedenti (ad esempio Prime DU distribuite, vecchi DOM, ecc.). Il DM ha una *blacklist* standard di tali azioni (per lo più relative alle funzioni di controllo dell'alimentazione), che devono essere consentite individualmente. Un modulo aggiuntivo, denominato "Blocco di autorizzazione", compilato per essere eseguito su una macchina ben identificata in un unico luogo geografico,

abilita quelle azioni potenzialmente pericolose. Il blocco delle autorizzazioni assicura che un amministratore abbia esplicitamente sbloccato tutte le funzioni consentite. Un DM senza un blocco di autorizzazione o con uno bloccato filtrerebbe tutte le azioni nella *blacklist*.

Due output sono continuamente generati dal DM: uno è un log leggibile dall'uomo e l'altro è un *datalog* in formato binario. Quest'ultimo viene prodotto ad intervalli regolari (solitamente 10 minuti) o quando raggiunge una certa dimensione (32 MiB in memoria) e contiene una parte dei dati di monitoraggio pronti per l'inserimento nel database. Di solito è scritto nella cache di caricamento del DBI. Le istantanee sotto-campionate sono esposte nella Directory virtuale disponibile tramite HTTP, principalmente per scopi GUI. Un esempio di uno *screenshot* della GUI con i dati di monitoraggio in tempo reale è mostrato in figura 4.5. Inoltre, altri programmi possono leggerli se necessario.

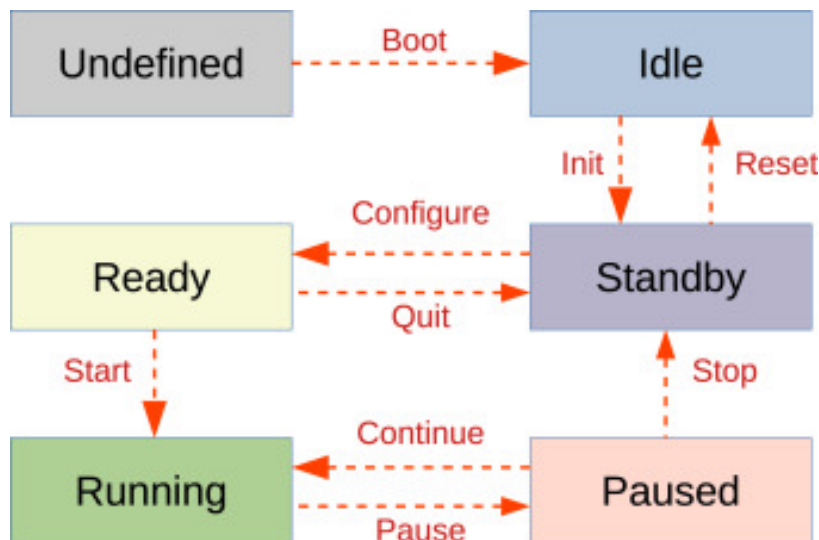


Figura 4.3: Macchina a stati per l'acquisizione dei dati. Gli stati sono boxed, mentre gli eventi sono abbinati alle frecce tratteggiate che indicano le relative transizioni di stato.

## 4.6 Gestione TriDAS - TM

Il TriDAS [24] è un insieme di programmi sviluppati in conformità con i requisiti del framework KM3NeT per la raccolta e l'elaborazione dei dati [25]. Nella maggior parte degli scenari sono presenti almeno un *Dispatcher*, una o più code di dati opto-acustiche, uno o più filtri di dati ottici, uno o più filtri di dati acustici e uno o più *writer* di dati. Tutti i programmi devono essere condotti in modo coordinato, coerentemente con l'attuale obiettivo operativo. Ogni ambiente di esecuzione è dotato di una macchina a

