

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCATRONICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

STUDIO DI UN SISTEMA DI ACQUISIZIONE
E CONTROLLO IN AMBIENTE EPICS
PER LA DIAGNOSTICA DEI FASCI
DEL PROGETTO SPES

Relatore: Ch.mo Prof. ROBERTO OBOE

Correlatore: Dott. ALBERTO ANDRIGHETTO

Correlatore: Ing. ALBERTO MONETTI

Laureando: NICOLA SATTIN

Matricola: 1041167-IMC

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Alla mia famiglia
Ai miei amici
A tutte le persone che mi hanno sostenuto

Introduzione

Dall'inizio del ventesimo secolo si è affermata la crescente importanza della fisica nucleare, aprendo nuovi campi di ricerca e portando alla creazione di nuove tecnologie. Molte di queste hanno poi conosciuto applicazioni in un vasto numero di campi, come la medicina, l'industria e la fisica applicata, arrivando talvolta addirittura ad influenzare usi e costumi della società, basti pensare all'invenzione del "Web" presso i laboratori del CERN.

Nel corso degli anni l'Europa ha assunto la leadership in questo campo di ricerca e sta pianificando la costruzione di una nuova generazione di *facility* per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica e di fornire un valido strumento per applicazioni di tipo medico ed industriale. All'interno del programma partecipa attivamente, con il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*), anche l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Legnaro; tale progetto prevede la costruzione di una *facility* per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni (*neutron-rich*) e di alta qualità, nel range di massa compreso tra 80 e 160 *uma*. La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede l'impiego di tecnologie estremamente complesse ed innovative, che si ottengono tramite il bombardamento di un bersaglio (*target*) in carburo di uranio con un fascio primario di protoni in modo da generare, tramite una reazione nucleare, specie radioattive all'interno del target stesso. Tali particelle vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivi.

Per il progetto SPES, è stato scelto EPICS (*Experimental Physics and Industrial Control System*) come quadro generale per lo sviluppo dei sistemi di controllo. L'architettura generale del sistema è basata su una serie di IOC (*Input/Output Controllers*) distribuiti, per il controllo della strumentazione dell'acceleratore, usando un protocollo di comunicazione proprio chiamato Channel Access (*CA*). Dall'altra parte, per applicazione critiche dal punto di vista della sicurezza, è stato scelto l'utilizzo di PLC (*Programmable Logic Controllers*), invece di controlli EPICS nativi. Queste applicazioni comprendono fondamentalmente sistemi di interlocks per sistemi di protezione sia per le persone (*PPS*) sia per le machine (*MPS*). Inoltre, per i sistemi di protezione alle persone, devono essere usati PLC di sicurezza certificati. Dato che i PLC controlleranno direttamente ogni sistema, deve essere disponibile una interfaccia di comunicazione verso EPICS in modo da condividere i valori di processo col resto della strumentazione della facility.

La costruzione del progetto SPES ai LNL ha richiesto una revisione ed aggiornamento di molti sistemi di controllo presenti nei laboratori, in particolare quelli che saranno interconnessi con SPES, come nel caso del sistema di controllo del LINAC (*Linear Accelerator*) superconduttivo ALPI. Questi rinnovamenti permetteranno le interconnessioni ed interoperabilità di tutti i sistemi, usando il CA di EPICS come protocollo di comunicazione generale. Questo implica che devono essere sviluppati IOC EPICS, non solo per la strumentazione di SPES, ma anche per tutta la strumentazione presente nel complesso di acceleratori dei LNL. Conseguentemente, è fondamentale una standardizzazione del sistema hardware e software usato per lo sviluppo dei sistemi di controllo.

In questo contesto, è evidente la necessità di controllori fatti a misura con diverse funzionalità integrate per coprire le necessità di molti sottosistemi, come ad esempio, tape systems, charge breeder, target e ion source, ecc. Questa necessità ha promosso lo sviluppo di piattaforme hardware standard per gli IOC EPICS che saranno usati per tutti i sistemi di controllo futuri. Questo aiuterà a ridurre considerevolmente i costi e l'impiego di manutenzione.

Il progetto SPES ed il sistema di acceleratori ai LNL richiedono una soluzione robusta e standard, la quale possa operare sotto condizioni industriali ed essere costruita con componenti hardware che abbiano una disponibilità in mercato per la maggiore parte

del ciclo di vita utile degli acceleratori. Per questo motivo, gli IOC EPICS sono stati sviluppati usando come piattaforma hardware il form factor COM (*Computer-on-Module*). I dispositivi periferici necessari per lo sviluppo di tutti i sistemi di controllo previsti ai LNL saranno connessi al modulo COM, come per esempio ADCs, DACs, motori a passo, ecc. Tutti questi dispositivi periferici saranno installati su una Carrier Board insieme al modulo COM. Questo nuovo IOC è inteso come un blocco standard di costruzione per tutti i sistemi di controllo ai LNL. Nei prossimi anni, tutti i nuovi sistemi di controllo punteranno a questo dispositivo hardware.

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel progetto SPES, ed è volto alla progettazione e test di strumenti per la diagnostica del fascio, nell'ottica di una loro probabile implementazione all'interno del sistema di controllo, che è in fase di definizione.

Questo elaborato si divide in sei capitoli, il cui contenuto viene di seguito brevemente riassunto:

Capitolo 1: La prima parte del capitolo si sofferma sulla descrizione della metodologia ISOL per la produzione di fasci di ioni radioattivi. Successivamente si passa ad illustrare le principali caratteristiche del progetto SPES, in fase di sviluppo presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Infine vengono elencate le principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi nei campi di interesse della fisica nucleare, dell'astrofisica, della scienza dei materiali e della medicina;

Capitolo 2: In questo capitolo viene presentato nel dettaglio il sistema di controllo del progetto SPES chiarendone le principali caratteristiche riguardanti la comunicazione ed il funzionamento dell'ambiente EPICS, l'architettura hardware del PC COM e l'implementazione software degli IOC. Vengono poi presentate le modifiche al sistema di controllo del laboratorio off-line del progetto SPES che sono state realizzate durante il periodo di tesi;

Capitolo 3: In questo capitolo viene descritta la realizzazione dell'IOC per lo strumento di misura nanodac della casa Eurotherm[®]. Per questo registratore è stato realizzato il driver di comunicazione con la rete EPICS, il programma di controllo e lettura delle variabili di processo, l'interfaccia operatore per il controllo remoto dello strumento e la verifica del corretto funzionamento all'interno del laboratorio;

Capitolo 4: Tra gli strumenti della diagnostica del fascio troviamo il beam profiler e la faraday cup. A causa della standardizzazione della facility è stato necessario modificare le schede elettroniche in modo opportuno per riuscire ad acquisire i segnali tramite il PC COM. Questo capitolo descrive la progettazione e la scelta dei componenti che hanno portato alla realizzazione delle schede;

Capitolo 5: In questo capitolo vengono descritte le fasi di progettazione, realizzazione e test di una scheda elettronica in grado di comandare delle elettrovalvole. Tale accorgimento ha permesso il passaggio dalla movimentazione elettrica a quella pneumatica, la quale ha il pregio di essere meno suscettibile alle radiazioni;

Capitolo 6: In quest'ultimo capitolo vengono descritti i futuri sviluppi riguardanti il sistema di controllo del laboratorio off-line del progetto SPES. Sono presentate diverse soluzioni ai problemi di diagnostica del canale protonico, alla verifica strutturale del target e all'emittance meter. Successivamente viene sviluppata quella valutata migliore.

Indice

Introduzione	v
Indice	vii
1 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro	3
1.3 La produzione di fasci di ioni radioattivi (SPES- β)	4
1.4 Configurazione della <i>facility</i>	6
1.4.1 L'acceleratore primario	6
1.4.2 Il target di produzione e il sistema di estrazione e di ionizzazione	7
1.4.3 Separatori magnetici e post accelerazione	14
1.4.4 I sistemi di movimentazione	15
1.5 Applicazioni dei fasci di ioni esotici	16
1.5.1 Applicazioni in fisica nucleare	16
1.5.2 Applicazioni nella fisica dello stato solido	18
1.5.3 Applicazioni in medicina nucleare	20
1.5.4 Applicazioni in astrofisica	22
1.6 Conclusioni	22
2 Il sistema di controllo del progetto SPES	25
2.1 Introduzione	25
2.2 EPICS (<i>Experimental Physics and Industrial Control System</i>)	26
2.3 CSS (<i>Control System Studio</i>)	28
2.4 I sistemi di controllo nel progetto SPES	29
2.4.1 Impatto sui sistemi di controllo degli acceleratori ai LNL	30
2.5 IOC standard dei sistemi di controllo in EPICS	31
2.5.1 Descrizione dell'IOC	31
2.5.2 Architettura Hardware	33
2.5.3 Implementazione del software	33
2.6 Sviluppi apportati al sistema di controllo	35
2.6.1 Sviluppo del sistema di acquisizione di temperatura per il monitoraggio della camera target	35
2.6.2 Progettazione del sistema di condizionamento dei segnali per la diagnostic box del progetto SPES	36
2.6.3 Sviluppo della scheda elettronica di comando dei motori pneumatici	39
2.7 Conclusioni	40
3 Driver dello strumento di misura “nanodac” attraverso il software EPICS	41
3.1 Introduzione allo strumento di registrazione/regolazione “nanodac”	41
3.2 Presentazione del protocollo di comunicazione modbus	41
3.2.1 Formato dei messaggi	42
3.3 Progettazione del driver	44
3.3.1 Creazione dell'IOC per lo strumento nanodac	44
3.3.2 Creazione dei database per l'IOC	47
3.3.3 Porte utilizzate per la configurazione dello strumento	49
3.4 Installazione dell'hardware dello strumento	49

3.5	Sviluppo di un'interfaccia di controllo tramite CSS	52
3.6	Test effettuati per verificare la strumentazione	54
3.6.1	Prove con il software “ <i>iTools Engeneering Studio</i> ”	54
3.6.2	Prove con il software “ <i>Simply Modbus TCP Client</i> ”	54
3.6.3	Installazione della strumentazione all'interno del laboratorio off-line del front-end	55
3.7	Verifica della temperatura della camera target.	56
3.8	Conclusioni	58
4	Nuova acquisizione della diagnostica di fascio	59
4.1	Introduzione al <i>beam profiler</i> ed alla <i>faraday cup</i>	59
4.1.1	Descrizione degli strumenti di diagnostica	59
4.1.2	Acquisizione della diagnostica del fascio	63
4.2	Motivazione delle modifiche apportate alla diagnostic box	63
4.3	Presentazione della componentistica elettronica	66
4.3.1	Amplificatore logaritmico LOG112	66
4.3.2	Multiplexer analogico DG408	67
4.3.3	Microcontrollore PIC18F27J13	67
4.3.4	Buffer 74HCT365D	68
4.3.5	Alimentatore MCP1827S330	68
4.4	Progettazione del circuito stampato	68
4.4.1	Dimensionamento delle piste	69
4.4.2	Creazione dei file gerber	71
4.5	Implementazione delle schede in EPICS	71
4.5.1	Faraday Cup Database	74
4.5.2	Beam Profiler Database	74
4.6	Conclusioni	75
5	Progettazione della scheda elettronica per la movimentazione degli strumenti di diagnostica	77
5.1	Il sistema di movimentazione pneumatica	77
5.1.1	I motori rotativi pneumatici	78
5.1.2	Le elettrovalvole	82
5.1.3	Gli interruttori di finecorsa	83
5.2	Presentazione della componentistica elettronica	84
5.2.1	Buffer 74HCT365D	84
5.2.2	Relè a stato solido DC60P	84
5.2.3	Pull Up network	84
5.3	Diagramma di flusso	85
5.4	Test tramite strumentazione di prova	85
5.5	Progettazione del circuito stampato	89
5.5.1	Dimensionamento delle piste	89
5.6	Implementazione della scheda in EPICS	91
5.6.1	Pneumatic board database	91
5.7	Conclusioni	91
6	Proposta di aggiornamento dei sistemi di controllo nel laboratorio off-line del Front-End	93
6.1	Progetto preliminare dei sistemi di controllo del canale protonico	94
6.1.1	Studio di fattibilità per l'elaborazione dei segnali della box di diagnostica del canale protonico	95
6.1.2	Soluzione proposta	97

6.2	Progetto preliminare dei sistemi di controllo del dump di sicurezza della camera target	99
6.2.1	Possibile soluzione per il dump nella camera	100
6.3	Progetto preliminare per il miglioramento dell'emittance meter	101
6.3.1	Soluzioni possibili per la disposizione dell'emittance meter	103
6.3.2	Soluzione proposta	104
6.4	Conclusioni	106
Conclusioni		107
Bibliografia		109
A Specifiche tecniche delle schede Adlink		111
A.1	COM Express-IB-i3-3120ME	111
A.2	DAQe-2214	115
A.3	PCIE-6216	117
B Installazione del software EPICS		119
B.1	Installazione EPICS base	119
B.2	Installazione del Sequencer	120
B.3	Installazione Asyn driver	121
B.4	Installazione protocollo Modbus	121
B.5	Installazione <i>sysv-rc-softioc</i>	122
C Source Code dell'IOC per lo strumento "nanodac"		125
C.1	configure/RELEASE	125
C.2	iocBoot/iocTaIoni_Tmcp/st.cmd	125
C.3	TaIoni_TmcpApp/src/Makefile	126
C.4	TaIoni_TmcpApp/src/include.dbd	127
C.5	TaIoni_TmcpApp/Db/read_nanodac.db	127
C.6	TaIoni_TmcpApp/Db/configure_nanodac.db	130
C.7	TaIoni_TmcpApp/Db/eurotherm.substitution	131
C.8	TaIoni_TmcpApp/Db/Makefile	132
C.9	config	132
D Disegni delle schede elettroniche di beam profiler e farady cup		135
E Disegni della scheda elettronica della pneumatic board		147
F Source Code dell'IOC per la scheda pneumatica		151
F.1	iocBoot/iocpneumatic_board/st.cmd	151
F.2	pneumatic_motoApp/src/Makefile	152
F.3	pneumatic_motoApp/src/include.dbd	153
F.4	pneumatic_motoApp/Db/pneumatic_moto.substitutions	153
F.5	pneumatic_motoApp/Db/d_dir.template	154
F.6	pneumatic_motoApp/Db/do.template	154
F.7	pneumatic_motoApp/Db/di.template	154
F.8	pneumatic_motoApp/Db/calcout.template	155
Ringraziamenti		157

Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici

1.1 Introduzione

Le proprietà della materia sono strettamente influenzate dalle caratteristiche degli atomi che la costituiscono, dalle loro interazioni e dalla loro disposizione nello spazio. Il livello atomico quindi costituisce la base fondamentale per poter studiare e comprendere la materia. In particolare la massa dell'atomo si concentra per lo più nel nucleo (circa il 99,9% del totale), di conseguenza è quest'ultimo che ne determina le caratteristiche principali e l'elemento di appartenenza. Il nucleo è costituito da particelle, genericamente dette nucleoni, tra le quali si possono distinguere i protoni e i neutroni. Tali particelle sono di massa molto simile tra loro circa $(1,67 \cdot 10^{-24} \text{ g})$, la differenza risiede nel fatto che i protoni sono dotati di carica elettrica positiva ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), mentre i neutroni sono elettricamente neutri [1]. Il numero di protoni (Z) presenti in un atomo identifica in maniera esclusiva l'elemento di appartenenza, mentre il numero di neutroni (N) può essere variabile. La somma di questi due numeri viene detta numero di massa ed è convenzionalmente indicata con $A = Z + N$. Atomi con lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni sono detti isotopi dello stesso elemento, e vengono identificati mediante il numero di massa.

Poichè nel nucleo sono presenti particelle cariche dello stesso segno, tra di esse insorge un'azione repulsiva di tipo coulombiano che tende a rendere instabile il nucleo causandone la disgregazione. Tuttavia la stabilità e quindi l'integrità del nucleo è garantita dalla presenza di una forza nucleare detta interazione forte, la quale contrasta efficacemente la repulsione elettrostatica tra protoni carichi positivamente. Tale interazione si manifesta con particolare intensità in distanze tipiche delle dimensioni nucleari, per questo motivo la rottura di un nucleo richiede molta energia. Il ramo della fisica che si occupa della definizione e dello studio delle proprietà dei nuclei è detto fisica nucleare.

I nuclei stabili (non radioattivi) in genere possiedono un egual numero di protoni e di neutroni [2], dal momento che la forza attrattiva tra neutroni e protoni è leggermente più intensa di quella tra nucleoni dello stesso tipo. Tuttavia per numeri di massa atomica superiore al 40, le forze elettrostatiche diventano più significative, spostando quindi la stabilità degli atomi verso quelli con numero di neutroni più elevato rispetto ai protoni. Infatti, l'aggiunta di un maggior numero di particelle neutre non alimenta l'azione della repulsione elettrostatica ma consente di aumentare solamente l'interazione nucleare. Tuttavia la presenza della forza coulombiana limita superiormente la presenza di atomi super pesanti. Infatti con l'aumento della massa dell'atomo si manifesta necessariamente un aumento delle sue dimensioni e quindi delle distanze tra i nucleoni. Questo si traduce in una perdita di efficacia dell'interazione nucleare forte, che è un'azione a corto raggio, rendendo quindi il nucleo instabile. Tali informazioni sono rappresentate dalla carta dei nuclidi (figura 1.1).

La carta dei nuclidi individua gli isotopi in base al loro numero di neutroni e di protoni. In ordinata sono posti il numero di protoni (Z), mentre l'asse delle ascisse rappresenta il numero di neutroni (N). In nero sono indicati i nuclei stabili, e come già enunciato, si osserva che a bassi numeri di massa i nuclei stabili sono distribuiti pressochè lungo una retta inclinata di 45° ($Z=N$). I nuclei con eccesso o difetto di neutroni (proton-rich e

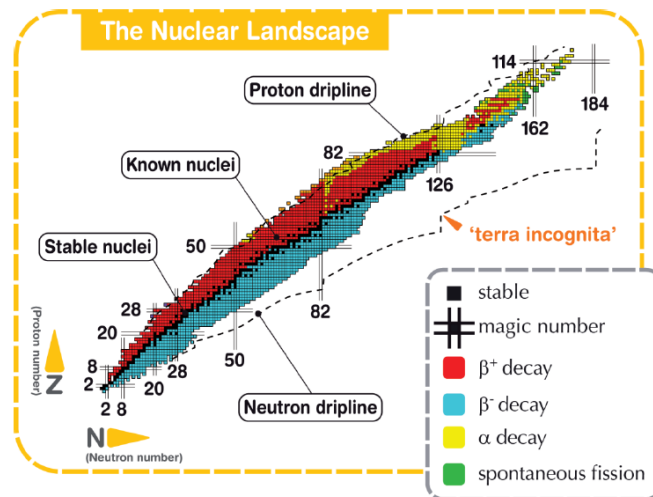


Fig. 1.1: Carta dei nuclidi

neutron-rich rispettivamente) sono distanti dalla valle di stabilità e decadono con emissione di particelle o radiazioni elettromagnetiche a seconda della loro natura. Si individuano quindi quattro tipologie di decadimenti nucleari possibili [3]:

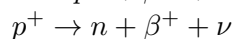
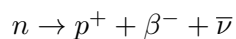
- Decadimento alfa: Tipico di atomi con $Z > 83$, avviene per mezzo dell'emissione di una particella α . Tali particelle equivalgono ad un nucleo di ${}^4\text{He}$ (2 protoni e 2 neutroni), pertanto il risultato è la diminuzione sia del numero di massa A , che del numero atomico Z secondo lo schema:

$$ZD = Z - 2$$

$$AD = A - 4$$

Dove ZD e AD sono rispettivamente il numero atomico e il numero di massa dopo il decadimento.