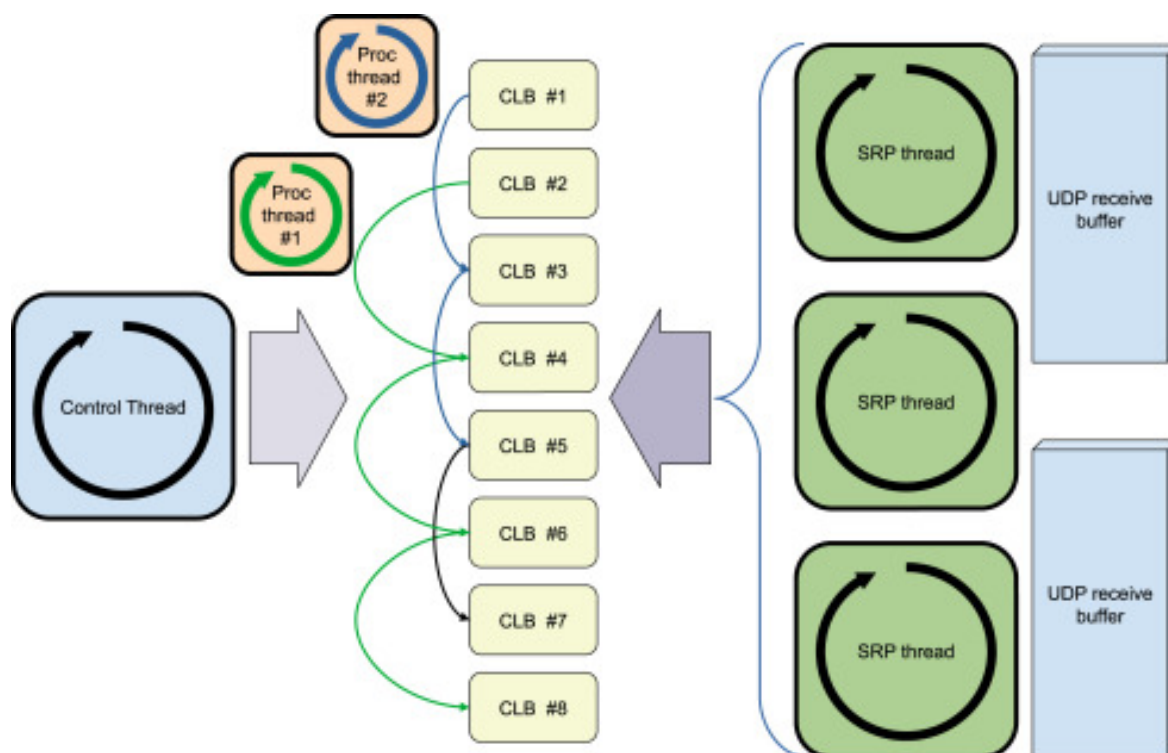


Figura 4.4: Sketch della struttura del thread del DM. Il pool di thread HTTP non viene visualizzato. Il thread di controllo invia messaggi a tutti i controller CLB, che non dispongono di thread propri. I thread di elaborazione (due nello sketch) alimentano i controller CLB condividendo il carico di lavoro. I thread SRP (tre nello sketch) leggono i messaggi trovati in due buffer di socket UDP e li convertono in eventi per i controller CLB. Le frecce grandi mostrano il flusso di comunicazione verso i controller CLB. Le piccole frecce mostrano la condivisione del carico di lavoro del controllo CLB tra i thread di elaborazione.

stati identica a quella implementata nei CLB. Come linea guida generale, tutti i componenti TriDAS dovrebbero trovarsi nello stesso stato di un CLB generico. Come nel caso del DM, ogni elemento TriDAS ha il proprio *TriDAS Element Controller*. In pratica, il controllo e la comunicazione sono così diversi per i programmi CLB e TriDAS che ci sono pochissime somiglianze nella struttura interna di DM e TM (TriDAS Manager). La struttura interna di TM è mostrata in figura 4.6.

Se un CLB smette improvvisamente di rispondere, l'acquisizione dei dati da parte di quelli rimanenti procede imperturbabile. In caso di arresto anomalo di un programma TriDAS, riavviarlo rapidamente è importante per ridurre al minimo la perdita di dati, a seconda di quanto sia critico il suo compito. Un ADF che si blocca è quasi innocuo se ritorna entro poche ore, mentre un ODF che scompare improvvisamente porta a una

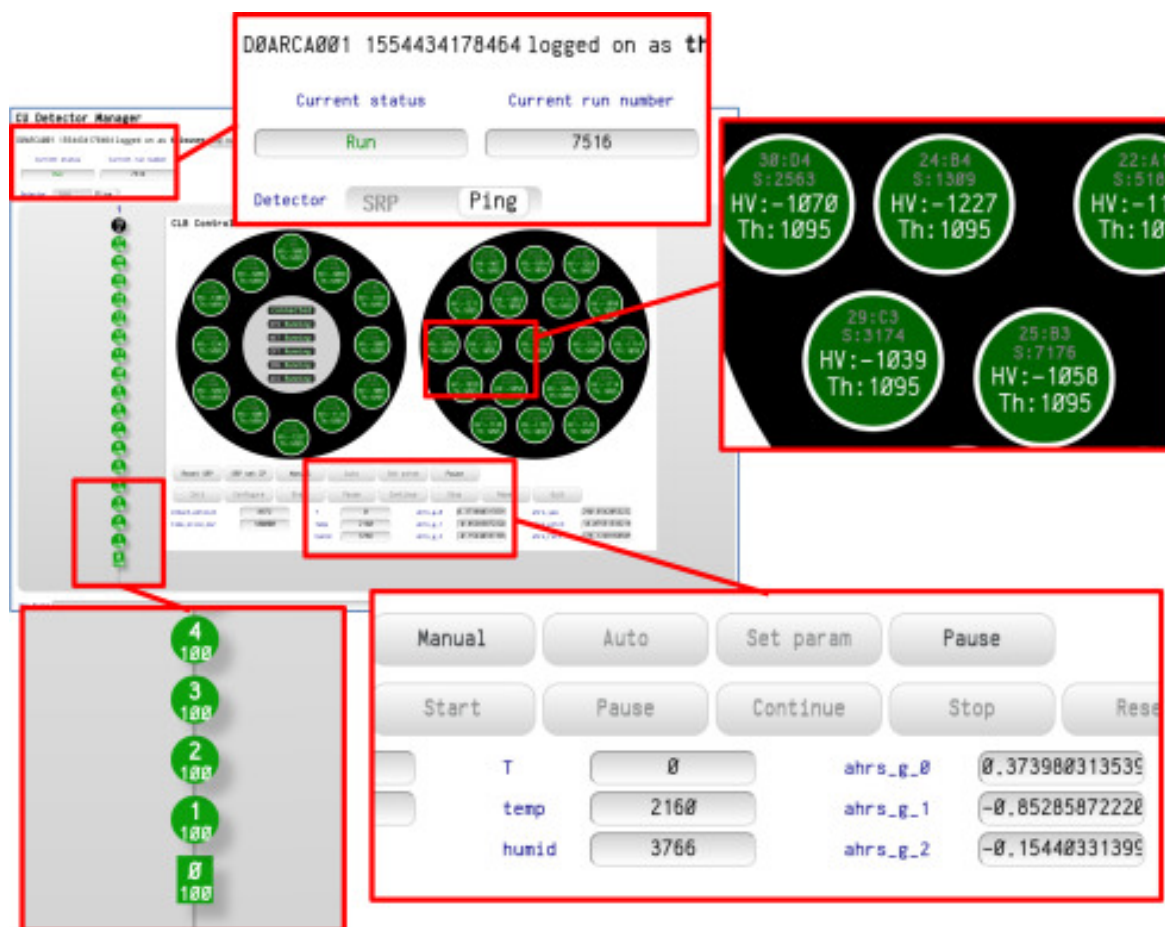


Figura 4.5: Interfaccia utente grafica del DM per una DU e un DOM. Sono visualizzati i dati di monitoraggio in *real time* ottenuti tramite il protocollo HTTP.

perdita proporzionale del tempo di vita del rivelatore per la durata della procedura di riavvio. Una coda dati opto-acustica che si arresta in modo anomalo porta alla perdita totale dei dati fino a quando non viene ripristinata. Ovviamente, il *Data Writer* è fondamentale anche perché i dati devono essere salvati. Vale la pena ricordare che, contando tutte le istanze dei vari processi, si è assistito ad un funzionamento stabile oltre i 30 anni, nonché *crash* che si verificano solo immediatamente e ripetutamente su configurazioni errate.

Mentre il DM comunica con i CLB direttamente uno per uno, i processi TriDAS utilizzano il protocollo *Control Host* per comunicare attraverso il *Dispatcher*. Di conseguenza, la TM riceve un flusso di messaggi ordinato nel tempo dai processi TriDAS. Ciò ha alcune implicazioni sul processo di controllo:

- il *Dispatcher* deve essere identificato, contattato e deve essere stabilita una con-

nessione TCP (*Transmission Control Protocol*) permanente con la TM;

- il *Dispatcher* non può essere utilizzato per avviare processi (sebbene possa essere utilizzato per interromperli);
- sebbene il flusso sia ordinato in base al tempo, non è sensibile a questo, nel senso che non produce timeout come fa una connessione punto-punto. Di conseguenza, un comando a cui non viene data risposta non produrrà automaticamente un errore di timeout.

Un agente locale (denominato *TriDASManager Agent*) comunica con il TM per ricevere le richieste di avvio o arresto dei programmi e utilizza il LAP per verificare che le richieste siano autorizzate. L'agente TriDASManager dispone di un sistema di sicurezza per le credenziali integrato con CU. I TriDAS Element Controller interni hanno alcuni stati in più nella loro macchina a stati per gestire i casi di un programma che si sta avviando, ma non è ancora reattivo, o si sta spegnendo. Viene introdotto un "*Heartbeat*" per misurare il tempo a livello centrale, che viene poi trasmesso ai *TriDAS Element Controllers*.

La TM è un'applicazione molto leggera, con un carico di lavoro della CPU che normalmente è circa il 3 o il 4% di un singolo core (*Intel Xeon Silver 4116 a 2,1 GHz*) e aumenta solo un po' durante l'avvio della corsa. Fornisce, inoltre, registri di dati per documentare i tempi di inizio e fine e le condizioni di lavoro per ogni processo.