- Decadimento beta, che si può manifestare secondo due schemi di reazione:



Nel primo caso si ha il decadimento β^- , caratteristico dei nuclidi rappresentati in blu in figura 1.1, cioè isotopi con un eccesso di neutroni e quindi al di sotto della valle di stabilità. L'emissione di particelle β^- comporta la perdita dei neutroni in eccesso, e quindi la tendenza ad avvicinarsi alla valle di stabilità. Il decadimento consiste nella trasformazione di un neutrone in un protone, accompagnato dalla perdita di una particella β^- (elettrone) e di un antineutrino in modo da garantire il bilanciamento della reazione sia per la carica che per la massa.

Il secondo schema di reazione invece è chiamato decadimento β^+ ed è tipico dei nuclei con eccesso di protoni e quindi al di sopra della valle di stabilità (in rosso in fig. 1.1). Tali nuclidi tendono a trasformare i protoni in neutroni per ri-acquisire stabilità, con emissione di un positrone (β^+) e di un neutrino.

- Fissione spontanea: avviene in alcuni nuclei molto pesanti (in verde in fig. 1.1) e consiste nella loro spontanea suddivisione in due diversi atomi. Ad esempio l'isotopo ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ ¹ da luogo spontaneamente alla reazione ${}^{252}_{98}\text{Cf} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{108}_{44}\text{Ru} + {}^1_0n + Q$, in cui Q è l'energia liberata nel processo.

¹La formula " ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ " indica che sto considerando un elemento che ha come numero di massa 252, come numero atomico 98, ed il simbolo chimico Cf indica che ho preso in considerazione il Californio.

- Emissione di raggi γ : è in genere una forma di decadimento successiva o contemporanea ad una di quelle elencate in precedenza in quanto consiste solamente nell'emissione di radiazioni elettromagnetiche e non provoca alcuna variazione a livello delle specie atomiche interessate. Tale fenomeno è imputabile al fatto che i nuclei neofornati, chiamati nuclei figli, sono caratterizzati spesso da uno stato di eccitazione che provoca l'emissione di radiazione elettromagnetica ad alta frequenza.

Attualmente sono state studiate le proprietà nucleari di circa 3600 nuclei, che possono essere prodotti con più o meno facilità nelle diverse *facilities* nel mondo. I nuclei radioattivi sono chiamati esotici e in base a stime calcolate secondo modelli teorici, si ritiene che possano essere fino a 6000. Tali nuclei si trovano all'interno delle driplines, indicate in fig. 1.1, linee che delimitano il campo di esistenza di possibili nuclei e oltre le quali l'instabilità sarebbe tale da impedirne l'esistenza. Sono ancora molti i nuclei incogniti all'interno di questo campo, soprattutto nella regione dei nuclei neutron-rich, cioè al di sotto della valle di stabilità. La carta dei nuclidi (figura 1.1) fornisce inoltre alcune indicazioni su particolari numeri di protoni o neutroni, detti numeri magici. Tali numeri corrispondono a configurazioni nucleari (numero di nucleoni) che rendono il nucleo particolarmente stabile. Numeri magici sono ad esempio 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Nuclei che hanno sia il numero di protoni che il numero di neutroni uguale ad uno dei numeri magici sono ancora più stabili e sono detti nuclei doppiamente magici. I nuclei doppiamente magici presenti in natura sono quattro e sono: ${}^4\text{He}(2, 2)$, ${}^{16}\text{O}(8, 8)$, ${}^{40}\text{Ca}(20, 20)$, ${}^{208}\text{Pb}(82, 126)$.

Lo studio dei nuclei instabili ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare e ha portato ad importanti applicazioni in fisica dello stato solido, astrofisica ed infine in medicina nucleare grazie allo studio e alla produzione di radionuclidi per la terapia e la diagnosi.

1.2 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

SPES (*Selective Production of Exotic Species*) è un progetto multidisciplinare il cui principale obiettivo è quello di creare un apparato sperimentale in grado di produrre fasci di ioni radioattivi, chiamati RIB (*Radioactive Ion Beam*), per studi di fisica nucleare fondamentale e per lo studio di nuclei atomici instabili. Tali nuclei non sono presenti naturalmente, ma sono prodotti durante le fasi conclusive della vita delle stelle, dalle quali tutti gli elementi sono generati.

Al giorno d'oggi la maggior parte delle conoscenze a proposito delle proprietà nucleari deriva dallo studio dei nuclei localizzati nella valle di stabilità o da nuclei con una carenza di neutroni. Si ritiene che lo studio di nuclei atomici con un largo eccesso di neutroni o protoni possa consentire la scoperta di nuove proprietà della struttura nucleare.

Sono state previste quattro fasi per il progetto:

1. SPES- α : questa fase prevede l'acquisizione, l'installazione e la messa in opera di un ciclotrone ad alte prestazioni con un'alta corrente in uscita ($\approx 0.7 \text{ mA}$) e ad alta energia (fino a 70 MeV^2), oltre all'infrastruttura per l'acceleratore e alle aree sperimentali. Il ciclotrone sarà provvisto di due porte di uscita per consentire la realizzazione della doppia missione del laboratorio: la ricerca di base e le applicazioni tecnologiche. Uno dei due fasci sarà dedicato alla *facility* di fisica nucleare, per la produzione di ioni ricchi di neutroni per collisione di protoni su un target di UCx, il secondo sarà dedicato a studi di fisica applicata.

²In fisica l'elettronvolt (simbolo eV) è un'unità di misura dell'energia, molto usata in ambito atomico e subatomico. Viene definito come l'energia guadagnata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, quando viene mosso nel vuoto tra due punti di una regione in cui ha sede un potenziale elettrostatico, tra i quali vi è una differenza di 1 volt

2. SPES- β : prevede l'accelerazione di specie neutron-rich verso dei target adatti. Nelle collisioni verranno prodotti nuclei nuovi, con un largo eccesso di neutroni, simili a quelli generati nelle fasi terminali della vita delle stelle e che non sono presenti sulla Terra, a causa della loro brevissima vita. La ricerca in questo ambito rappresenta una nuova frontiera della fisica per estendere la conoscenza di nuclei in condizioni estreme e per fornire informazioni di base nello studio dell'evoluzione stellare.
3. SPES- γ : questa fase riguarda la produzione di radionuclidi di interesse medico mediante l'uso del ciclotrone SPES- α . L'obiettivo è la produzione di radiofarmaci innovativi (come quelli basati su $Sr-82/Rb-82$ e $Ga-68/Ge-68$) e di radionuclidi convenzionali con nuovi approcci basati sull'uso dell'acceleratore.
4. SPES- δ : prevede lo sviluppo di un'intensa sorgente neutronica, dal ciclotrone e/o da un acceleratore lineare ad alta intensità basato sulla radio-frequency quadrupole technology (RFQ). Applicazioni della sorgente neutronica si estendono dall'astrofisica nucleare, alla caratterizzazione dei rifiuti nucleari o a trattamenti sperimentali di tumori.

1.3 La produzione di fasci di ioni radioattivi (SPES- β)

La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede la costruzione di apparati, detti *facilities*, capaci di produrre fasci (RIB, Radioactive Ion Beams) di elevata purezza, intensità ed energia. In Europa e nel resto del mondo vi sono numerose *facilities* operanti per la produzione di fasci radioattivi; la maggior parte di esse sono basate sulla tecnica ISOL [3].

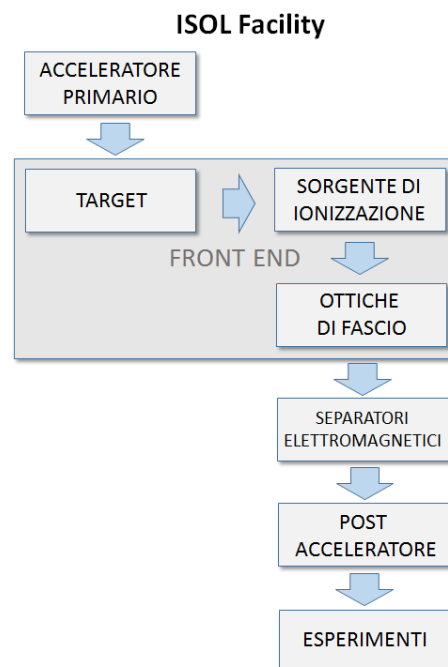


Fig. 1.2: Schema di una *facility* di tipo ISOL

In figura 1.2 viene rappresentato lo schema di una *facility* di tipo ISOL. La tecnica ISOL (Isotope Separation On-Line) consiste nella separazione degli isotopi in linea. *Facilities* di questa tipologia sono generalmente composte da:

- l'acceleratore primario;

- il complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione;
- il front-end;
- i separatori di massa ed isobari;
- il post acceleratore.

L'acceleratore primario è studiato per fornire un fascio di particelle della voluta energia che viene quindi fatto collidere su un bersaglio (target) di materiale fissile. In quest'ultimo, a seguito di reazioni nucleari di vario tipo (fissione, spallazione, frammentazione, ecc.), si ha la generazione di isotopi radioattivi. I radioisotopi³ così prodotti possono uscire dal target ed essere ionizzati. Grazie alla carica acquisita possono quindi essere estratti ed accelerati con una differenza di potenziale, formando un fascio di particelle radioattive (RIB). Il primo stadio di accelerazione avviene nel front-end in cui il fascio viene opportunamente focalizzato e successivamente separato in massa tramite un separatore magnetico di tipo Wien Filter. L'azione di tale separatore permette di ottenere un fascio isobaricamente puro. Infine il fascio è accelerato dal post acceleratore al livello di energia richiesto dal particolare esperimento. L'intensità del fascio radioattivo prodotto è usualmente descritta dall'equazione 1.3.1:

$$I = \sigma \cdot \Phi \cdot N \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \quad (1.3.1)$$

dove:

- σ è la sezione d'urto per le reazioni nucleari, ossia la probabilità che avvenga una certa reazione nucleare;
- Φ è l'intensità del fascio primario;
- N è lo spessore del target;
- ε_1 è l'efficienza di rilascio del target;
- ε_2 è l'efficienza di ionizzazione;
- ε_3 è l'efficienza del processo di estrazione e trasporto.

Una corretta configurazione del complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione è cruciale per un'efficiente funzionamento di una *facility* di tipo ISOL. Gli obiettivi che stanno alla base del dimensionamento sono:

- la riduzione del tempo di ritardo;
- la massimizzazione della produzione senza deterioramento della purezza del fascio.

La separazione dei prodotti radioattivi dal substrato del target e l'estrazione dei nuclei esotici, sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura, infatti all'aumentare del livello termico di essa, la velocità di diffusione delle particelle manifesta un incremento. Ciò risulta importante soprattutto per atomi radioattivi a breve emivita⁴, in quanto un rapido rilascio evita una perdita di questi atomi per decadimento. Per questo motivo il sistema deve essere mantenuto alla maggior temperatura possibile.

In ambito europeo le opportunità scientifiche offerte dai RIB ed i notevoli problemi tecnologici ad essi associati, hanno portato la comunità scientifica a proporre la costruzione

³Un radionuclide è un nuclide instabile che decade emettendo energia sotto forma di radiazioni. I radioisotopi sono isotopi radioattivi, cioè radionuclidi di uno stesso elemento chimico

⁴L'emivita è un parametro farmacocinetico che indica il tempo richiesto per ridurre del 50% la quantità di un farmaco nel plasma o nel siero (nel sangue).

di una rete di *facilities* complementari, definite di intermedia generazione, fondamentali per arrivare alla costruzione di un'unica grande *facility* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL [5]. Data la portata di tale progetto, sono coinvolti nell'iniziativa i principali laboratori nucleari europei con l'obiettivo dello studio e della progettazione di una struttura per la produzione di fasci di ioni radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile. In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), presso i quali è in corso la costruzione di una *facility* ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (Selective Production of Exotic Species) [6]. Tale progetto è coordinato a livello nazionale da INFN, ENEA (Bologna), Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e a livello internazionale prevede strette collaborazioni con CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

1.4 Configurazione della *facility*

La *facility* è principalmente dedicata alla produzione di radioisotopi neutron-rich con masse da 80 a 160 uma (unità di massa atomica) a seguito di fissione di ^{238}U con una resa massima di 10^{13} fissioni/s. La fissione è resa possibile dal bombardamento con un fascio protonico a 40 MeV, detto fascio primario, di un adeguato target costituito da sette dischi in carburo di uranio (UCx). Essendo il livello di radioattività stimato nel target di produzione molto elevato, è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture in modo da garantire la sicurezza in termini di radioprotezione. In figura 1.3 viene rappresentata la struttura dei laboratori esistenti, dove si distinguono il post acceleratore "ALPI" (acceleratore LINAC superconduttore), il CB (*Charge Breeder*) per aumentare lo stato di carica del fascio, l'HRMS (*High-Resolution Mass Separator*) per selezionare isobaricamente il fascio voluto ed il RFQ (*Radio-Frequency Quadrupole*) per la ri-accelerazione. Questo laboratorio è integrato al laboratorio SPES, mentre in figura 1.4 viene mostrata una schematica rappresentazione della *facility* SPES.

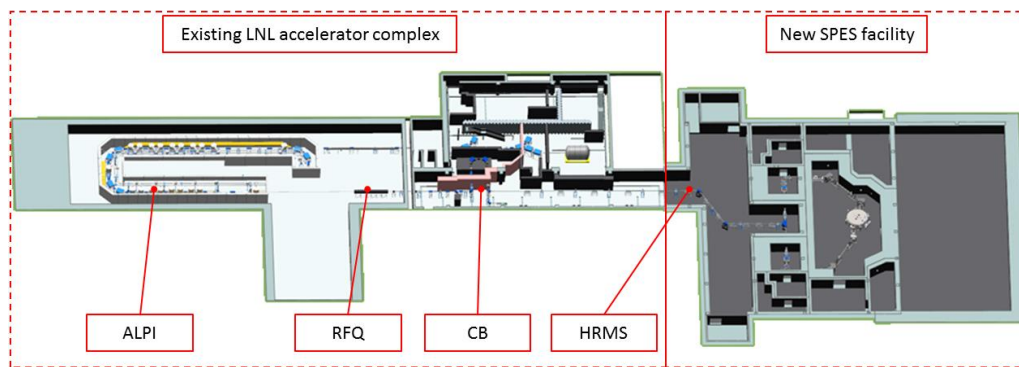


Fig. 1.3: Il progetto SPES integrato con il complesso degli acceleratori presenti a LNL

Vengono di seguito descritti i principali elementi che compongono la *facility*.

1.4.1 L'acceleratore primario

L'acceleratore primario ha la funzione di produrre un fascio protonico in grado di colpire il target di uranio in cui avviene la reazione di fissione nucleare. L'acceleratore utilizzato per la *facility* SPES è un ciclotrone. Tale dispositivo è in grado di garantire le performance richieste per la produzione di fasci di ioni esotici ed offre la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio in modo completamente indipendente. Il mercato offre oggi la

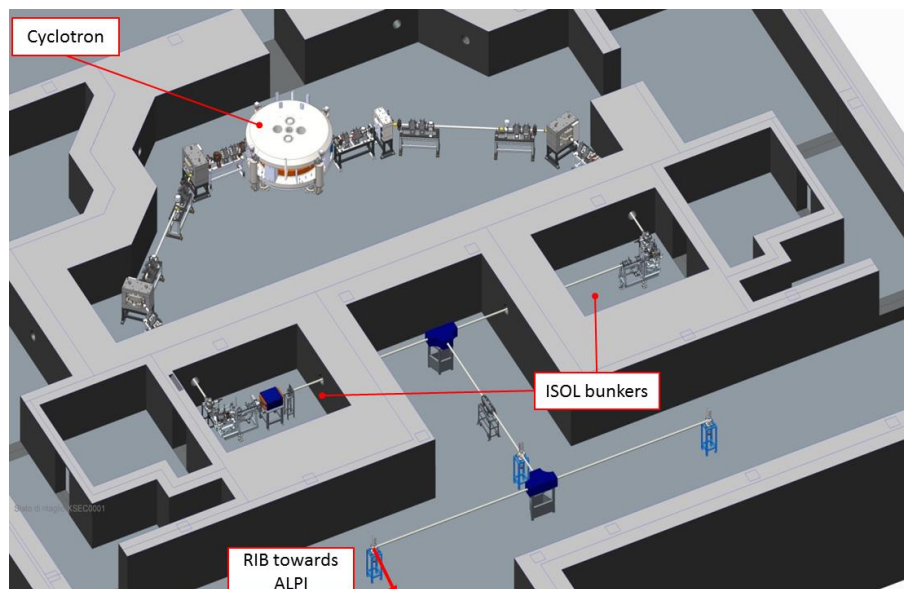


Fig. 1.4: layout del progetto SPES

possibilità di produrre, con la tecnologia del ciclotrone, fasci di intensità anche superiori a quelle richieste del progetto SPES.

Il ciclotrone scelto per il progetto SPES è il “BEST 70p”, sviluppato dalla “Best Cyclotron” e mostrato in figura 1.5, il quale è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70 MeV di energia ed aventi una corrente massima di 750 μA .

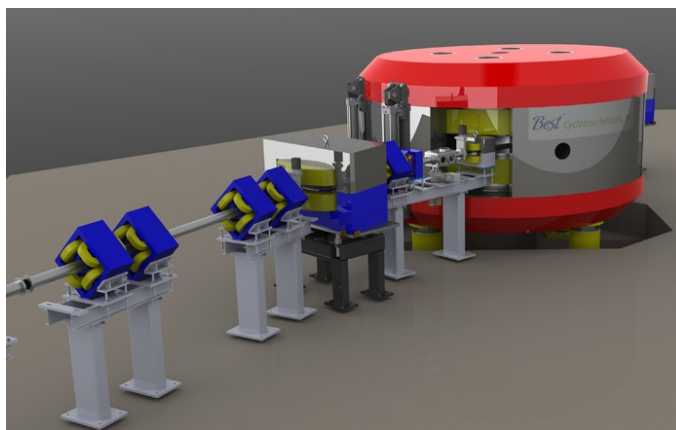


Fig. 1.5: Il ciclotrone BEST 70p

In figura 1.6 alcune foto delle fasi di installazione del ciclotrone Best 70p all'interno dell'edificio SPES.