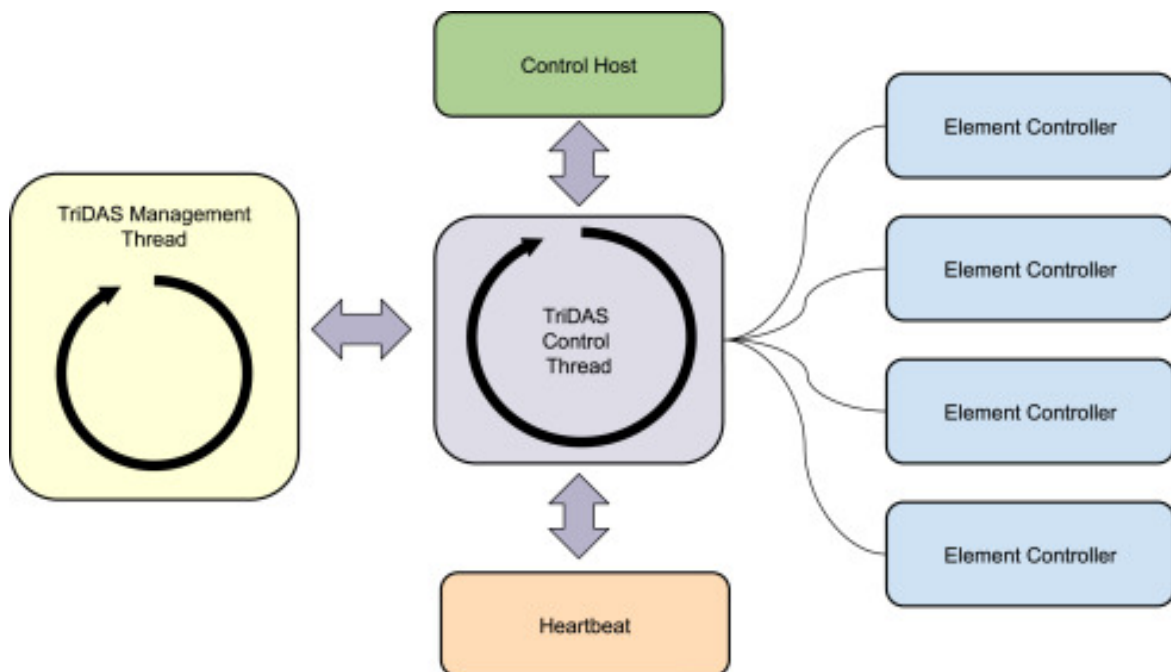


Figura 4.6: Struttura del TriDAS Manager





## Capitolo 5

# Quality Assurance e Quality Control

La garanzia e il controllo della qualità (*Quality Assurance / Quality Control*) [26] sono due aspetti della gestione della qualità stessa. Sebbene alcune attività di garanzia e di controllo della qualità siano correlate, vengono definite in modo diverso. Generalmente, le attività e le responsabilità di QA coprono praticamente tutto il sistema di qualità, in un modo o nell'altro, mentre il QC è un sottoinsieme delle attività di QA. Inoltre, gli elementi del sistema di qualità potrebbero non essere specificamente coperti dalle attività e dalle responsabilità di QA /QC, ma questi potrebbero essere coinvolte. Di seguito sono riportate le definizioni da ISO 9000: 2015: Sistemi di gestione della qualità - Fondamenti e vocabolario.

### Garanzia di qualità

La *Quality Assurance* può essere definita come "parte della gestione della qualità incentrata sul fornire fiducia che i requisiti di qualità saranno soddisfatti". La fiducia fornita dalla garanzia di qualità è duplice: internamente alla direzione ed esternamente a clienti, agenzie governative, autorità di regolamentazione, certificatori e terze parti. Una definizione alternativa: "tutte le attività pianificate e sistematiche implementate all'interno del sistema di qualità che possono essere dimostrate per fornire fiducia che un prodotto o servizio soddisferà i requisiti di qualità".

### Controllo qualità

Il *Quality Control* può essere definito come "parte della gestione della qualità incentrata sul rispetto dei requisiti di qualità". Mentre la garanzia di qualità si riferisce a come viene eseguito un processo o come viene realizzato un prodotto, il controllo di qualità può essere considerato l'aspetto di ispezione della gestione della qualità. Una definizione alternativa: "le tecniche operative e le attività utilizzate per soddisfare i requisiti di qualità".

## 5.1 Sistema di gestione del QA

A causa dello stato avanzato del progetto, lo sforzo dei *Local Quality Supervisor* (LQS) e del *Quality Manager* (QM) sarà quello di integrare i vari sistemi esistenti, unificare le migliori pratiche di lavoro e stabilire un *Quality Management System* (SGQ) globale per KM3NeT.

### 5.1.1 Elementi per l'integrazione nel sistema di gestione della qualità

Sono stati identificati i seguenti elementi per l'integrazione:

1. integrazione e convalida delle unità secondo la struttura di ripartizione del prodotto (PBS) [27]:
  - (a) infrastruttura a terra (2x) con stazione costiera, stazione di alimentazione elettrica e interconnessioni;
  - (b) *Deep Sea Network*, include un Collegamento *Sea-Shore*, JBs, nodi per entrambi i siti in Francia e Italia e un Frame di terminazione cavi per il sito in Italia;
  - (c) unità di rilevamento (stringhe e in una certa misura) con cavi di interconnessione, piede DU (DWDM, *Base Container*), VEOC, TBC DOM, strumentazione di piano ed elettronica;
  - (d) unità di calibrazione con interconnessioni;
  - (e) *Sea Operation System*, include il dispiegamento di apparecchiature e sistema di posizionamento della navigazione;
  - (f) produzione e assemblaggio e la logistica;
  - (g) DAQ e hardware e software associati;
  - (h) informatica e una Banca dati;
  - (i) fase successiva: manutenzione e aggiornamenti.
2. analisi finale dei prototipi con *Production Readiness Reviews* (PRR);
3. appalto e ordinazione di componenti, compresa la produzione esternalizzata;
4. collaudo e assemblaggio di componenti;
5. comunicazione e distribuzione delle informazioni.

La preparazione da effettuare per il lavoro consiste in:

- la valutazione di ciò che è necessario in ogni sede per garantire un Sistema di Gestione della Qualità (SGQ) che può essere utilizzato da tutte le sedi;
- lo sviluppo del sistema di gestione della qualità in associazione con le varie sedi include prove di accettazione dei componenti e controllo dei fornitori. Il sistema Antares sarà utilizzato come base. Vari altri documenti contengono dei pre-lavori per il sistema (*Technical Design Report*, Elenco delle calibrazioni e dei test da eseguire ecc.);
- il supporto per l'implementazione del sistema stabilito da parte di tutti include il responsabile locale QAQC (LQS).

## 5.2 Piano qualità

Molti elementi contenuti nel Piano di qualità sono tratti dal Piano di qualità ANTARES, in quanto è stato deciso dagli LQS che il Sistema di gestione della qualità ANTARES sarebbe utilizzato come base per il Sistema di gestione della qualità KM3NeT.

### 5.2.1 Sistema di gestione del documento

Il *Document Management System* (DMS) [28] è assolutamente necessario e deve avere i seguenti requisiti: tempo di vita KM3NeT minimo (attento ai sistemi commerciali), sicurezza, protezione, proprietà, facile accesso, facile e obbligatorio da usare, fornire modelli, sistema di archiviazione automatico, esigenze metodo di controllo delle versioni e dovrebbe mostrare lo stato (bozza, WD = documento di lavoro, finale ...), gestione dell'accesso simultaneo, opzione di notifica per il nuovo documento, ad esempio opzione di collegamento alla mailing list Al momento della stesura di questo Piano di Qualità non è certo come verrà implementato il DMS. Molto probabilmente sarà una combinazione di accesso e archiviazione nel database e nell'unità di Google.

A causa dello stato di avanzamento del progetto e della mancanza di tempo, è impossibile esaminare tutti i documenti esistenti e verificarne lo stato di aggiornamento e approvazione in modo sicuro e definitivo. Tuttavia, poiché è un obiettivo primario del presente piano identificare e archiviare in modo univoco i nuovi documenti approvati formalmente, i documenti stabiliti in precedenza potrebbero essere integrati in una fase successiva.

### 5.2.2 Processi

Un processo è un insieme di attività correlate / interagenti che trasformano elementi di input in elementi di output (generalmente gli elementi di input sono elementi di output di altri processi). I processi sono generalmente pianificati ed eseguiti in modo controllato (eseguendo misure e test che implicano feedback), al fine di aggiungere valore ad un

prodotto. I diversi processi del progetto KM3NeT sono riassunti nella figura 5.1. Gli esagoni di seguito descrivono le attività interagenti.



Figura 5.1: Diagramma dei processi.

### 5.2.3 Design e produzione

Il design e la produzione sono divisi in più sequenze, che includono altri sotto-processi. Ciascun Coordinatore del Gruppo di Lavoro è responsabile per la progettazione, l'approvvigionamento e la produzione, ma anche per la definizione delle procedure, i test di accettazione e qualificazione, per garantire la tracciabilità tramite assegnazione di bar

o QR code e registrazione articolo nel Data Base (DB) e per la cassaforte consegna del prodotto al cliente (interno o esterno).

### **Assemblaggio e integrazione**

L'assemblaggio e l'integrazione sono processi in sequenza: Assemblaggio - Ispezione - Consegna - Campagna operazioni. L'integrazione riguarda l'azione di assemblare componenti e articoli in modo metodologico mediante procedure al fine di produrre un prodotto finito, che sarà ufficialmente ricevuto per la distribuzione. Si riferisce all'assemblaggio di unità / linee di rivelazione e al collaudo dei componenti e dell'intero sistema durante e dopo il montaggio. Tutti gli articoli utilizzati per costituire la linea sono definiti in accordo con il PBS, costruiti e testati sotto la supervisione del Coordinatore del Gruppo di Lavoro per quell'articolo e consegnati al gruppo di integrazione pronti per l'uso, accompagnati dalla documentazione o con il suo riferimento al Database. Verranno stabilite e seguite procedure scritte per ciascuna attività di integrazione ed i risultati saranno registrati nel Database e nei moduli di *follow-up*. Il coordinatore del gruppo di lavoro dell'integrazione deve dimostrare che tutta la preparazione necessaria per lo svolgimento delle attività è stata effettuata e le informazioni necessarie sono state documentate. Questa operazione verrà eseguita al momento della revisione della preparazione del prodotto.

### **Distribuzione e messa in produzione**

I sotto-processi della distribuzione sono: Distribuzione - Connessione - Messa in produzione. Il dispiegamento degli elementi dell'infrastruttura e delle unità di rilevamento avverrà in varie operazioni marittime durante il progetto; ogni distribuzione richiede la propria preparazione e procedure dettagliate. Come base deve essere utilizzato il manuale delle operazioni marittime. Occorre prestare attenzione alla sicurezza per le operazioni offshore e di spiegamento. Particolare enfasi deve essere posta sul fatto che l'impiego di attrezzature non implementa la messa in servizio dell'articolo; questo potrebbe accadere con un ritardo di tempo. Si noti che anche il collegamento delle apparecchiature dispiegate potrebbe avvenire in una diversa operazione marittima.