1.4.2 Il target di produzione e il sistema di estrazione e di ionizzazione

Sia il target di produzione dei radioisotopi che quello di ionizzazione degli stessi, sono contenuti all'interno di una camera di forma cilindrica (*camera target*), la quale viene raffreddata mediante un opportuno circuito dell'acqua per le elevate potenze in gioco (vedi figura 1.7). Sempre a causa delle alte temperature, per evitare l'ossidazione dei componenti presenti, l'interno della camera viene mantenuto in condizioni di alto vuoto (con pressioni dell'ordine dei 10^{-6} mbar). Questa condizione è inoltre necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte. Il volume della



Fig. 1.6: Fasi di installazione del ciclotrone presso i L.N.L. (Maggio 2015)

camera è delimitato dallo spallamento di una flangia (*plate*) e da un coperchio (*cover*) a forma di pentola, entrambi realizzati in lega di alluminio, mentre la tenuta a vuoto è garantita da un *O-Ring*.

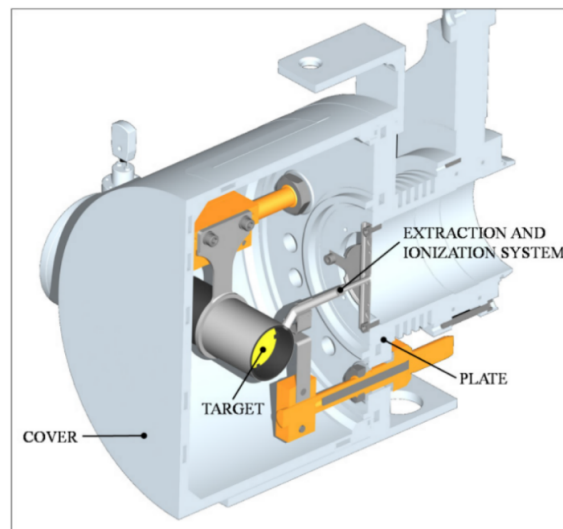


Fig. 1.7: Configurazione della camera target

Il target è composto da sette dischi coassiali in UCx, aventi 40 mm di diametro e circa 1 mm di spessore ed opportunamente distanziati in direzione assiale, al fine di dissipare attraverso radiazione termica la potenza sviluppata dal fascio di protoni. Essi sono contenuti in una scatola (*box*), un tubo cavo di grafite, avente un diametro esterno e una lunghezza di 49 e 200 mm rispettivamente (vedi figura 1.8). Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa una finestra in grafite (*window*), molto sottile per non attenuare l'energia del fascio, ma di fondamentale importanza poichè consente di confinare gli isotopi prodotti nella zona attiva e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio. Dopo aver investito la finestra di grafite e i dischi di UCx, il fascio primario va a impattare su tre dumper e sul fondo scatola (*box base*); questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio, per evitare l'attivazione della camera esterna, sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del target [9].

La scatola deve mantenere la temperatura media di 2000°C, in modo da migliorare l'estrazione dei prodotti di fissione. Essendo la potenza del fascio di protoni non sufficiente a portare il target al livello di temperatura richiesto, è necessario introdurre un dispositivo indipendente avente la funzione di riscaldare e schermare il target. Inoltre, il sistema di

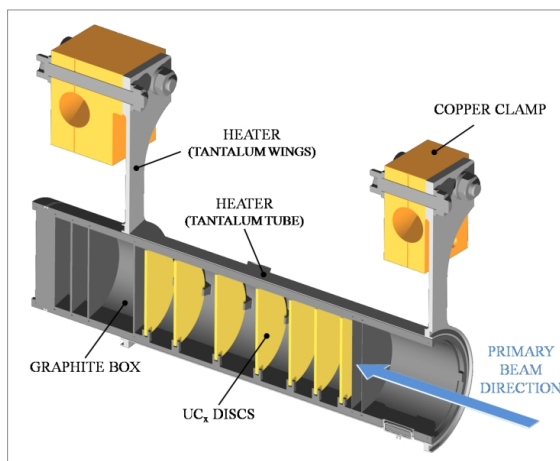


Fig. 1.8: Rappresentazione di un prototipo di bersaglio diretto del progetto SPES

riscaldamento supplementare consente di evitare improvvisi sbalzi di temperatura molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi. Il riscaldatore (*heater*) è composto da un tubo molto sottile (*tube*) saldato ai bordi tramite due ali (*wings*), direttamente collegate ai morsetti in rame (*clamps*). Attraverso i morsetti è possibile far dissipare per effetto Joule il desiderato quantitativo di potenza al riscaldatore. La dissipazione di potenza (dovuta all'effetto Joule) in aggiunta al calore sviluppato dalla fissione nucleare, fa in modo che la temperatura del sistema scatola-dischi sia mantenuta al valore di utilizzo. Il materiale scelto per il riscaldatore è il tantalio. Si tratta di un metallo altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre energia elettrica e termica e di raggiungere temperature molto elevate [7].

Il processo di fissione nucleare, che si manifesta quando il fascio di protoni investe i sette dischi in carburo di uranio, produce nuclei radioattivi aventi massa compresa tra gli 80 ed i 160 uma. Per la produzione di un RIB, la specie esotica desiderata deve essere estratta dal target e ionizzata. Tale processo richiede del tempo e non è particolarmente efficiente per isotopi aventi una vita media inferiore a poche decine di millisecondi.

Il processo di estrazione avviene mediante la linea di trasferimento (*transfer line*), attraverso la quale gli isotopi in uscita dal target vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove sono ionizzati positivamente (ioni +1). Nell'attuale configurazione la linea di trasferimento (*transfer line*) è un tubo sottile di tantalio saldato al riscaldatore ad un'estremità e connesso meccanicamente alla sorgente di ionizzazione all'estremità opposta. Come accade per il riscaldatore, anche il sistema linea di trasferimento-sorgente di ionizzazione viene riscaldato mediante dissipazione di potenza per effetto Joule; in questo modo la temperatura della sorgente arriva fino ai 2400°C.

A seconda del potenziale di ionizzazione dell'elemento possono essere utilizzati diversi metodi di ionizzazione. Il potenziale di ionizzazione è rappresentato dall'energia necessaria per portare un elettrone della sfera di valenza ad una distanza infinita dall'atomo. Metalli alcalini e alcalino-terrosi hanno bassi potenziali di ionizzazione per cui una energia relativamente bassa sarà richiesta per ottenere la loro ionizzazione. In questo caso si può optare per l'uso di una sorgente di ionizzazione superficiale (SIS - *Surface Ionization Source*). Altri tipi di sorgenti utilizzabili nel front-end SPES sono la sorgente di ionizzazione al plasma (PIS - *Plasma Ionization Source*), in grado di ionizzare elementi con alto potenziale di ionizzazione, ma senza selettività e la sorgente di ionizzazione laser (RILIS *Resonant Ionization Laser Ion Source*) in grado di ionizzare selettivamente elementi con medio potenziale di ionizzazione. In figura 1.9 vengono visualizzati gli elementi e il metodo di ionizzazione di selezione per ciascuno. Gli elementi di transizione da $Z = 40$ a $Z = 46$

sono prodotti nel target, ma non estratti per la loro bassa volatilità (refrattari). La fissione è essenzialmente prodotta da protoni che vanno ad impattare sul nucleo dell'atomo ^{238}U .

In figura 1.10 vengono illustrati i radionuclidi che verranno prodotti nel progetto SPES, dove la legenda si riferisce al numero di particelle prodotte per secondo.

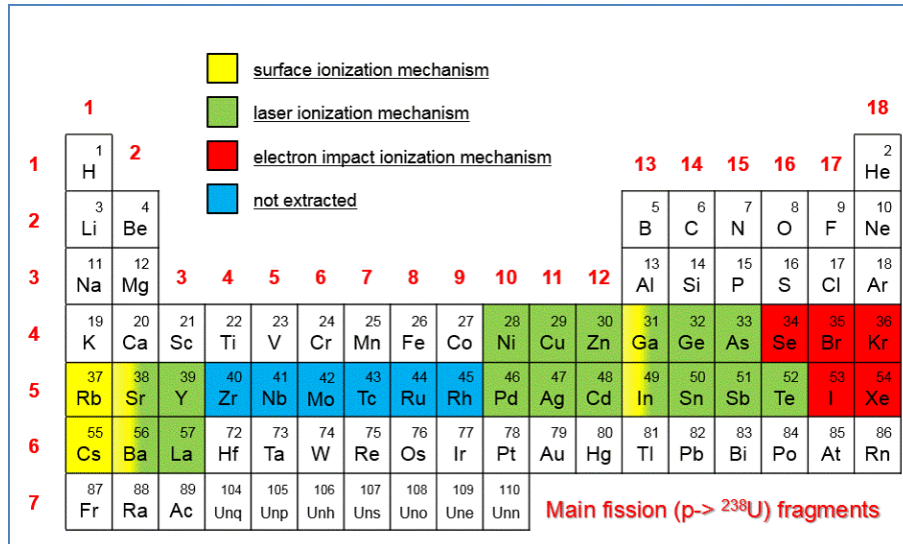


Fig. 1.9: Tavola periodica e metodi di ionizzazione

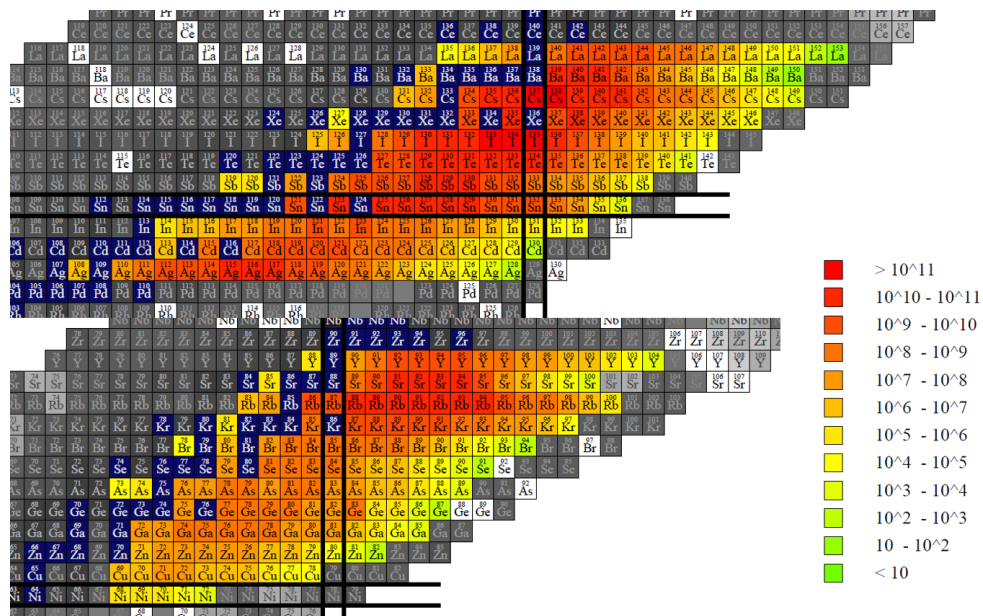


Fig. 1.10: Radionuclidi che produrrà il progetto SPES

La camera target è collegata al front end e tra i due componenti è presente una differenza di potenziale ($V_{camera} - V_{front-end}$) pari a 40 kV, per questo è necessario, al fine di evitare il contatto diretto, interporre un isolante elettrico (*electrical insulator*). La differenza di potenziale presente accelera gli ioni radioattivi. In particolare il componente che accelera gli ioni in uscita dalla sorgente di ionizzazione è un elettrodo (*electrode*) realizzato in lega di titanio (Ti_6Al_4V) e visibile in figura 1.11. In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che verrà, dopo il passaggio attraverso i separatori elettromagnetici ed il post acceleratore, inviato alle sale sperimentali.

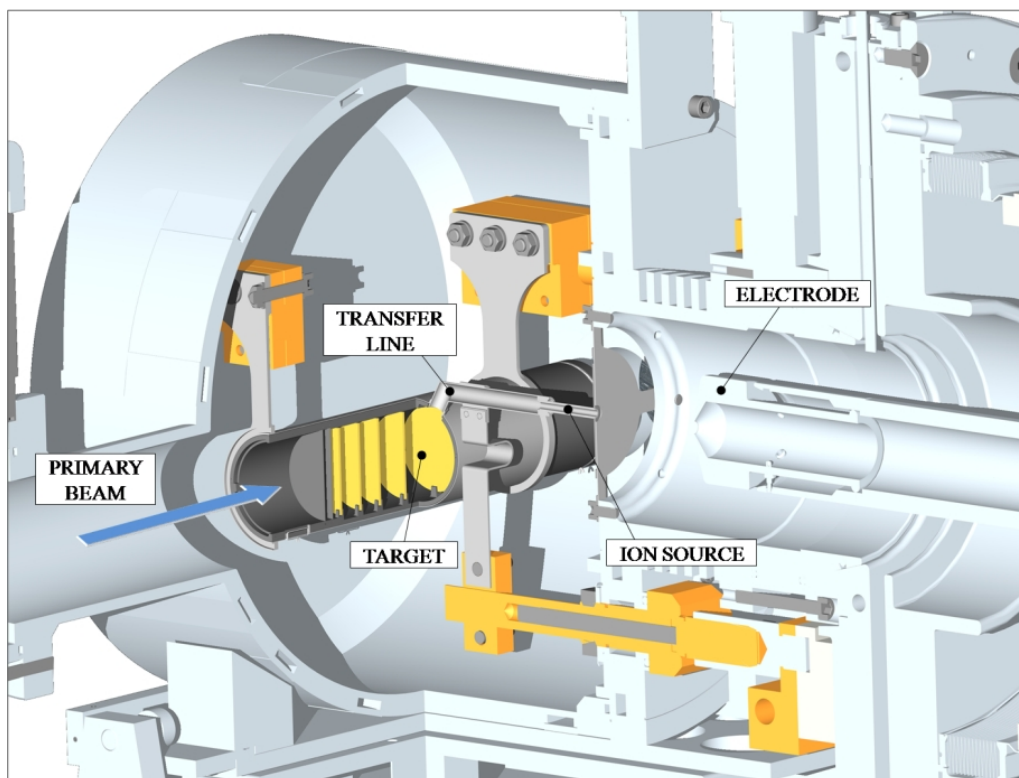


Fig. 1.11: Rappresentazione del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES

I sistemi di ionizzazione SIS e LIS, in particolare SSIS e SLIS (SPES Surface Ion Source), fanno riferimento alla medesima architettura, si tratta di una riprogettazione, propria del progetto SPES, della sorgente “MK1 ISOLDE” sviluppata dal CERN di Ginevra. Il componente principale di questa sorgente è la *hot cavity*, un piccolo tubo di tantalio o renio all’interno del quale avviene la ionizzazione. È dotata di un opportuno invito conico e viene accoppiata per interferenza al foro centrale del supporto in tantalio. Le basse tolleranze costruttive impediscono qualsiasi movimento relativo tra i due componenti. D’altra parte, il collegamento con la linea di trasferimento avviene tramite un tappo (*bush*) in tantalio, sul quale va in battuta la sorgente. Le elevate temperature raggiunte dalla sorgente di ionizzazione in condizioni di utilizzo provocano la realizzazione di una saldatura tra i componenti. Il collegamento tra il supporto e la flangia principale avviene mediante viti e tra questi due componenti viene interposto uno schermo in tantalio (*screen*) fondamentale per il processo di estrazione del fascio di isotopi radioattivi.

Sorgenti di ionizzazione

Surface Ion Source (SIS) In questa modalità di ionizzazione, l’impatto degli isotopi radioattivi provenienti dal target sulla superficie interna della *hot cavity* causa la ionizzazione. Tale procedimento è possibile se la minima energia necessaria per rimuovere un elettrone da una superficie (funzione di lavoro) è maggiore del potenziale di ionizzazione dell’isotopo. Nel caso in esame si riescono a produrre con elevata efficienza ioni positivi per elementi con potenziale di ionizzazione inferiore alla funzione di lavoro del renio, pari a circa 5 eV. L’elevata temperatura a cui si trova la sorgente di ionizzazione (*ion source*) permette di avere un processo di ionizzazione efficiente.

Lo svantaggio principale di tale metodo sta nel fatto permette di lavorare solo su elementi del primo e del secondo gruppo. Si devono quindi predisporre dei separatori elettromagnetici in grado di selezionare in base alla massa (*mass separator*) gli isotopi che si

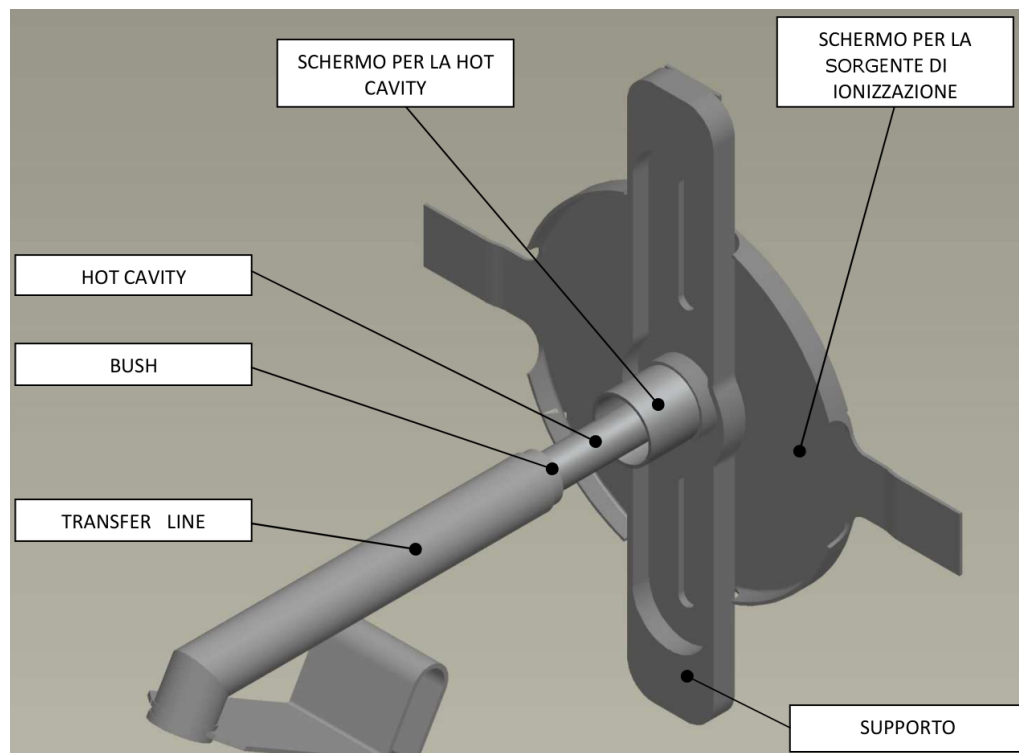


Fig. 1.12: Struttura usata per la ionizzazione superficiale (SIS)

vogliono nel fascio. Nonostante questa operazione, la purezza del fascio non è comunque garantita perchè ci possono essere isotopi di diverse specie isobari, aventi cioè lo stesso numero di massa A ma diverso numero atomico Z (esempio il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn). Per dividere tali elementi sono necessari separatori isobari, che sono dispositivi molto complicati, costosi e poco affidabili, che comportano inoltre una notevole riduzione dell'intensità del fascio.