### **Funzionamento e manutenzione**

Questa sequenza del processo descrive il funzionamento effettivo e la potenziale manutenzione del sistema di rivelatori KM3NeT. Il funzionamento e la manutenzione dovrebbero essere già presi in considerazione nella fase di progettazione degli articoli / prodotti per consentire la più lunga durata possibile del rivelatore. In questa fase è fondamentale il funzionamento del sistema DAQ; da evidenziare anche il controllo software.



# Capitolo 6

## Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era, come si è detto, identificare e spiegare nella maniera più semplice ed accurata possibile alcune specifiche del progetto KM3NeT, dalle sue componenti hardware al lato software, senza escludere la dimensione gestionale. Come si è osservato nei capitoli iniziali, è un progetto molto ambizioso, che ha raggruppato svariati istituti di differenti nazioni. Nel 2012 è iniziata la prima fase di implementazione della struttura di ricerca KM3NeT, con la realizzazione dell'infrastruttura dei fondali marini nei siti KM3NeT-Fr e KM3NeT-It. Il sito di installazione KM3NeT-Fr, vicino al telescopio ANTARES, nel 2019 ha visto l'installazione delle prime stringhe del rivelatore ORCA per la fisica delle particelle di neutrini. Nel sito KM3NeT-It, invece, il primo prototipo di stringa KM3NeT acquisiva con successo i dati per circa un anno. Nel 2016 e nel 2017 sono state installate le prime stringhe complete del rivelatore ARCA, mentre nel 2018 la rete via cavo dei fondali marini è stata chiusa. All'inizio del 2019, una correzione temporanea ha ripristinato la rete e la prima stringa; la rete in cavo del sito è in fase di riprogettazione per l'installazione dei due sotto-rivelatori di 115 stringhe ciascuno per ARCA. Nel febbraio 2020 è stata completata la prima fase del rivelatore ORCA, con l'installazione della sesta stringa, da allora, il detector è stabilmente in presa dati. Le autorità che hanno finanziato il progetto hanno firmato un memorandum d'intesa per la collaborazione nell'implementazione di KM3NeT-fase1, mentre per la prossima fase di KM3NeT 2.0 è stata pubblicata una Lettera di intenti. Attualmente, la piena implementazione della configurazione KM3NeT 2.0 descritta in questa Lettera di intenti è parzialmente finanziata.

Non si può parlare di una vera conclusione, poiché il lavoro è ancora in corso di svolgimento e sarebbe, dunque, prematuro ipotizzare un reale completamento del progetto stesso. Il presente elaborato vuole, invece, evidenziare come ci si possa coordinare a livello internazionale, per scandire il ritmo del lavoro che i vari laboratori sparsi per l'Europa stanno tenendo per la costruzione dell'infrastruttura; il tutto dando un peso significativo anche alla qualità del lavoro eseguito.





# Ringraziamenti

Vorrei dedicare qualche riga a coloro che hanno contribuito alla realizzazione della mia tesi di laurea.

Desidero ringraziare il Professor Giuseppe Levi, relatore di questa tesi di laurea, per l'aiuto fornitomi durante la stesura, per la disponibilità, per la precisione nel consigliarmi per il meglio e per la capacità di stimolare il mio interesse per l'argomento trattato. Senza il suo aiuto, il mio lavoro non sarebbe stato così completo e probabilmente io non avrei raggiunto questo livello di conoscenza. Ringrazio il mio correlatore, Daniele Vivolo, sempre pronto a darmi le giuste indicazioni in ogni fase della stesura; grazie per avere accresciuto le mie conoscenze e le mie competenze.

Ringrazio la mia famiglia e i miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto, appoggiando ogni mia decisione fin dalla scelta del mio percorso di studi.

Un grazie di cuore a tutti i miei colleghi, nonché amici, in particolare a Daniela, Giada e Marco, con cui ho condiviso l'intero percorso universitario: è grazie a voi che ho superato i momenti più difficili; senza il vostro supporto e i vostri consigli, non ce l'avrei mai fatta. Grazie ai miei amici, specialmente a voi due, Alessandro e Rabbi, per essere stati sempre presenti anche durante quest'ultima fase del mio percorso di studi. Grazie per aver ascoltato i miei sfoghi, grazie per tutti i momenti di spensieratezza.