Resonant Ionization Laser Ion Source (RILIS) Il metodo RILIS è oggi il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per le infrastrutture di tipo ISOL. Il suo vantaggio consiste nel fornire un processo di ionizzazione selettiva e di garantire l'eliminazione di contaminazioni indesiderate a livello della sorgente di ionizzazione. Utilizza la stessa architettura della tecnica SIS e prevede di proiettare un laser all'interno della *hot cavity* come in figura 1.13. Il laser è caratterizzato dalla sovrapposizione di più raggi aventi lunghezza d'onda differente (2 o 3 a seconda dell'elemento da ionizzare), che corrispondono a diversi valori energetici ($E = h \cdot f$, dove h è la costante di Planck e f la frequenza d'onda). Tale laser irradia gli isotopi e fornisce loro energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali ancor più lontani dal nucleo, fino alla separazione dell'atomo. In questo modo si ha formazione di uno ione positivo $1+$.

La metodologia RILIS permette di acquisire soltanto ioni radioattivi della specie di interesse producendo un fascio nel quale le contaminazioni sono minime. Alcuni elementi (in particolare il cesio) vengono ionizzati per strisciamento, provocando così imperfezioni nel fascio. Per risolvere l'inconveniente è possibile sostituire il materiale con cui è realizzata la *hot cavity*, utilizzando il niobio la ionizzazione superficiale viene notevolmente attenuata. Per avere un'efficienza di ionizzazione elevata è di fondamentale importanza limitare e controllare il disallineamento della *hot cavity* causato dall'espansione termica. Se infatti quest'ultima si disallinea viene a ridursi la zona di azione del laser e di conseguenza anche

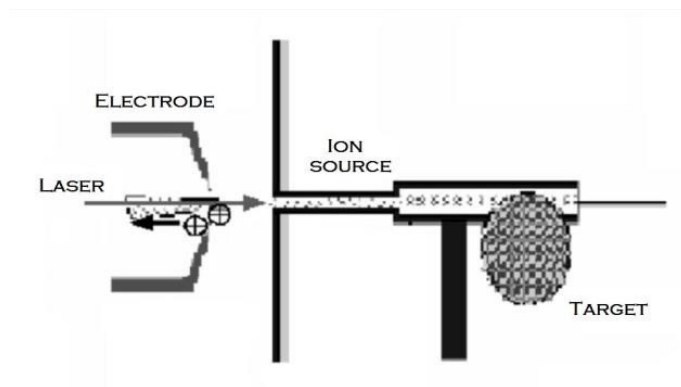
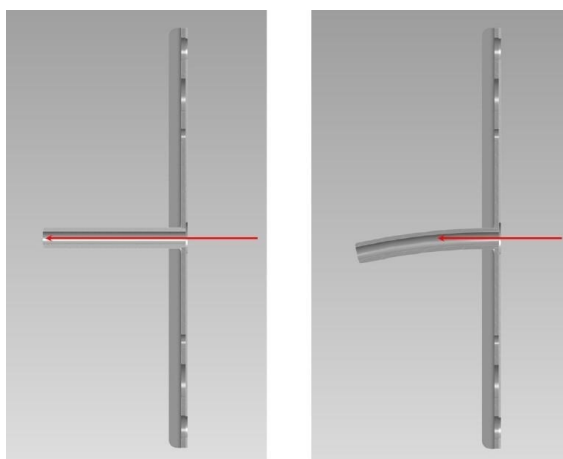


Fig. 1.13: Principio di funzionamento della ionizzazione RILIS

l'efficienza di ionizzazione (Figura 1.14).

Fig. 1.14: Allineamento della *hot cavity*

Plasma Ion Source (PIS) Questo tipo di sorgente effettua la ionizzazione degli isotopi tramite l'impatto con elettroni accelerati per effetto termoionico. Tale processo avviene in una struttura costituita da un catodo e un anodo (Figura 1.15). Il catodo viene riscaldato grazie al passaggio di una corrente continua di 330-340 A. L'alta temperatura raggiunta dal catodo causa l'emissione di elettroni che, grazie alla temperatura, avevano energia superiore a quella del legame con l'atomo. Il catodo quindi emette elettroni in una camera che funge da anodo all'interno della quale gli atomi vengono a contatto con gli elettroni accelerati, da una differenza di potenziale tipicamente di 150 V, rilasciati dal catodo. L'impatto elettronico causa quindi la perdita di un elettrone da parte degli atomi dell'anodo (ioni positivi) creando quindi un plasma. In Figura 1.15 si rappresenta il principio di funzionamento della ionizzazione PIS. Nella *facility* ISOLDE del CERN viene usata una sorgente di ionizzazione al plasma di tipo FEBIAD chiamata MK5.

Nell'ambito del progetto SPES un prototipo di questa sorgente è stato realizzato, testato e ottimizzato dal punto di vista elettro-termico. Questo tipo di sorgente non è per nulla selettiva ma è l'unica in grado di ionizzare alogeni e gas nobili, anche se con efficienze inferiori rispetto alle tecniche laser e superficiale.

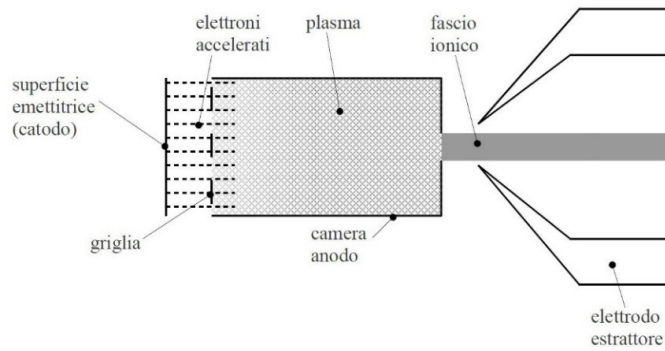


Fig. 1.15: Principio di funzionamento della ionizzazione PIS

1.4.3 Separatori magnetici e post accelerazione

Il fascio estratto dalla sorgente di ionizzazione è sottoposto ad una prima fase di purificazione nella quale, attraverso un separatore di massa, viene intrappolata una grande quantità di contaminanti. La risoluzione di tale dispositivo ($M/\Delta M$, dove per M si intende la massa dell'isotopo) è pari a circa 150, si riescono così a separare in base alla massa i vari elementi. In figura 1.16 una rappresentazione del front end SPES.

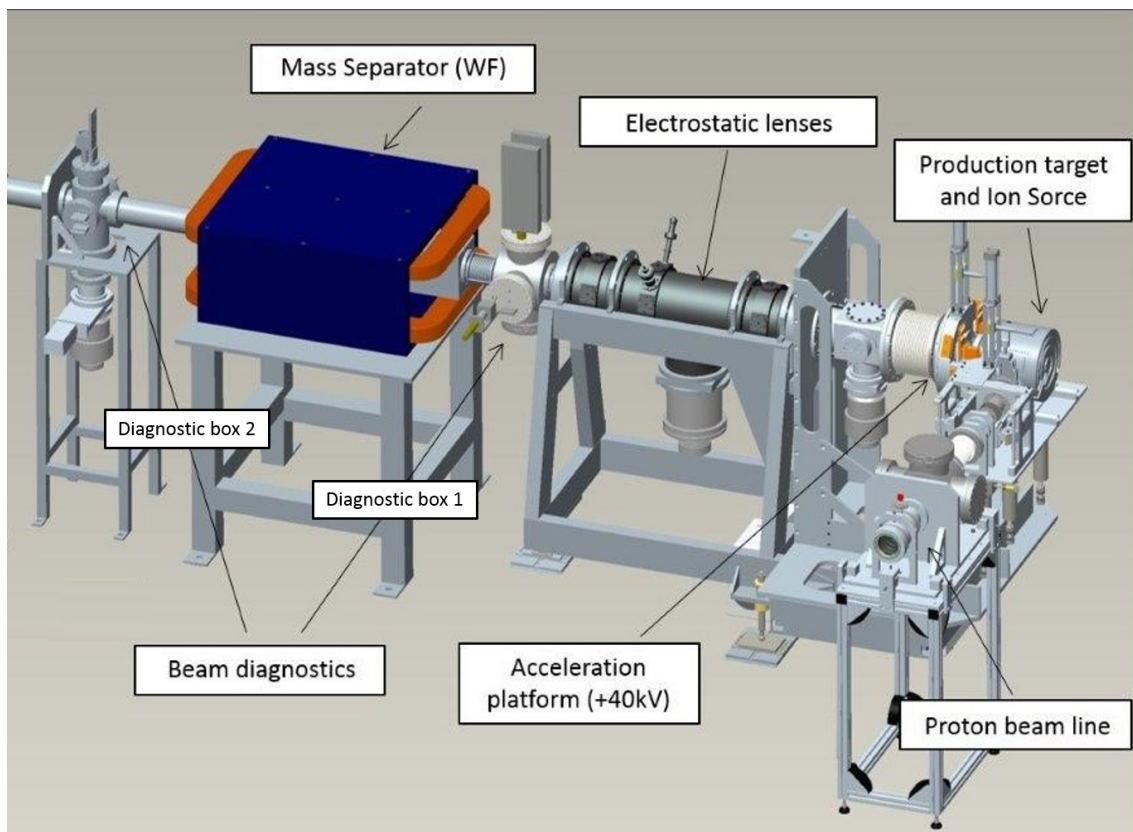


Fig. 1.16: Rappresentazione del front-end di SPES

Il separatore di massa è seguito da un separatore isobaro, avente una risoluzione pari a 20000, e che permette quindi di separare gli isotopi come il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn tra loro isobari.

A questo punto il fascio radioattivo può essere direttamente convogliato alle sale sperimentali ed utilizzato in esperimenti che richiedono fasci radioattivi di bassissima energia, oppure essere post accelerato. La post accelerazione viene ottimizzata mediante l'impiego

di un *Charge Breeder*, un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni prima dell'iniezione del fascio esotico attraverso un RFQ e successivamente attraverso "ALPI" che rappresenta il primo stadio di post accelerazione. Il complesso ALPI è da molti anni in funzione ai LNL, ma negli ultimi tempi è stato sottoposto ad un numero significativo di miglioramenti. In particolare, mentre prima consentiva la produzione di fasci ioni stabili, ora può essere impiegato come un acceleratore di RIB. In figura 1.17 l'acceleratore.



Fig. 1.17: A sinistra è rappresentato un tratto del linac ALPI. In evidenza i criostati, recipienti che contengono ed isolano termicamente dall'ambiente circostante le cavità superconduttiva (a $T = -269^{\circ}C$). L'interno di un criostato, con 4 cavità acceleranti su base di rame, è mostrato sulla destra.

1.4.4 I sistemi di movimentazione

Visto la necessità di dover sostituire la camera target periodicamente, a causa del rinnovo del materiale e dalla degradazione degli *O-Ring*, e di escludere ogni intervento umano all'interno del bunker, i sistemi di movimentazione sono progettati in modo da poter compiere le varie operazioni in modo completamente automatizzato.

Per la gestione di tutti i movimenti della camera target sono stati progettati quattro sistemi di movimentazione. Le fasi necessarie alla movimentazione della camera sono:

1. Deposito della camera target nuova sulla tavola di ammaraggio (*coupling table*, quest'ultima è la struttura sopra la quale è appoggiato il dispositivo contenente il bersaglio di produzione);
2. Movimentazione della camera quando è posizionata sulla tavola di ammaraggio;
3. Prelievo della camera irradiata e posizionamento all'interno del sarcofago (un componente progettato per contenere la camera target irradiata quando viene rimossa dal front-end);
4. Stoccaggio del sarcofago contenente la camera irradiata (attivata).

Le fasi di deposito e prelievo della camera target sulla o dalla *coupling table* sono gestite da due sistemi di movimentazione, in fase di progettazione, denominati rispettivamente sistema di movimentazione orizzontale (SMO) e sistema di movimentazione verticale (SMV). Le movimentazioni della camera sulla tavola di ammaraggio sono gestite dal rispettivo sistema di movimentazione pneumatico. Per quanto riguarda invece lo stoccaggio

del sarcofago (contenente la camera irradiata), è in fase di progettazione un nuovo sistema di movimentazione interno al magazzino temporaneo (*temporary storage*).

Il sistema di movimentazione verticale sarà utilizzato al fine di raggiungere il bunker dal primo piano dell'edificio SPES, mentre il sistema di movimentazione orizzontale raggiunge la zona di produzione del fascio partendo dalla zona fredda (Figura 1.18) che è sullo stesso piano del bunker (piano interrato). Il sistema di movimentazione verticale agirà solo in caso di emergenza o di rottura di quello orizzontale. Entrambi i sistemi si avvalgono del sistema di movimentazione posto sulla tavola di ammaraggio [10].

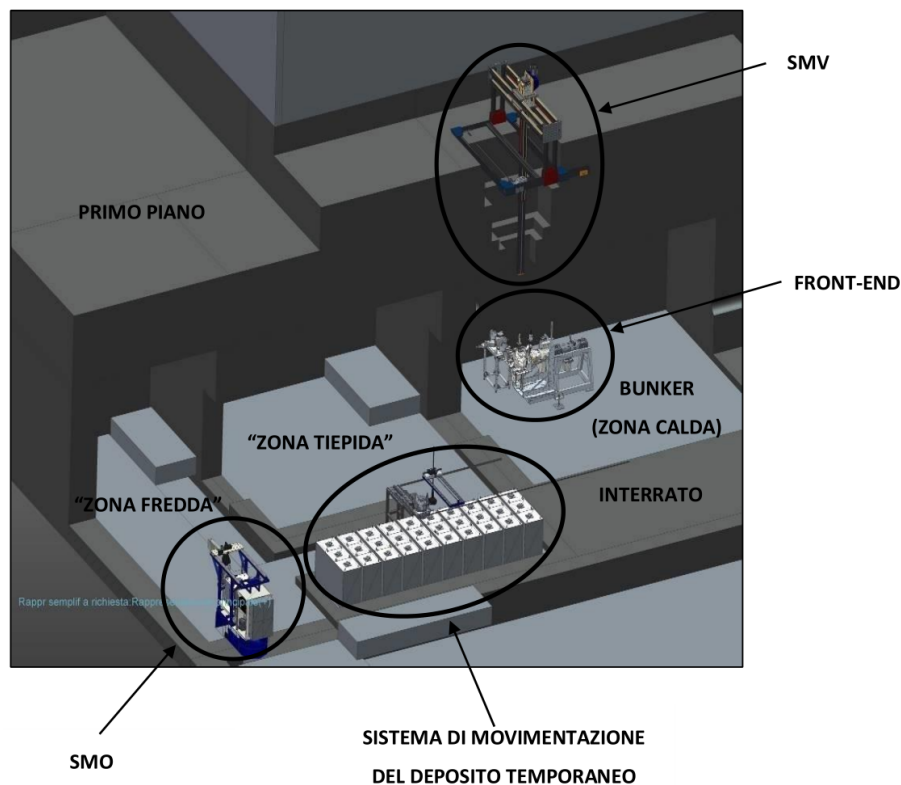


Fig. 1.18: Sistemi di movimentazione all'interno dell'edificio SPES

1.5 Applicazioni dei fasci di ioni esotici

I fasci di ioni esotici hanno suscitato, nel corso degli anni, un crescente interesse dovuto alle loro molteplici applicazioni, non solo nel campo della fisica nucleare, ma anche in astrofisica, medicina e fisica dello stato solido. Nei prossimi paragrafi viene data una breve panoramica delle applicazioni nei vari ambiti di ricerca.

1.5.1 Applicazioni in fisica nucleare

Sono elencate di seguito le principali applicazioni nell'ambito della fisica nucleare.

Miglioramento e verifica del modello standard

L'attuale modello su cui si basa la fisica nucleare comprende tre delle quattro interazioni fondamentali, cioè l'interazione nucleare forte, l'elettromagnetismo e l'interazione nucleare debole (queste ultime talvolta identificate con il termine interazione elettrodebole) e descrive la funzione e le proprietà di tutte le particelle (note ed osservate) che costituiscono la materia. Sebbene tale modello abbia avuto un notevole successo l'aspetto poco

soddisfacente è che è stato costruito facendo uso di alcune assunzioni ad hoc non ancora pienamente verificate. Per chiarire l'origine e confermare la validità di tali assunzioni sono stati ideati complessi esperimenti di fisica nucleare, suggeriti da convincenti basi di natura teorica. La messa in opera di tali procedure sperimentali comporterebbe l'effettuazione di misure precise sulle proprietà di decadimento di alcuni isotopi, che possono essere ricavate utilizzando come sorgente pura di ioni i fasci radioattivi prodotti nelle *facilities*.

Studio della struttura di nuclei complessi

I nucleoni (protoni e neutroni) sono a loro volta costituiti da subparticelle dette quark. Esse esercitano un'azione fisica che va oltre i nucleoni nei quali sono confinate. Si osserva in particolare che tale interazione si manifesta in maniera diversa tra nucleoni liberi e nucleoni appartenenti allo stesso nucleo, in quanto influenzata dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Attualmente non è stata ancora identificata una formula generale in grado di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i tipi di nuclei, in quanto calcoli di natura quantomeccanica sono applicabili solamente ai nuclei più leggeri. La fisica nucleare quindi si è posta l'obiettivo di ottenere una trattazione unitaria in grado di:

- Permettere di determinare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari;
- Eliminare le incongruenze presenti nel modello corrente;
- Essere applicabile anche ai nuclei esotici, ossia quelli con rapporto protoni/neutroni estremo.

A questo proposito i fasci di ioni radioattivi possono fornire un prezioso contributo.

Misure della dimensione del nucleo: i nuclei halo

Le dimensioni del nucleo sono direttamente correlate al numero di nucleoni che lo costituiscono, ovvero il numero di massa (A). Tale correlazione è espressa dalla formula 1.5.1:

$$R = R_0 A^{(1/3)} \quad (1.5.1)$$

dove con R è espresso il raggio del nucleo, A indica il numero di massa e R_0 rappresenta una costante pari a 1.2 fermi ($1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$). Tuttavia in particolari condizioni, lontane dalla stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni dalla legge poichè le interazioni tra i nucleoni possono diventare così piccole da non garantire la formazione di un nucleo sotto forma di aggregato. Si possono quindi formare nuclei ad anello, detti nuclei "halo". Nuclei di questo tipo presentano una diversa distribuzione dei neutroni, si tratta in particolare di nuclei con sovrabbondanza di neutroni rispetto al corrispondente isotopo stabile, inoltre uno o due di questi neutroni risentono di una debole interazione con il nucleo, e vi orbitano intorno rimanendo quindi separati da esso (neutroni di valenza).

Un esempio di nucleo "halo" è l'isotopo ^{11}Li , il cui nucleo presenta due neutroni di valenza. In questo nuclide la dimensione media del nucleo è paragonabile a quella dell'isotopo ^{48}Ca , se però si considera anche l'alone racchiuso dalle orbite dei due neutroni di valenza le dimensioni diventano confrontabili con quelle del nucleo molto più massivo dell'isotopo ^{208}Pb (figura 1.19).

Il nucleo ^{11}Li è un particolare sistema a tre corpi (i due neutroni ed il core), infatti rappresentano un esempio naturale di sistema borromeico. In topologia si definisce borromeico un sistema costituito da tre anelli tra loro legati inscindibilmente in maniera tale che tuttavia la soppressione di uno comporta la separazione degli altri due (figura 1.20).

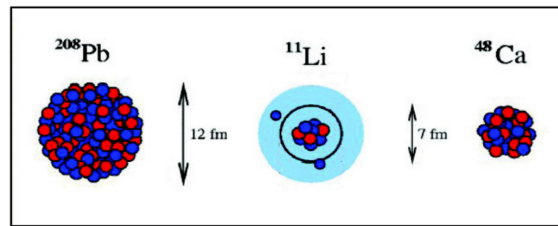


Fig. 1.19: Paragone tra la dimensione del nucleo di ^{11}Li e quella di altri nuclei più massivi

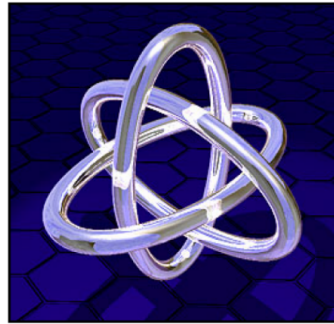


Fig. 1.20: Gli anelli Borromeici

I nuclei ad anello sono detti anche borromeici perchè infatti se il costituente di uno degli anelli viene in qualche modo rimosso, l'intero sistema diviene immediatamente instabile e i due anelli rimanenti si separano e si allontanano facilmente.

Attualmente è possibile determinare la distribuzione dei protoni con esperimenti di spettroscopia atomica, utilizzando fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collineata. Se si cerca invece di determinare la distribuzione di tutti i nucleoni è necessario disporre di fasci ad alta energia, come quelli prodotti nelle *facilities*.

Produzione di elementi superpesanti

In natura si ritrovano all'incirca 90 elementi, dall'idrogeno all'uranio. Grazie a reazioni di fusione nucleare, negli ultimi anni è stato possibile sintetizzare elementi con elevato numero di massa estendendo il numero dei costituenti della tavola periodica fino ad elementi con numero atomico pari a 112, prospettando una futura estensione a 116. In particolare partendo da osservazioni preliminari si ritiene che questi elementi detti super-pesanti, in cui la repulsione coulombiana assume valori elevati, riescano a formarsi intorno alla cosiddetta isola di stabilità, una configurazione formata da 114 protoni e 184 neutroni che sembra garantire la stabilità del nucleo. Le tecnologie più recenti consentono di disporre di fasci intensi, costituiti da nuclei instabili ricchi di neutroni (n-rich). Se questi vengono accoppiati a target stabili, anch'essi ricchi di neutroni, potrebbero crearsi le condizioni adatte per approfondire tale fenomeno e aprire definitivamente la strada ad uno studio più accurato di questa realtà.

1.5.2 Applicazioni nella fisica dello stato solido

Nel 1920 è stata ideata la tecnica del Radio Tracer Diffusion, che consiste nell'impiantare in un sistema solido dei nuclei radioattivi e studiarne il decadimento, rilevando le particelle e le radiazioni gamma che emettono. È possibile rilevare anche il segnale di pochissimi atomi, pertanto questa tecnica risulta particolarmente utile e diffusa per lo studio dei processi di diffusione all'interno dei sistemi solidi.

Il sistema ospitante può essere drogato con radioisotopi sonda sia per diffusione mediante reazione nucleare, sia per impianto ionico. La scelta dello specifico isotopo radioattivo da utilizzare nello specifico esperimento viene effettuata in base sia alle caratteristiche chimico-fisiche sia alle proprietà nucleari di quest'ultimo [8].

L'utilizzo della tecnica Radio Tracer Diffusion consente di:

- Osservare, tramite i prodotti del decadimento le interazioni tra l'atomo sonda e la struttura del reticolo cristallino che lo circonda;
- Ricavare informazioni riguardanti il campo elettrico e magnetico all'interno del reticolo cristallino;
- Studiare i processi diffusivi e le interazioni tra gli atomi sonda;
- Evidenziare la presenza, la distribuzione e la tipologia dei difetti nel reticolo cristallino.

Drogaggio dei semiconduttori

Per poter sviluppare semiconduttori di piccole dimensioni è necessario poter avere il miglior controllo possibile sui difetti che governano tali proprietà, cioè sia sulle caratteristiche intrinseche (vacanze, difetti interstiziali) sia su quelle estrinseche (droganti, impurità atomiche) del reticolo cristallino. Per questo motivo sia la ricerca di base, sia quella applicata stanno concentrando i propri sforzi nello studio dei difetti e dell'attivazione elettrica dei droganti in diversi tipi di semiconduttori.

Analogamente agli isotopi droganti stabili, anche quelli radioattivi possono alterare le proprietà elettriche ed ottiche dei semiconduttori nei quali vengono inseriti. Queste caratteristiche sono influenzate dalle loro proprietà chimiche e dalla posizione in cui vengono inseriti nel reticolo. Oltre alla tipologia di semiconduttore le loro proprietà ottiche ed elettroniche sono sensibilmente influenzate anche dalle dimensioni. È stato dimostrato infatti che nel caso di conduttori particolarmente piccoli, tali proprietà possono essere alterate in maniera significativa se vi è un difetto con concentrazione inferiore a 10^{12} atomi/cm³. Per avere quindi un controllo affidabile delle prestazioni di semiconduttori di questo tipo è indispensabile poter disporre di tecniche sperimentali con elevata sensibilità sia dal punto di vista chimico, sia da quello della concentrazione dei difetti.

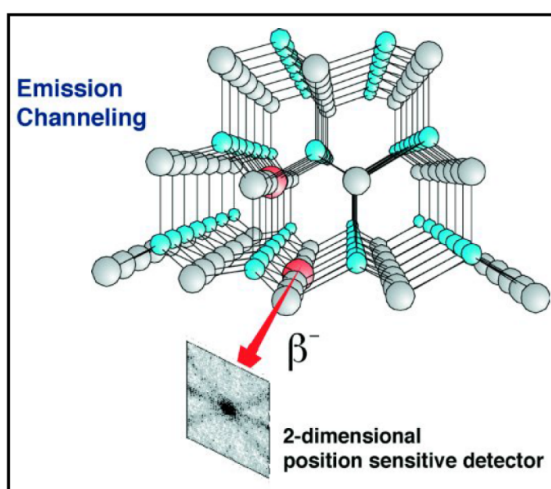


Fig. 1.21: *Emission channeling* degli elettroni emessi da atomi radioattivi situati in una riga atomica del reticolo

La tecnica diffusa da decenni per la rilevazione delle impurezze è stata il *channeling* (figura 1.21) tale procedura consiste nell'indirizzare un fascio di ioni attraverso le righe atomiche dei cristalli o lungo i piani del cristallo (canali), tuttavia non è possibile determinare concentrazioni di difetti inferiori a 10^{12} atomi/cm³. La sensibilità subisce un notevole miglioramento se all'interno del reticolo cristallino sono impiantate impurezze radioattive che emettono particelle cariche (*emission channeling*). Misurando l'emissione lungo direzioni diverse è possibile determinare la posizione nel reticolo cristallino dell'atomo emittente con un'accuratezza di pochi decimi di Å(angstrom).

1.5.3 Applicazioni in medicina nucleare

I fasci di ioni radioattivi possono avere interessanti applicazioni mediche sia nel campo della diagnosi sia nel campo del trattamento di patologie tumorali. Di seguito sono illustrate le principali applicazioni in campo medico che attualmente sono state prese in considerazione.

La tomografia ad emissione positronica (PET)

Prima di trattare quest'altra applicazione è bene introdurre alcune definizioni:

- Si dice antimateria la materia costituita dalle antiparticelle: esse hanno massa uguale a quella delle corrispondenti particelle della materia ordinaria, ma caratteristiche opposte.
- Viene chiamata positrone (o anche antielettrone) l'antiparticella corrispondente all'elettrone, avente quindi carica +1. Quando un positrone viene associato ad un elettrone la loro carica si annulla e la loro massa viene convertita in energia sotto forma di due fotoni⁵ ad altissima energia, nella banda dei raggi gamma. I positroni possono essere generati dal decadimento radioattivo con emissione di positroni o dall'interazione con la materia di fotoni con energia superiore a 1.022 MeV.

L'antimateria è generalmente utilizzata nello studio delle interazioni tra le particelle elementari, tuttavia presenta anche un'importante applicazione tecnologica. La Tomografia ad emissione Positronica (PET- *Positron Emission Tomography*). Si tratta di una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che sfrutta l'emissione positronica per monitorare il funzionamento degli organi interni dei pazienti creando mappe tridimensionali ad alta risoluzione della parte del corpo che si vuole osservare.

La procedura PET prevede di iniziare in genere con l'iniezione per via endovenosa di alcuni isotopi traccianti a vita media-breve, legati ad una molecola metabolicamente attiva (generalmente uno zucchero). Trascorso un certo periodo di tempo nel quale la molecola contenente il tracciante ha avuto modo di diffondersi nel corpo e legarsi alle cellule con una certa concentrazione nei vari tessuti da esaminare, il soggetto viene posizionato all'interno dello scanner.

L'isotopo di vita media-breve decade emettendo un positrone. Dopo un percorso breve, di al massimo pochi millimetri il positrone si annichila con un elettrone, emettendo due fotoni con energia paragonabile a quella della radiazione gamma. I fotoni sono emessi lungo una stessa retta, ma con direzione opposte (sfasate quindi di 180° tra loro) e vengono poi rilevati dal dispositivo di scansione mediante particolari tubi fotomoltiplicatori. Il principio fondamentale su cui si basa l'efficacia della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni. Coppie di fotoni che non arrivano al rivelatore in un intervallo di tempo sufficientemente ristretto (pochi nanosecondi) tra loro non vengono presi in considerazione. Misurando la posizione in cui ciascuna fotone colpisce il rivelatore (ciascuna coppia

⁵In fisica il fonone è una quasiparticella che descrive un quanto di vibrazione in un reticolo cristallino rigido.

identifica una retta) è possibile determinare la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente due coppie di fotoni identificano due rette tra loro incidenti nel punto di emissione), permettendo quindi di monitorare l'attività degli organi osservati.



Fig. 1.22: Esempio di scanner impiegato nella tecnica di rilevazione PET

Lo scanner (figura 1.22) utilizza l'emissione di fotoni per determinare la densità di isotopo nei tessuti analizzati. La mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola tracciante si è concentrata maggiormente e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di effettuare una diagnosi e stabilire il trattamento adeguato per l'eventuale patologia o anomalia riscontrata. Molto spesso i risultati ottenuti dalla Tomografia ad Emissione di Positroni sono integrati e confrontati con gli esiti della Risonanza Magnetica Nucleare, ottenendo così una mappatura completa dei tessuti analizzati, comprendente informazioni sia morfologiche ed anatomiche, sia metaboliche.

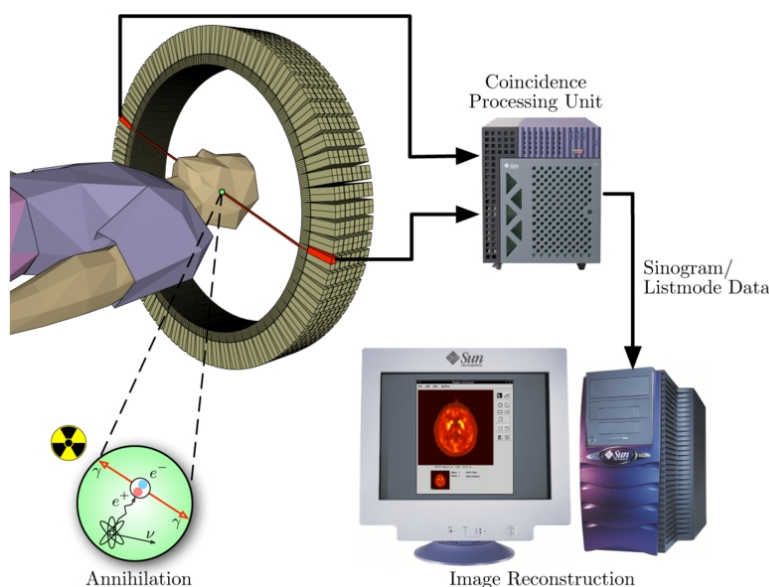


Fig. 1.23: Schema riassuntivo della tecnica di analisi PET e modalità di acquisizione e presentazione dei dati

In ogni caso mentre diagnosi effettuate con i metodi di scansione come la RMN e la TAC permettono di identificare alterazioni morfologiche e anatomiche dei tessuti organici, le scansioni PET sono in grado di mostrare eventuali variazioni a livello biologico molecolare

con l'utilizzo di marcatori che presentano diversa velocità di assorbimento a seconda del tessuto interessato. Questo tipo di alterazioni, in genere, precedono quelle morfologiche, pertanto permettono di diagnosticare con maggiore anticipo eventuali anomalie.

Con una scansione PET si può inoltre determinare con una certa precisione il cambio di afflusso sanguigno nei vari tessuti attraverso la determinazione di concentrazione dell'emissione positronica. I radionuclidi più utilizzati nella scansione PET sono isotopi a breve tempo di dimezzamento, come ^{11}C ($\approx 20\text{min}$), ^{13}N ($\approx 10\text{min}$), ^{15}O ($\approx 2\text{min}$), ^{18}F ($\approx 110\text{min}$). Per via del loro basso tempo di dimezzamento i radioisotopi devono essere prodotti in prossimità dello scansionatore PET.

La produzione di radiofarmaci

Nell'ambito del progetto SPES è in fase di studio la possibilità di produzione di radioisotopi utili per applicazioni di medicina nucleare. In tale ambito la ricerca è molto viva e nell'ottica di una collaborazione tra i laboratori di fisica nucleare e gli ospedali, si stanno studiando i possibili radiofarmaci producibili. Saranno prodotti soprattutto radioisotopi *neutron - rich β - emitters*, dalle applicazioni in campo terapeutico molto promettenti. Ciò che rende questo studio significativo è la possibilità di produrre radiofarmaci ad altissima purezza, privi di contaminanti. Attualmente è stata condotta con successo una sperimentazione pilota con ^{89}Sr , uno dei radioisotopi più promettenti, per la verifica della realizzabilità del progetto.

1.5.4 Applicazioni in astrofisica

L'astrofisica nucleare è fondamentale per la comprensione delle strutture, dell'evoluzione, delle dinamiche e della composizione dell'universo e dei suoi costituenti.

Nelle stelle avvengono reazioni nucleari che liberano grandi quantità di energia e che coinvolgono sia nuclei stabili sia nuclei instabili. Tali reazioni possono essere costanti nel tempo, permettendo quindi alla stella di continuare a brillare per bilioni di anni prima di esaurire il carburante nucleare, oppure liberare un'enorme quantità di energia in un unico evento esplosivo distruggendo di fatto la stella in pochi minuti o secondi.

Nelle differenti fasi della vita di una stella vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia attraverso reazioni di nucleo-sintesi che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi non ancora identificati, dal momento che si svolgono in un territorio sconosciuto.

Per sviluppare un modello che descriva il processo di nucleo-sintesi è necessario valutare le rese delle reazioni nucleari dei principali cicli astrofisici e le caratteristiche di decadimento di nuclei tuttora sconosciuti. Queste essenziali informazioni includono i tempi di vita, le masse ed i principali canali di decadimento di un numero di nuclei chiave lontani dalla stabilità. Le reazioni nucleari coinvolgenti nuclei instabili possono essere misurate unicamente con un fascio radioattivo: per tale motivo si prevede che la nuova generazione di *facilities* per la produzione di fasci radioattivi risulterà di fondamentale importanza per la comprensione della sintesi elementare nell'Universo.

1.6 Conclusioni

L'importanza assunta negli anni dai fasci radioattivi, sia per la ricerca teorica che applicata, ha spinto la comunità scientifica internazionale a costruire numerose *facilities* per la loro produzione. Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro rientra nell'ambito della realizzazione di una *facility* europea di tipo ISOL ad alte prestazioni (progetto EURISOL). La realizzazione operativa di tale progetto prevede l'allestimento di una *facility*

“intermedia” in grado di ottenere come prestazioni 10^{13} *fissioni/s* in un target formato da 7 dischi in carburo di uranio bombardati da un fascio protonico di 40 MeV a 0,2 mA.

In quest’ottica risulta di vitale importanza la definizione di un sistema di segnali in grado di fornire informazioni sullo stato di funzionamento della *facility* per mezzo dell’implementazione sia di un sistema opportunamente dimensionato di sensori per la misura diretta di alcuni parametri fondamentali, sia di strumenti in grado di ricavarne indirettamente altri attraverso calcoli numerici. Tali informazioni potranno poi essere rielaborate dal sistema di controllo che sarà implementato e fornire indicazioni utili per garantire l’affidabilità del sistema. Questo lavoro di tesi si pone l’obiettivo in particolare di presentare alcune soluzioni per migliorare e realizzare il sistema e gli strumenti di controllo del canale protonico, della camera target e del canale radiativo.

Il sistema di controllo del progetto SPES

2.1 Introduzione

Concepire il sistema di controllo per il progetto SPES è molto complesso, così come il tempo e le risorse impiegate per questa missione. Un gran numero di sottosistemi devono concorrere per essere in grado di gestire una *facility* di queste dimensioni. Inoltre, questi sottosistemi sono molto eterogenei, essi comprendono tutto quello che parte dalla diagnostica del fascio ai dispositivi di protezione individuali, fino ai sistemi di sicurezza.

È stato scelto EPICS come interfaccia principale per i sistemi di controllo. Esso è già usato da numerose *facilities* di fisica in tutto il mondo (figura 2.1), ed è sostenuto da una grande comunità.

All'interno dell'architettura principale, alcuni sottosistemi verranno controllati tramite sistemi nativi in EPICS, mentre altri saranno controllati tramite PLC. EPICS servirà anche come una rete di supervisione principale di tutto il sistema di controllo.

Per l'interfaccia di controllo operatore si è utilizzato il software CSS.