# Acronimi

**ARCA** Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss. 7, 38

**ASIC** Application Specific Integrated Circuits. 29

**CPLD** Complex Programmable Logic Device. 32

**CU** Control Unit. 49

**DAC** Digital-to-Analog Converter. 31

**DAQ** Data Acquisition System. 28

**DBI** Database Interface. 54

**DM** Detector Manager. 56, 57

**DMS** Document Management System. 67

**DOM** Digital Optical Module. 20

**DU** Detection Unit. 20

**FPGA** Field Programmable Gate Array. 20

**I<sup>2</sup>C** Inter Integrated Circuit. 27

**LAP** Local Authentication Provider. 51

**LQS** Supervisore locale della qualità. 66

**LVDS** Low Voltage Differential Signaling. 21

**MCP** Master Control Program. 52

**ORCA** Oscillation Research with Cosmics in the Abyss. 7, 38

- PLL** Phase Locked Loop. 25
- PMT** Photomultiplier. 20
- PRR** Production Readiness Reviews. 66
- PTP** Precision Time Protocol. 23
- QA** Quality Assurance. 65
- QC** Quality Control. 65
- QM** Quality Manager. 66
- SCB** Signal Collection Board. 21
- SFP** Small Form-Factor Pluggable. 25
- SGQ** Quality Management System. 66
- SPI** Serial Peripheral Interface. 24
- SRP** Simple Retransmission Protocol. 58
- TCP** (Transmission Control Protocol. 63
- TDC** Time to Digital Converter. 21
- TM** TriDAS Manager. 61
- TOA** Times-Of-Arrival. 56
- ToT** Time over Threshold. 21
- TriDAS** Trigger and Data Acquisition System. 49, 60
- UDP** User Datagram Protocol. 28
- WRPC** White Rabbit PTP Core. 23

# Glossario

**Application Specific Integrated Circuits** Circuito integrato creato appositamente per risolvere un'applicazione di calcolo/elaborazione ben precisa (special purpose). 29

**Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss** Telescopio dedicato alla rivelazione di neutrini in Italia. 7

**Complex Programmable Logic Device** Dispositivo *programmable logic device*, programmabile e cancellabile, con un numero di pin maggiore di 48. 32

**Control Unit** Insieme di processi informatici che espone i servizi distribuiti, ha il compito di dirigere tutti questi componenti hardware e software affinché lavorino insieme. 49

**Data Acquisition System** Sistema di acquisizione dei dati. 28

**Database Interface** Dedicato alla gestione dell'interazione con il database centrale. Lavora come un buffer di file per sostituire le interazioni SQL / DML dei programmi con il database. 54

**Detection Unit** Struttura verticale in cui vi sono 18 DOM. 20

**Detector Manager** Guida la macchina a stati di ogni CLB che emette eventi trasportati sulla rete. 56, 57

**Digital Optical Module** Sensore alla base dell'esperimento KM3NeT. 20

**Digital-to-Analog Converter** Componente elettronico che converte un segnale digitale in un segnale analogico. 31

**Document Management System** Un sistema di Gestione Documentale è una soluzione software utilizzata per monitorare, gestire e archiviare documenti. 67

**Field Programmable Gate Array** Sono dispositivi semiconduttori basati su una matrice di blocchi logici configurabili (CLB) collegati tramite interconnessioni programmabili. Gli FPGA possono essere riprogrammati in base all'applicazione o ai requisiti di funzionalità desiderati dopo la produzione. 20

**Fotomoltiplicatori** Rivelatori estremamente sensibile di luce e di altre radiazioni, costituito da un tubo in cui vengono accelerati gli elettroni rilasciati dalla radiazione che colpisce un fotocatodo, amplificando notevolmente il segnale ottenibile da piccole quantità di radiazione. 20

**Inter Integrated Circuit** I<sup>2</sup>C, è un sistema di comunicazione seriale bifilare utilizzato tra circuiti integrati. Il classico bus I<sup>2</sup>C è composto da almeno un master ed uno slave. 27

**Local Authentication Provider** Gestisce l'autenticazione degli utenti che vogliono accedere e controllare i vari sensori. 51

**Local Quality Supervisor** Integra i sistemi esistenti, unificandoli e migliorandone le pratiche di lavoro. 66

**Low Voltage Differential Signaling** É un sistema di trasmissione differenziale, ovvero trasmette le informazioni come differenza tra le tensioni presenti su una coppia di conduttori. Le due tensioni sono confrontate sul ricevitore. 21

**Master Control Program** Mantiene lo stato di esecuzione del rivelatore e del TriDAS. 52

**Oscillation Research with Cosmics in the Abyss** Telescopio dedicato alla rivelazione di neutrini in Francia. 7

**Phase Locked Loop** Costituisce un sistema di controllo automatico che consente di generare un segnale periodico la cui fase è in relazione fissa con quella di un segnale di riferimento. 25

**Precision Time Protocol** É un protocollo utilizzato per sincronizzare gli orologi in una rete di computer.. 23

**Production Readiness Reviews** Utilizzato per l'analisi finale dei prototipi. 66

**Quality Assurance** Parte della gestione della qualità incentrata sull'fornire fiducia che i requisiti di qualità siano soddisfatti. 65

**Quality Control** Parte della gestione della qualità incentrata sul rispetto dei requisiti di qualità. 65

**Quality Manager** Stesso ruolo dell'LQS. 66

**Quality Management System** Sistema che gestisce la qualità delle componenti dentro KM3NeT. 66

**Serial Peripheral Interface flash memory** Ha lo scopo di memorizzare quattro immagini dell'FPGA e dei parametri di configurazione del CLB. 24

**Signal Collection Board** Scheda per visualizzare i segnali trasmessi elettricamente e indicarne la sorgente. 21

**Simple Retransmission Protocol** La ritrasmissione è una richiesta di ripetizione automatica, ovvero è il rinvio di pacchetti che sono stati danneggiati o persi. 58