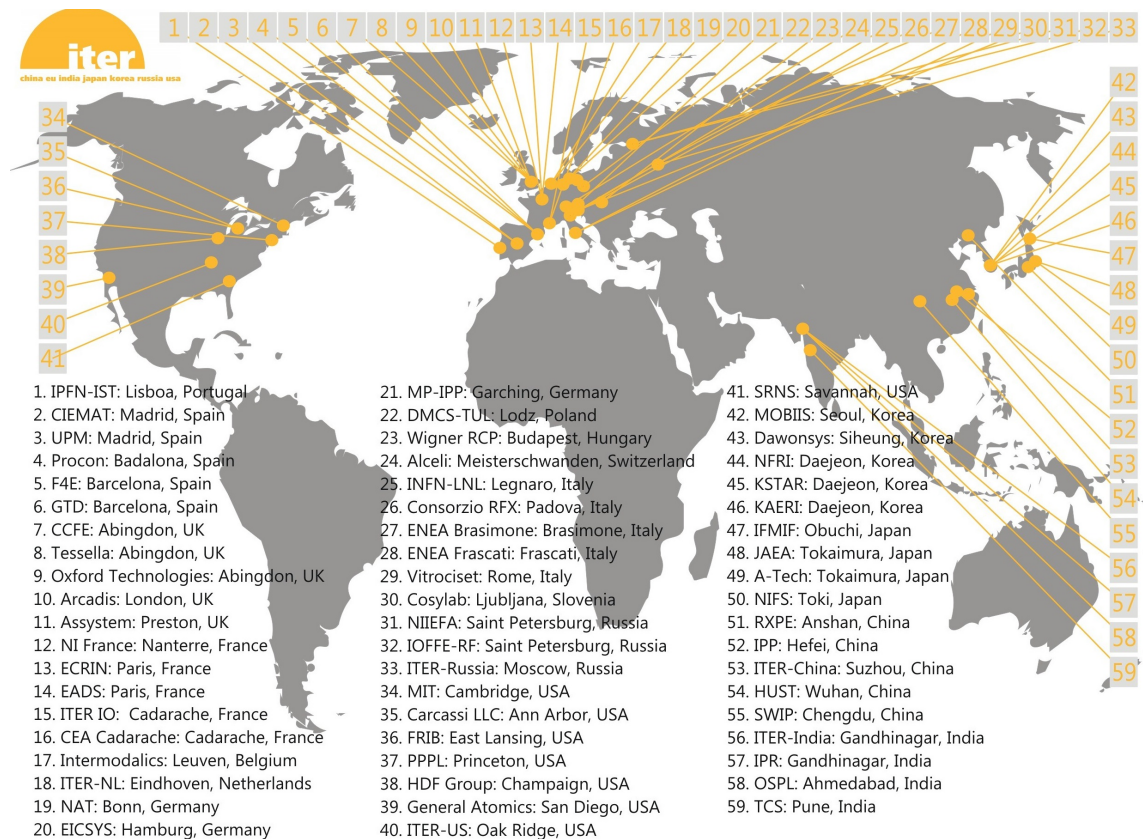


Fig. 2.1: Lista delle facilities che utilizzano il software EPICS.

2.2 EPICS (*Experimental Physics and Industrial Control System*)

EPICS è un ambiente software utilizzato per sviluppare e implementare sistemi di controllo distribuiti per azionare dispositivi come gli acceleratori di particelle, telescopi e altri grandi esperimenti. EPICS fornisce inoltre funzionalità SCADA (*supervisory control and data acquisition*), che permette ad un operatore di interagire coi diversi dispositivi. Questo software è stato progettato per aiutare a sviluppare sistemi che spesso dispongono di un gran numero di computer collegati in rete, per consentire la comunicazione tra di loro e per fornire il controllo e le valutazioni di varie parti del dispositivo, da una sala di controllo centrale, o anche da remoto su Internet [13].

Per comunicare tra i vari computer, EPICS utilizza le tecniche di comunicazione *Client/Server* e *Publish/Subscribe*. La maggior parte dei server (chiamato *Input/Output Controller* o *IOC*) eseguono nel mondo reale di *I/O* e locale, compiti di controllo. La pubblicazione di tali informazioni ai client viene effettuata utilizzando il protocollo di rete *Channel Access* (CA). Questa infrastruttura realizza un protocollo di comunicazione comune tra tutti i dispositivi collegati alla rete di controllo, fornendo gli strumenti necessari per localizzare e reperire qualsiasi variabile di processo (PV - *process variable*) presente all'interno della memoria dati distribuita.

Le applicazioni di networking per le quali è stato sviluppato EPICS è uno dei motivi che gli consente di essere utilizzato per la costruzione di un sistema di controllo che riesca ad inglobare centinaia di computer.

La figura 2.2 mostra la generica architettura dei sistemi di controllo in EPICS.

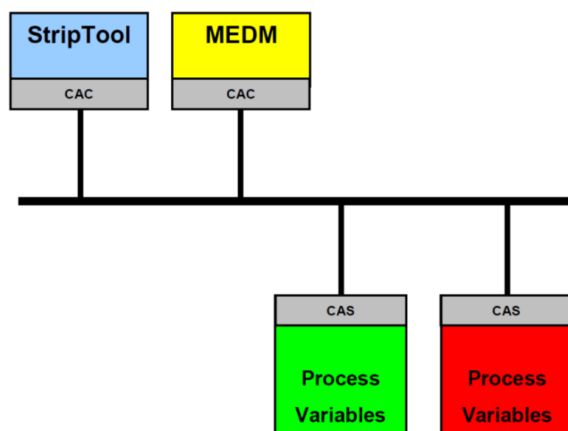


Fig. 2.2: Architettura del sistema di controllo basato su EPICS

I client nel CA sono programmi che richiedono l'accesso ad una o più variabili di processo per svolgere un determinato scopo. Il servizio che fornisce il CA server è quello di provvedere l'accesso ad una determinata PV. La comunicazione attraverso il CA avviene attraverso un opportuno protocollo di comunicazione su rete ethernet.

La procedura per la ricerca di una variabile inizia dal client. Questo trasmette un pacchetto di richiesta UDP (*User Datagram Protocol*) con il nome della PV aspettando che il server su cui è posizionata risponda. Quando questo accade, il server, risponde tramite una comunicazione TCP (*Transmission Control Protocol*) per inviare l'informazione richiesta. La figura 2.3 illustra questa procedura. Altro metodo è quello di far monitorare al client una PV e far aspettare la comunicazione del server finché questa non avrà cambiato valore.

In EPICS, le PV vengono utilizzate per monitorare un determinato macchinario, esse sono trattate come elemento di una struttura più complessa chiamata Record. Questa

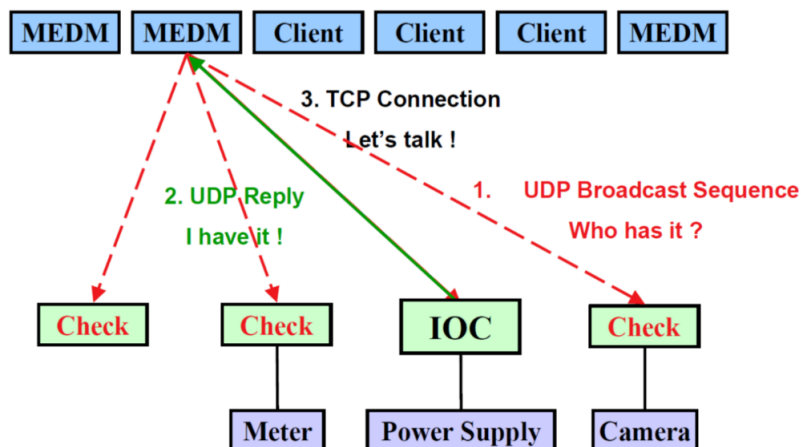


Fig. 2.3: Procedura di connessione e ricerca di una PV

struttura, oltre a comprendere il valore della variabile di processo, include anche diversi attributi che descrivono le proprietà di quella variabile in una data applicazione (es. unità di misura, timestamp, range operativi di lavoro, soglie di allarme, ecc.).

Un Record EPICS (si veda la figura 2.4) è un oggetto con un nome univoco, il cui comportamento è definito dal particolare modello a cui si riferisce (es. ai, ao, calc, stringout ecc.). Le opzioni dei diversi Record possono essere associate con l'hardware I/O oppure attraverso dei link con altri record. I suoi campi definiscono quando e dove il processo deve ricevere/trasmettere i diversi dati e con chi deve comunicare.

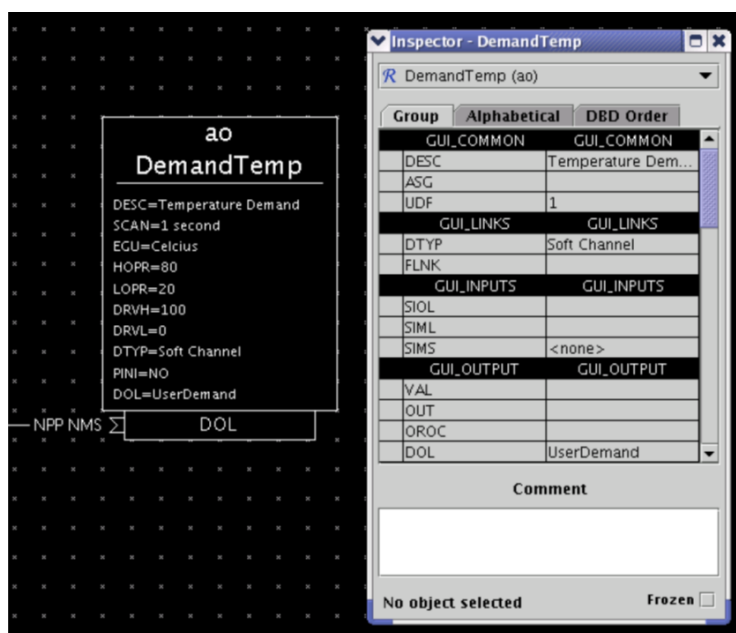


Fig. 2.4: Visualizzazione grafica di un record in EPICS

Un altro concetto fondamentale nell'architettura di EPICS è quello di IOC. Con questo termine si intende genericamente un computer (spesso un *embedded controller*) cui è demandato il compito di acquisire le variabili di processo dai dispositivi hardware e memorizzarle nell'istanza locale del database distribuito. L'IOC contiene dunque il software (*iocCore*) necessario alla gestione del database e implementa la funzione *Channel Access Server*, necessaria a trasferire il valore delle variabili ai processi Client che le richiedono. Nella filosofia di EPICS il database non è solamente un deposito di variabili ma è una strut-

tura logica che consente di implementare degli algoritmi di controllo attraverso i link tra i vari record. L'IOC è dunque anche la sede di processi di controllo configurati attraverso il database stesso. Istanze di *iocCore* possono anche essere eseguite sotto forma processi su di un computer non dedicato (es. su un computer che svolge anche altre mansioni), ed in tale caso vengono definite Soft IOC [12].

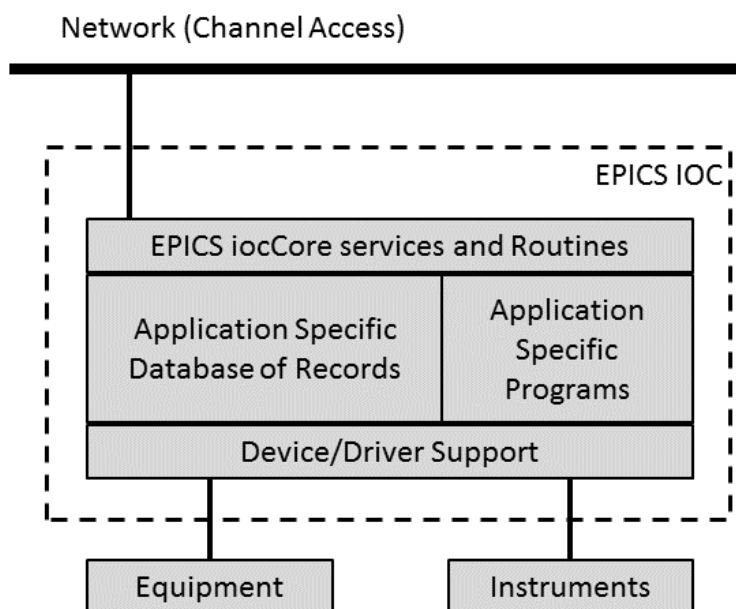


Fig. 2.5: Schema dei diversi componenti software che comprendono gli IOC di EPICS

L'IOC, per comunicare con le diverse strumentazioni hardware, necessita di un set di routine chiamate “*devices support*”. Questo permette al software di interfacciarsi e comandare i componenti hardware ed i Record.

La comunità di EPICS mette a disposizione una serie di strumenti che permette di gestire la maggior parte dei controlli distribuiti, come il controllo remoto, la conversione ed il filtraggio dei dati, l'analisi dei dati e molte altre.

Dal punto di vista dei sistemi hardware, gli IOC possono essere dei microcontrollori embedded, dei server montati su rack, un PC portatile o fisso. Generalmente questi sistemi montano una serie di moduli (GPIB, RS-232, DIO o AIO cards, ecc.), che si interfacciano con gli strumenti del sistema di controllo (oscilloscopi, analizzatori di rete, alimentatori ecc.) e diversi dispositivi (motori, termocoppie, interruttori ecc.). Il sistema EPICS può essere installato su diversi sistemi operativi fra cui GNU/Linux, MS Windows, MacOS, Solaris, vxWorks.

2.3 CSS (*Control System Studio*)

Il CSS è un sistema di controllo che cerca di incorporare molte applicazioni, già esistenti in EPICS, in un unico prodotto che sia facile da gestire ed utilizzare anche da chi ha poca dimestichezza con l'informatica. Tuttora molte applicazioni EPICS sono sviluppate per UNIX e X-Windows (X11), e sono tutte indipendenti l'una dalle altre, rendendo così difficile l'interscambio di dati e non agevolano l'utente che si trova davanti ad interfacce con diversi stili e logiche.

Il CSS è creato sull'attuale tecnologia software, ovvero *Java* ed *Eclipse*, con speciale attenzione alla interoperabilità. Un punto di forza di questo prodotto è che l'interfaccia grafica è basata appunto su uno dei più moderni ed utilizzati framework per applicazioni grafiche Eclipse RPC (*Rich Client Platform*). Questo permette di integrare o cambiare

facilmente le applicazioni, in quanto pensate come plug-in, che quindi possono essere selezionate da un utente. Un'altra importante caratteristica è l'accessibilità dei dati a tutte le applicazioni, questo è dovuto all'utilizzo di un livello intermedio che opera come interfaccia tra i tipi CSS-data ed i dati definiti nel sistema di controllo. Questo livello è chiamato Data Access Layer (DAL) e assicura l'accesso trasparente ad ogni protocollo di controllo del sistema, quindi non è solo una piattaforma per EPICS ma per tutti i protocolli di sistema che implementano il DAL.

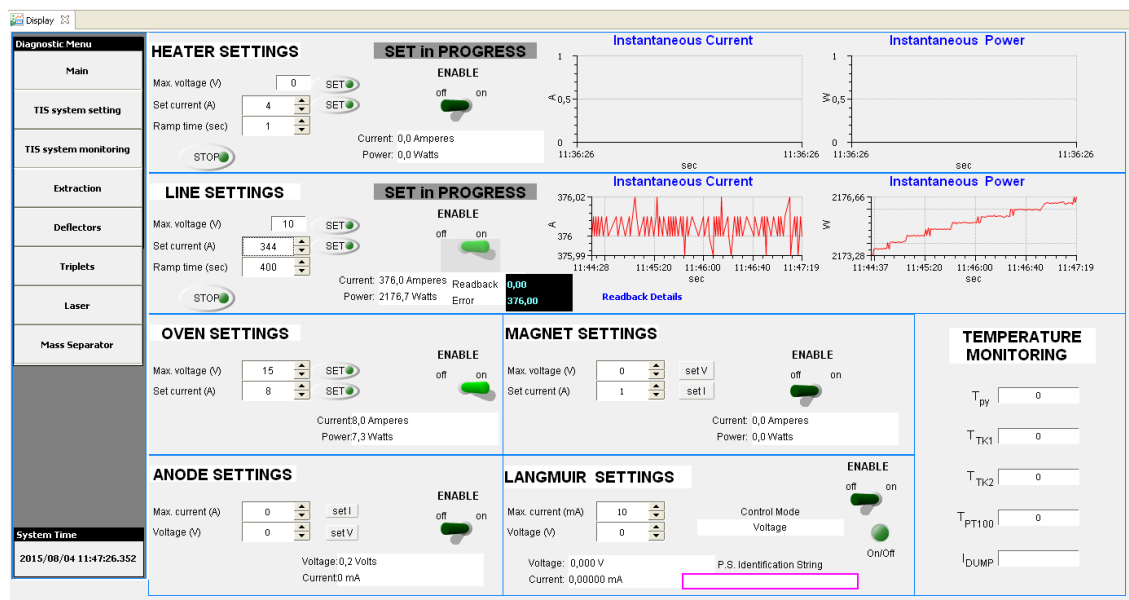


Fig. 2.6: Un esempio di interfaccia grafica sviluppata usando CSS

2.4 I sistemi di controllo nel progetto SPES

Per realizzare il sistema di controllo del progetto SPES si è scelto di utilizzare EPICS come struttura principale. Il sistema si divide in due aree principali:

- Sistemi di controllo basati su IOC in EPICS;
- Sistemi di controllo basati su PLC.

Il CA di EPICS viene utilizzato come rete di controllo principale, dove tutti i sistemi sono connessi fra loro per facilitare lo scambio di informazioni grazie alla loro interoperabilità. La rete di controllo principale si suddivide, per ogni sottosistema, in reti di telecomunicazioni private (VPN - *Virtual Private Networks*) al fine di separare i domini di broadcast. Il gateway¹ della CA permette la comunicazione attraverso diverse VPN.

Sulla rete di controllo principale, possono essere disposti molti servizi base di EPICS come ad esempio l'archiviazione dei dati, la grafica delle interfacce, le applicazioni auto-tuning, così anche i servizi di rete come NTP, DNS, DHCP, firewall. In figura 2.7 viene rappresentata l'architettura del network nel progetto SPES.

Questa rete è costituita da una serie di IOC disposti in modo da riuscire a controllare tutta la strumentazione per l'acceleratore. Alcuni sottosistemi controllati dalla rete EPICS sono il "*target and ion source*" e la "*beam diagnostic*".

¹Un gateway è un dispositivo di rete il cui suo scopo principale è quello di veicolare i pacchetti di rete all'esterno di una rete locale (LAN).

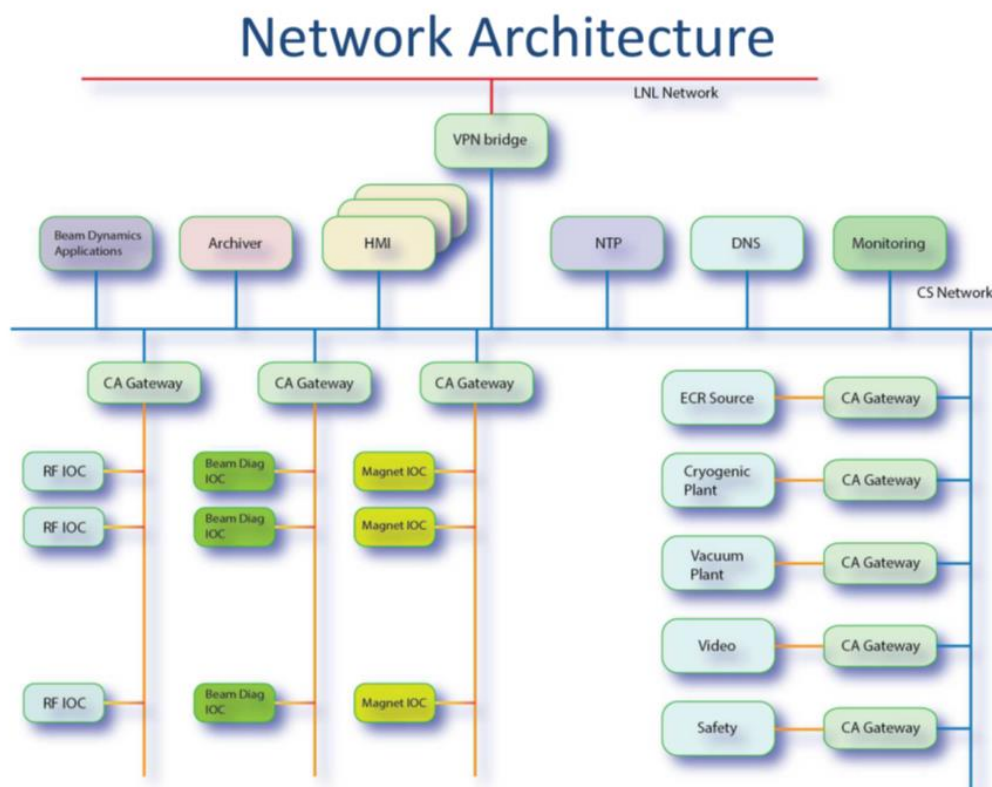


Fig. 2.7: Architettura network del progetto SPES

Nei sottosistemi che necessitano di una alta affidabilità, si sono utilizzati i PLC (*Programmable Logic Controller*) per sviluppare il sistema di controllo. Alcuni esempi sono il sistema di protezione di macchine e persone, il vuoto e la ventilazione. I PLC che controllano questi sistemi sono connessi alla rete EPICS, molti dei quali sono accessibili solamente in lettura attraverso delle variabili di processo.

2.4.1 Impatto sui sistemi di controllo degli acceleratori ai LNL

Con l'arrivo del progetto SPES ai LNL (*Laboratori Nazionali di Legnaro*) è stato necessario revisionare ed aggiornare molti sistemi di controllo precedentemente esistenti nei laboratori, in particolare quelli che stanno per essere direttamente collegati all'impianto di SPES. Questo è stato il caso di ALPI (acceleratore LINAC superconduttore). L'aggiornamento di questo sistema è stato fondamentale per permettere l'interconnessione e l'interoperabilità di tutti i sistemi che utilizzano il protocollo di comunicazione CA di EPICS. Questo ha permesso di usare gli IOC, non solo per la strumentazione del progetto SPES, ma anche per tutte le apparecchiature già esistenti nel complesso degli acceleratori ai LNL. La conseguenza a questa necessità è stata una standardizzazione della totalità dei componenti hardware e software usati per sviluppare il sistema di controllo.

In questo contesto è evidente la necessità di utilizzare dei controllori I/O personalizzati, che incorporino diverse funzionalità per riuscire a far fronte alle esigenze dei diversi sottosistemi. Questa necessità ha condotto allo sviluppo di una piattaforma hardware standard per l'introduzione degli IOC in tutti i futuri sistemi di controllo [11].

2.5 IOC standard dei sistemi di controllo in EPICS

E' risultato necessario introdurre uno standard per lo sviluppo degli IOC in EPICS. D'altra parte, EPICS è stato scelto come sistema standard per lo sviluppo del nuovo sistema di controllo di SPES [15] [16]. L'architettura di questo sistema di controllo è costituito da una serie di controllori (IOC) interconnessi tramite il protocollo del CA di EPICS.

In questo senso, una delle decisioni prese è stata quella di sviluppare degli IOC che erano in grado di soddisfare tutte le esigenze comuni dei sistemi di controllo da sviluppare. Lo scopo di questo IOC è di diventare uno standard di costruzione per lo sviluppo di tutti i futuri sistemi di controllo a LNL. Gli obiettivi principali che si sono perseguiti sono stati la standardizzazione dell'hardware e del software, nonché l'interoperabilità dei sistemi.

Data la complessità del progetto e le verifiche necessarie per testare l'affidabilità dell'IOC, si sono dovuti aspettare circa due anni per la realizzazione della prima versione.

2.5.1 Descrizione dell'IOC

L'IOC viene inteso come un sistema standard, con la necessità di interfacciarsi con tutta la strumentazione prevista nel complesso LNL, in modo da poterla controllare. Gli strumenti forniti dal sistema EPICS sono stati utilizzati per sviluppare il software e farlo diventare uno standard. Per ogni applicazione si è sviluppato un algoritmo di controllo su misura.

E' stato scelto come piattaforma hardware per i diversi IOC il PC industriale denominato COM (*Computer on Modules*). Questi sono PC altamente integrati e compatti che comprendono CPU, memoria e interfacce comuni I/O basati su PC standard (come USB, SATA, audio, video, Ethernet, PCI, PCI Express ecc.). In particolare, il modello "6 COM Express" è stato utilizzato come standard [17]. La figura 2.8 mostra una foto del modello, mentre la figura 2.9 mostra il suo diagramma funzionale.

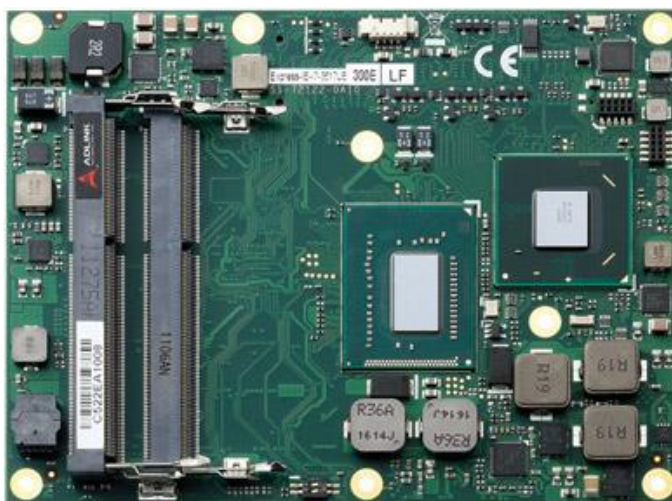


Fig. 2.8: Scheda del COM (Computer on Module) (*Adlink/stype6Express-1B*)

Il COM sarà installato su una scheda madre personalizzata, progettata a LNL. Le periferiche, quali I/O digitali, ADC², DAC, controllore dei motori passo-passo, le interfacce di comunicazione ecc. che sono collegati al COM, saranno montate sulla scheda madre. Il suo design è stato attentamente considerato al fine di coprire tutte le esigenze comuni di futuri sistemi di controllo previsti ai laboratori.

Essenzialmente, sarà costituita da:

²Analog to Digital Converter (ADC), in italiano convertitore analogico-digitale, è un circuito elettronico in grado di convertire un segnale analogico con andamento continuo (ad es. una tensione) in una serie di valori discreti. Il convertitore digitale-analogico o DAC compie l'operazione inversa

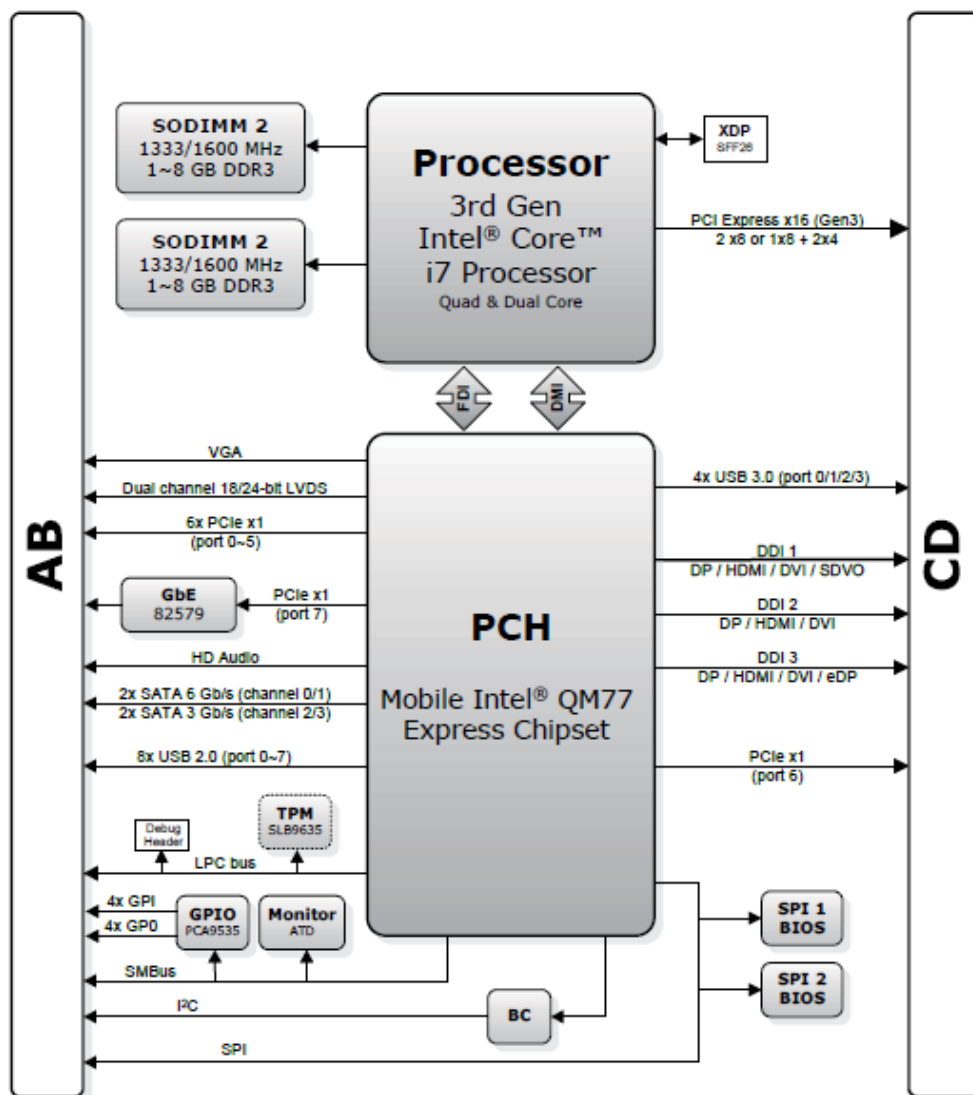


Fig. 2.9: Schema a blocchi funzionale della scheda COM

- 8 ADC da 16-bit, con frequenza di acquisizione pari a 1 MSample/s;
- 2 ADC da 24-bit, con frequenza di acquisizione pari a 312 KSample/s;
- 8 DAC da 16-bit;
- 2 DAC da 24-bit;
- 8 porte seriali RS232/RS485³.
- 8 controllori per motori passo-passo;
- 1 interfaccia di controllo 1-Wire⁴;

³Definisce un'interfaccia seriale a bassa velocità di trasmissione per lo scambio di dati tra dispositivi digitali.

⁴La rete da campo 1-Wire[®] è un protocollo standard basato su di un solo filo di comunicazione, che include numerosi dispositivi e sensori frequentemente utilizzati nel campo dell'automazione industriale e domestica.

- 1 interfaccia CAN bus⁵
- altri servizi per PC standard come VGA, USB, SATA, PCIe, audio, Ethernet, WiFi, SD ecc.

Il PC industriale è stato inoltre dotato di PoE (*Power over Ethernet*) che permette di alimentare apparecchiature utilizzando lo stesso cavo che le collega alla rete dati Ethernet. Questa tecnica sarà disponibile per applicazioni di bassa potenza. Alcune interfacce sono già disponibili direttamente dal COM, altri saranno controllati tramite porte USB. Molte altre saranno controllate da un FPGA⁶ che comunicherà con il COM attraverso la porta PCIe (*PCI Express*)⁷.

2.5.2 Architettura Hardware

I prototipi sono stati sviluppati utilizzando Adlink, modello 6 COM Express module, installato sulla scheda madre. Dispositivi commerciali di I/O digitale, ADC, DAC e schede PCIe sono state inserite sulla scheda madre in modo che l'IOC sia in grado di effettuare delle comunicazioni di tipo I/O.

Le schede Adlink DAQe-2214 sono state utilizzate come degli ingressi ADC. Ogni scheda sfrutta una porta con interfaccia PCIe ed è provvista di 16 canali ognuno dei quali presenta una risoluzione di 16-bits con campionamento a 250 KSample/s ed una range di $\pm 10V$. E' inoltre provvisto di 24 canali digitale per funzioni di I/O. Allo stesso modo le schede Adlink PCIe-6216 sono state utilizzate come uscite DAC. Esse sono provviste di 16 canali ognuno dei quali presenta una risoluzione di 16-bits con campionamento a 250 KSample/s ed una range di $\pm 10V$ usando una porta PCIe. In appendice A vengono inseriti le specifiche tecniche delle schede appena descritte. In figura 2.10 è mostrata una foto del prototipo di IOC con il COM installato su una scheda madre (*Carrier*) e connessi con le schede DAQe-2214 e PCIe-6216.

2.5.3 Implementazione del software

La ditta ADLINK fornisce i driver Linux per le schede di espansione utilizzate sui prototipi. I driver sono forniti di API (*Application Programming Interfaces*)⁸. Al fine di interfacciare il dispositivo IOC con dei supporti per i driver ADLINK in EPICS, è stato utilizzato il pacchetto `asynDriver` [20]. Quest'ultimo presenta una struttura di uso generale per l'interfaccia dello strumento con il codice sorgente per la comunicazione a basso livello. Con questa struttura, i driver di interfaccia sono stati sviluppati nei linguaggi di programmazione C e C++.

L'acquisizione degli input analogici viene eseguita utilizzando una funzione periodica che permette di effettuare una scansione sul software `asynDriver`. Questa funzione è in grado di leggere gli ingressi degli ADC ed eseguire un aggiornamento dei valori appena

⁵Il Controller Area Network, noto anche come CAN-bus, è uno standard seriale per bus di campo (principalmente in ambiente automotive), di tipo multicast, per collegare diverse unità di controllo elettronico (ECU). Il CAN è stato espressamente progettato per funzionare senza problemi anche in ambienti fortemente disturbati dalla presenza di onde elettromagnetiche e può utilizzare come mezzo trasmissivo una linea a differenza di potenziale bilanciata come la RS-485.

⁶Un dispositivo Field Programmable Gate Array (FPGA), è un circuito integrato le cui funzionalità sono programmabili via software. Tali dispositivi consentono l'implementazione di funzioni logiche anche molto complesse, e sono caratterizzati da un'elevata scalabilità.

⁷Il PCI Express (Peripheral Component Interconnect Express), ufficialmente abbreviato in PCIe, è uno standard di interfaccia d'espansione a bus seriale per computer.

⁸Con Application Programming Interface (API), si indica ogni insieme di procedure disponibili al programmatore, di solito raggruppate a formare un set di strumenti specifici per l'espletamento di un determinato compito all'interno di un certo programma. Spesso con tale termine si intendono le librerie software disponibili in un certo linguaggio di programmazione.

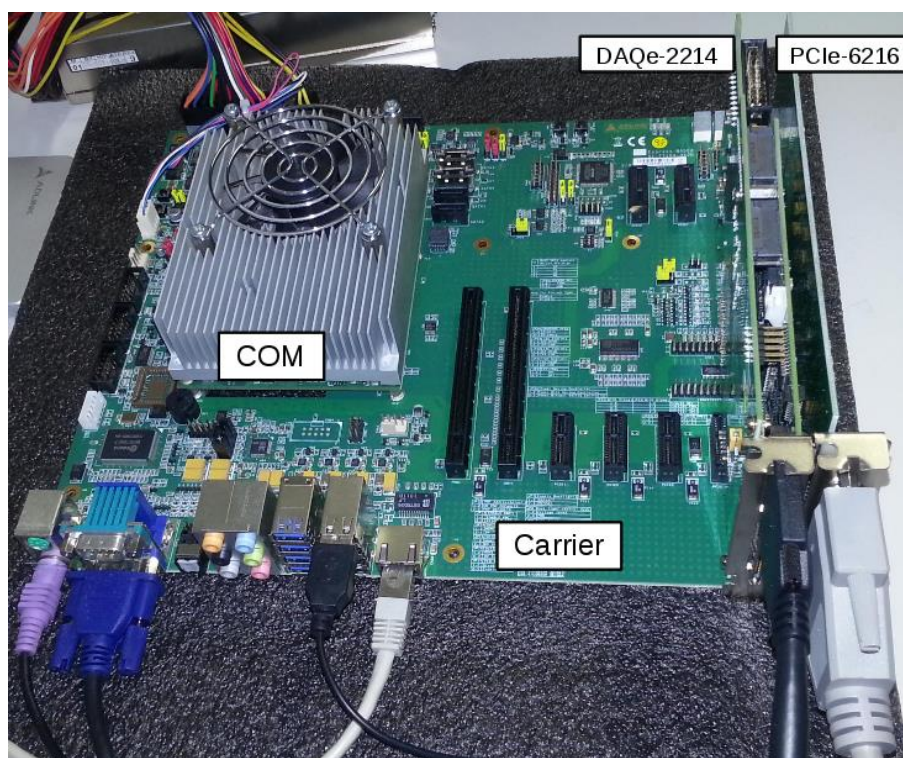


Fig. 2.10: Foto del prototipo per l'IOC standard

letti all'interno della libreria dove sono posizionati i diversi parametri. In questo modo, i record in EPICS che sono agganciati ad un ingresso analogico, ricevono una richiesta di interruzione ogni volta che un nuovo valore è disponibile. All'interno del ciclo, della funzione che effettua la scansione, è stato introdotto un ritardo regolabile per consentire di cambiare la frequenza di campionamento degli ingressi. La stessa procedura viene eseguita per l'acquisizione degli ingressi digitali. La figura 2.11 mostra un diagramma di flusso di questo algoritmo di acquisizione, dove la funzione periodica *ScanTask*, prima chiama *readADC* che utilizza l'API proprietario ADLINK, poi chiama la funzione di *callback* che aggiorna i record EPICS attraverso *readInt32*.

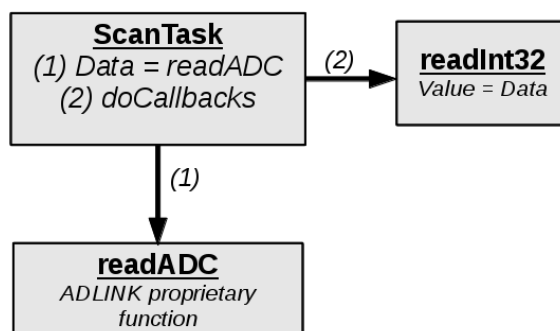


Fig. 2.11: Diagramma di flusso dell'acquisizione degli ingressi analogici.

D'altra parte, per le uscite analogiche, è stata sviluppata una funzione in grado di scrivere sui canali del DAC attraverso il software *asynDriver*. Questa funzione viene chiamata ogni volta che un nuovo valore viene scritto in un record di EPICS collegato ad un'uscita analogica, passando così il valore sul canale. La stessa procedura si applica per le uscite digitali. La figura 4.6 mostra un diagramma di flusso di questo algoritmo in grado di aggiornare le uscite analogiche, quando un nuovo valore viene scritto all'interno

del record, *writeInt32* chiama *writeDAC* che utilizza l'API proprietario ADLINK [11].

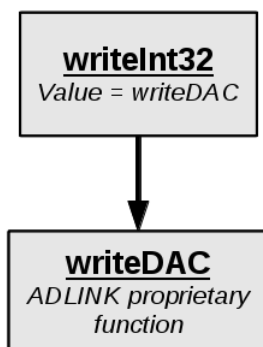


Fig. 2.12: Diagramma di flusso dell'aggiornamento delle uscite analogiche.