**Small Form-Factor Pluggable** È un modulo di interfaccia di rete compatto e *hot-pluggable* utilizzato per applicazioni di telecomunicazione e comunicazione dati.. 25

**Time over Threshold** È un'elaborazione del segnale di ampiezza temporale. Può ottenere informazioni sulla temporizzazione del trigger come fronte di salita del segnale di uscita, ulteriormente ottiene anche un'energia di radiazione incidente come ampiezza temporale del segnale di uscita. 21

**Time to Digital Converter** Strumento di misura digitale elettronico utilizzato per misurare intervalli temporali ad alta precisione che intercorrono tra eventi di varia natura. 21

**Times-Of-Arrival** Istante di tempo assoluto in cui un segnale radio proveniente da un trasmettitore raggiunge un ricevitore remoto. 56

**Transmission Control Protocol** Protocollo di rete a pacchetto di livello di trasporto, appartenente alla suite di protocolli Internet, che si occupa di controllo della trasmissione ovvero rendere affidabile la comunicazione dati in rete tra mittente e destinatario. 63

**TriDAS Manager** Gestore del TriDAS. 61

**Trigger and Data Acquisition System** Insieme di programmi sviluppati in conformità con i requisiti del framework KM3NeT per la raccolta e l'elaborazione dei dati. 49

**User Datagram Protocol** Protocollo di livello di trasporto a pacchetto, usato di solito in combinazione con il protocollo di livello di rete IP. 28

**White Rabbit PTP Core** Implementa il protocollo WR. 23





# Bibliografia

- [1] P. Musico, INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare *The Central Logic Board for the optical module of the KM3NeT detector*
- [2] S. Biagi INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare *The Central Logic Board and its auxiliary boards for the optical module of the KM3NeT detector*
- [3] S. Biagi et al., (KM3NeT Collaboration) *The data acquisition system of the KM3NeT detector*
- [4] E. Bogatin, *Signal and Power Integrity–Simplified*
- [5] D. Ballek et al., (MECO) *Robotic Car Controlled by Soft-Processor NIOS II Implemented in FPGA and Android Device as Remote Controller*
- [6] R. Herveille, *Wishbone System-on-Chip (SoC) Interconnection Architecture for Portable IP Cores*
- [7] P. Timmer, E. Heine and H. Peek *Very low power, high voltage base for a Photo Multiplier Tube for the KM3NeT deep sea neutrino telescope*
- [8] S. Adrián-Martínez et al., (KM3NeT collaboration) *A method to stabilise the performance of negatively fed KM3NeT photomultipliers*
- [9] E. Anassontzis et al., (KM3NeT Collaboration) *Design and development of the Power Converter Board within the Digital Optical Module in KM3NeT*
- [10] A. Margiotta, et al., (KM3NeT Collaboration) *KM3NeT front-end and readout electronics system: hardware, firmware, and software*
- [11] S. Adrián-Martínez et al 2016 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 43 084001, *Letter of intent for KM3NeT 2.0*
- [12] M. Ageron et al., (ANTARES Collaboration) *ANTARES: The first undersea neutrino telescope*

- [13] S. Aiello, et al.,(KM3NeT Collaboration) *The Control Unit of the KM3NeT Data Acquisition System*
- [14] R. Bruijn,(KM3NeT Collaboration) *KM3NeT Readout and Triggering*
- [15] S. Aiello, et al., (KM3NeT Collaboration) *Deep sea tests of a prototype of the KM3NeT digital optical module*
- [16] C. M. Mollo et al., *A new instrument for high statistics measurement of photomultiplier characteristics*
- [17] S. Aiello et al., (KM3NeT Collaboration) *The Control Unit of the KM3NeT Data Acquisition System*
- [18] C. Bozza, T. Chiarusi, R. Bruijn *The Control Unit of KM3NeT detectors*
- [19] C. Bozza, (KM3NeT Collaboration) *KM3NeT Acquisition Control*
- [20] C. Bozza, (KM3NeT Collaboration) *The Control Unit of KM3NeT data acquisition*
- [21] C. Bozza, (University of Salerno) *Control Unit Changes*
- [22] C. Pellegrino (UNIBO) *Study for a real-time alert system for multi-messenger astronomy with the KM3NeT/ARCA neutrino telescope*
- [23] C. Bozza, (University of Salerno) *Database Services in KM3NeT*
- [24] C. Pellegrino, (UNIBO, INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) *The Trigger and Data Acquisition System (TriDAS) of the KM3NeT experiment*
- [25] M. Carmelo et al., *Trigger and Data Acquisition System (TriDAS) for KM3NeT-Italy*
- [26] A. Grimm, (KM3NeT\_QA\_2014\_016) *Quality Plan for KM3NeT*
- [27] A. Miraglia, (INFN) *Produzione documentazione di progetto*
- [28] J. Carr et al., *Conceptual Design for a Deep-Sea Research Infrastructure Incorporating a Very Large Volume Neutrino Telescope in the Mediterranean Sea*