2.6 Sviluppi apportati al sistema di controllo

In questo paragrafo vengono descritti i progetti che hanno portato allo sviluppo della strumentazione realizzata e descritta nei successivi capitoli. Le evoluzioni apportate al sistema di controllo sono stati:

- l'acquisizione della temperatura della camera target tramite l'implementazione di un lettore nel sistema EPICS;
- la modifica delle schede elettroniche per il condizionamento dei segnali all'interno della box di diagnostica;
- la realizzazione di una scheda elettronica per controllare la movimentazione pneumatica e la sua implementazione nel sistema EPICS.

Mentre per altri progetti è stato svolto uno studio preliminare e pertanto sono ancora in attesa di approvazione, questi sono stati inseriti nel capitolo 6.

In figura 5 viene rappresentato, tramite una modellizzazione 3D, il laboratorio off-line del front-end prima delle modifiche apportate al sistema di controllo.

2.6.1 Sviluppo del sistema di acquisizione di temperatura per il monitoraggio della camera target

Per il sistema di acquisizione della temperatura della camera target si è pensato di utilizzare lo strumento “nanodac” della casa Eurotherm[®]. Questo strumento permette di analizzare contemporaneamente il segnale di diversi tipi di termocoppie. In particolare il device ha quattro canali per l'acquisizione. Il sistema è stato valutato per l'utilizzo di:

1. Una termocoppia di tipo “C” la quale misura la temperatura direttamente del target;
2. Una termocoppia di tipo “C” la quale misura la temperatura del dump di sicurezza posizionato sulla camera dopo il target;
3. Una termoresistenza di tipo “PT100” la quale misura in modo diretto la temperatura dell'O-Ring posizionato tra la cover della camera ed il piatto di raffreddamento.

Il device è attualmente in funzione presso il laboratorio front-end. Il driver del dispositivo è stato scritto in ambiente EPICS e posizionato nel PC 10.5.0.50, inoltre è stata creata un'apposita interfaccia implementata in CSS. Il lettore è stato posizionato all'interno del

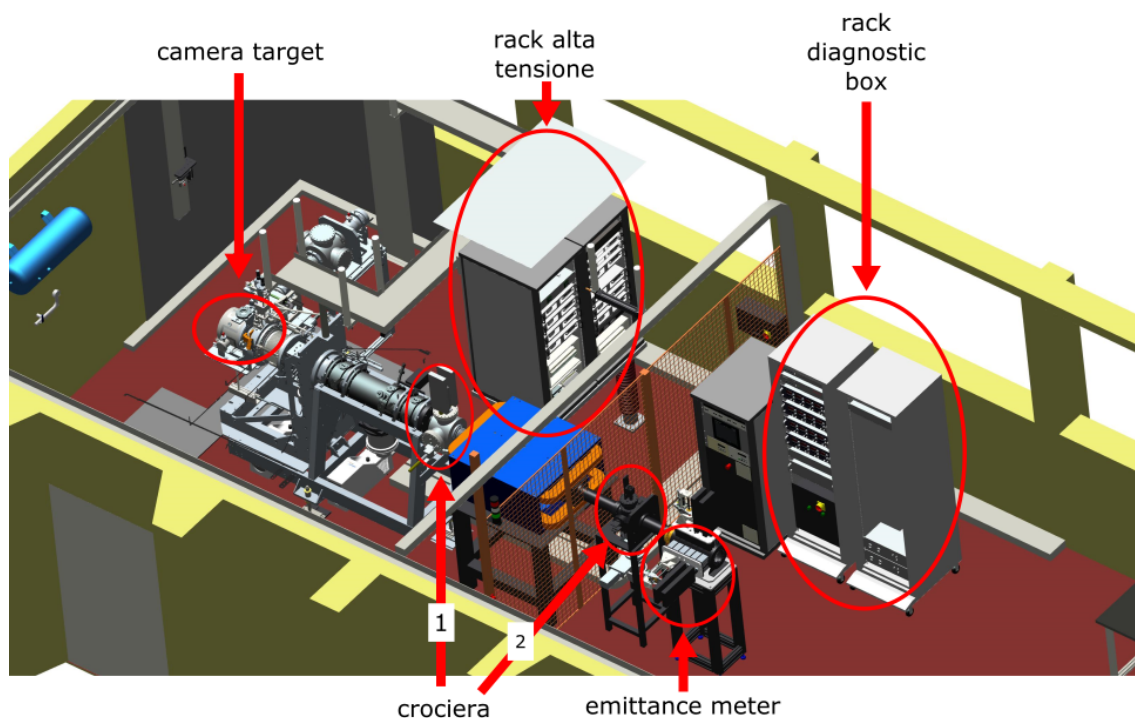


Fig. 2.13: Planimetria del laboratorio front-end prima della proposta di aggiornamento.

rack di alta tensione in quanto è in contatto, attraverso i cavi delle termocoppie, con la camera target.

Nel capitolo 3 vengono fornite le informazioni dettagliate dello strumento e della sua implementazione.

In figura 2.15, viene rappresentata la situazione del rack di alta tensione nella configurazione precedente ed in quella successiva alle modifiche apportate.

2.6.2 Progettazione del sistema di condizionamento dei segnali per la diagnostic box del progetto SPES

A causa dell'arrivo dei nuovi IOC standard dei sistemi di controllo in ambiente EPICS, descritti nel paragrafo 2.5, è stato necessario modificare le schede elettroniche riguardanti la box di diagnostica del fascio per l'interfaccia con i nuovi computer.

Dalla diagnostic box utilizzata precedentemente, si sono andate a modificare le schede elettroniche per l'acquisizione dei segnali derivanti da beam profiler e dalla farady cup. Questo ha permesso di aggiornare il vecchio sistema, potendo così comunicare direttamente con il PC industriale, senza passare attraverso la "interconnection board" e la "raspberry PI" che pertanto sono state rimosse nella nuova versione.

La configurazione interna dei diversi componenti della nuova box di diagnostica è rappresentata in figura 2.16. All'interno della scatola è stato necessario inserire la fonte di alimentazione delle schede e un ulteriore componente chiamato ultravolt, il quale permette di mettere a tensione positiva (+500 V) il soppressore della faraday cup. La gestione di sicurezza del componente ultravolt è data da una disabilitazione software, tramite il PC industriale e una fisica, tramite un interruttore che lo scollega dall'alimentazione quando si apre la diagnostic box.

In figura 2.17 si nota la sistemazione, all'interno del laboratorio off-line, delle box di diagnostica. L'acquisizione dei segnali provenienti dalla faraday cup e dal beam profiler

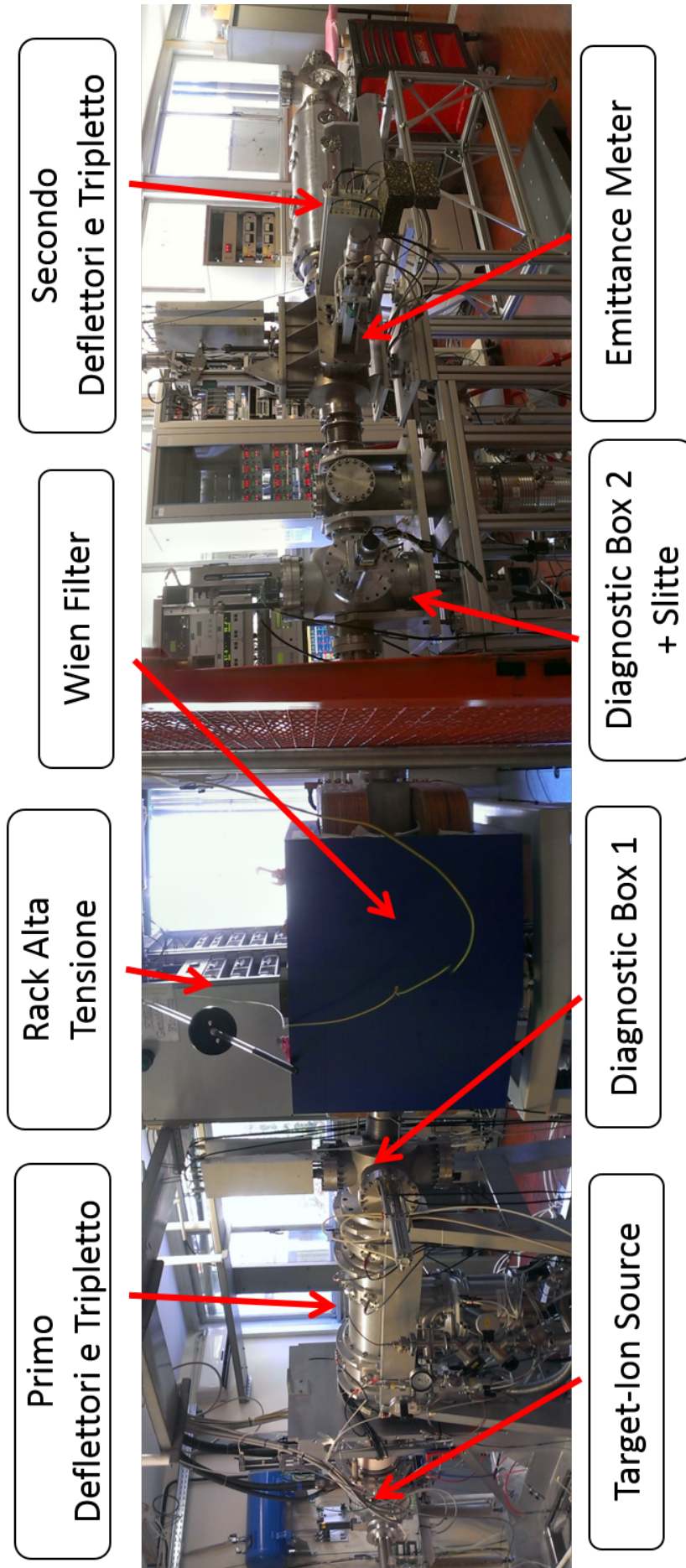


Fig. 2.14: Foto del canale radioattivo del laboratorio off-line del Front-End

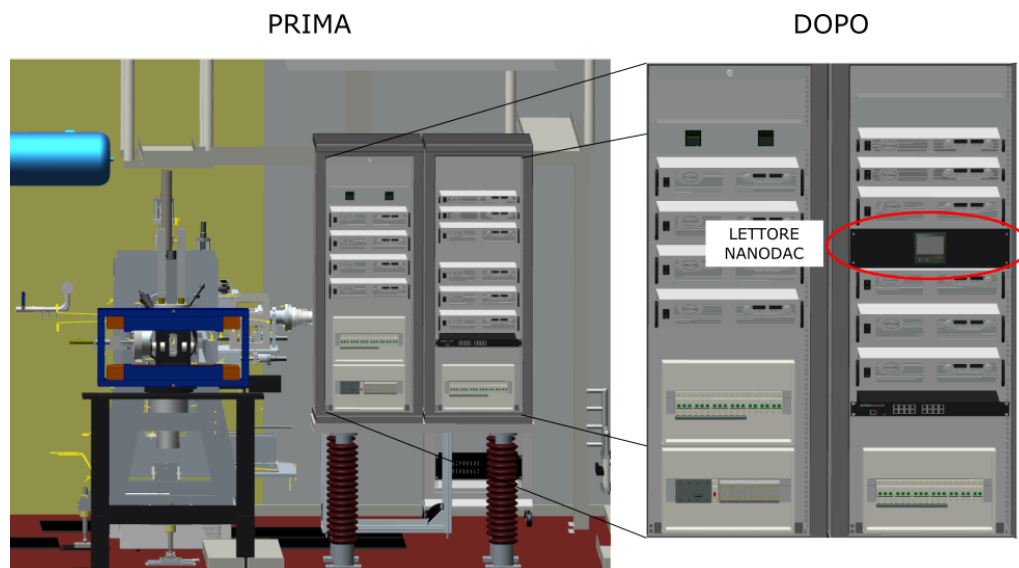


Fig. 2.15: Rappresentazione tramite Creo di come sarà modificato il rack di alta tensione prima e dopo l'aggiornamento.

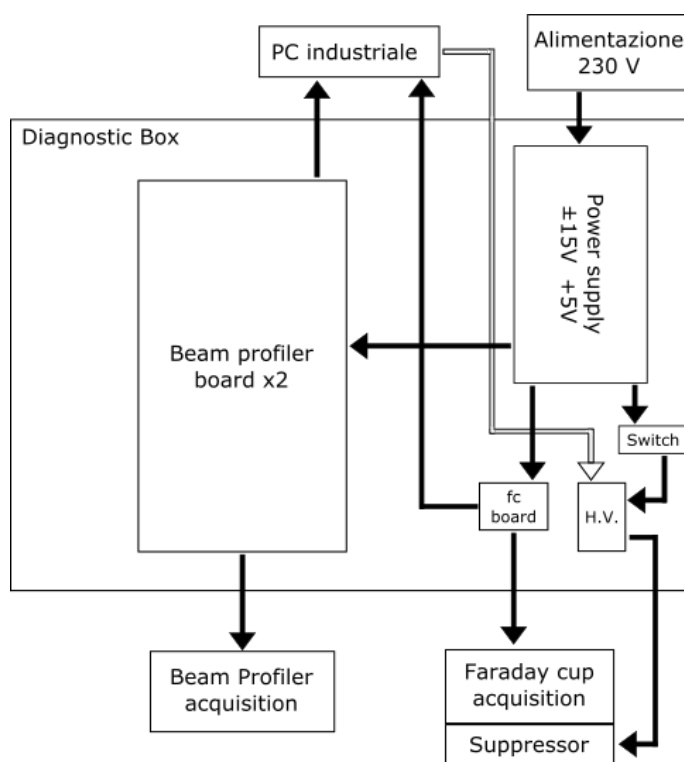


Fig. 2.16: Disegno della disposizione delle schede all'interno della nuova box di diagnostica.

della prima e della seconda crociera saranno gestiti rispettivamente dalle diagnostic box numero 1 e 2.

Nel capitolo 4 vengono descritte nel dettaglio le diverse schede, la loro progettazione, realizzazione ed implementazione all'interno della rete EPICS nei laboratori del front-end off-line.

2.6.3 Sviluppo della scheda elettronica di comando dei motori pneumatici

Per la movimentazione degli strumenti faraday cup, beam profiler e slitte, che saranno collocate all'interno del bunker, si è deciso di cambiare il tipo di movimentazione passando da motori passo-passo a quelli pneumatici, perchè le radiazioni danneggiano le spire e l'elettronica dell'attuatore. A tal proposito è significativa l'esperienza maturata al CERN dove ogni sei mesi era necessario sostituire il motore elettrico. E' stato perciò necessario pensare ad una nuova tipologia di controllo in grado di attuare un'elettrovalvola.

Per raggruppare le schede di controllo dei motori pneumatici si è realizzata una pneumatic box, in grado di gestire i diversi attuatori pneumatici utilizzati nella movimentazione dei sensori e delle slitte.

Per il sistema di controllo dei motori pneumatici si è progettata una scheda in grado di comunicare direttamente col PC industriale e che sia in grado di gestire contemporaneamente 2 elettrovalvole e 4 switch per il finecorsa. Questa configurazione è stata pensata in quanto gli strumenti si trovano sempre a coppie, pertanto per ogni crociera è necessario pensare alla movimentazione di almeno due elettrovalvole.

Le coppie da gestire nella movimentazione sono:

- Faraday cup e beam profiler;
- Le due slitte che permettono la selezione del fascio dopo il Wien filter.

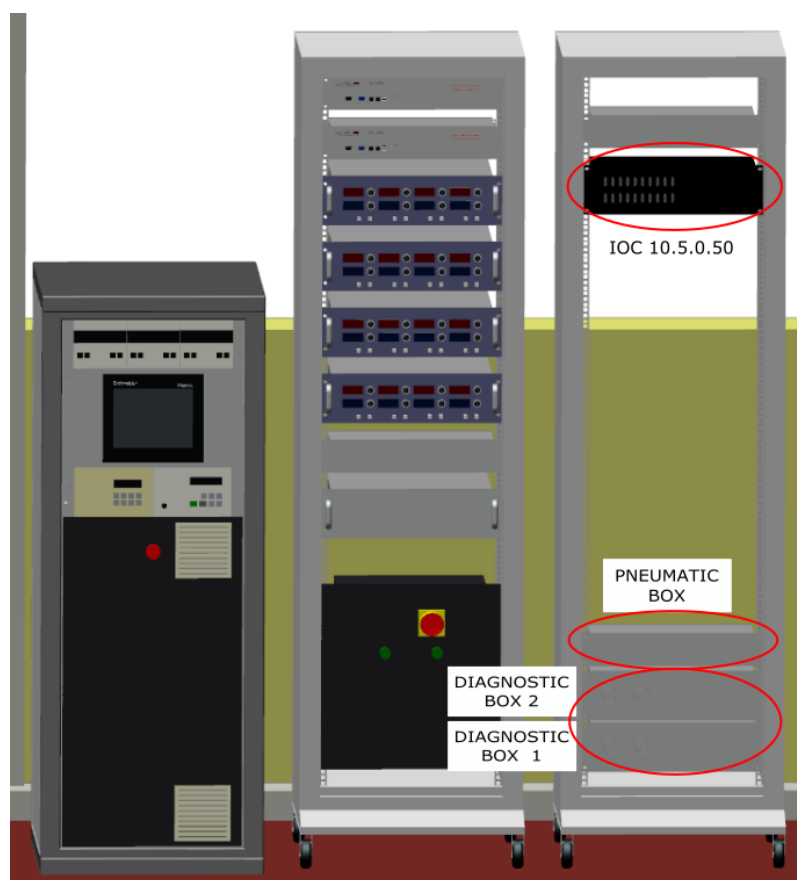


Fig. 2.17: Disposizione delle nuove box all'interno del rack diagnostic box dopo l'aggiornamento proposto.

Per quel che riguarda l'acquisizione del potenziometro, necessario per il corretto funzionamento delle slitte, si è pensato di far arrivare il segnale direttamente ad un PLC in grado di interfacciarsi con la rete EPICS.

In figura 2.17 viene rappresentata la situazione del rack diagnostic box nella configurazione successiva alla proposta di aggiornamento. Si fa notare che oltre alle box di diagnostica e alla box pneumatica sarà necessario aggiungere un PC industriale, che in questo caso gli è stato assegnato l'indirizzo IP 10.5.0.50, in modo da riuscire ad elaborare i segnali e comandare le schede per azionare le elettrovalvole.

Nel capitolo 5 viene descritta nel dettaglio la scheda, la sua progettazione, realizzazione ed implementazione all'interno della rete EPICS nei laboratori del front-end off-line.

2.7 Conclusioni

La standardizzazione dei sistemi di controllo del complesso degli acceleratore ai LNL, viene affrontato attraverso lo sviluppo dei nuovi IOC con base in EPICS. Dal punto di vista dell'hardware, questa innovazione pone un'importante base ai successivi sviluppi che verranno affrontati durante l'espansione del progetto SPES. Il tutto si baserà su un'integrazione estesa dei Computer on Module, installati su una scheda madre progettata su misura, dotata di tutto il necessario per soddisfare i requisiti di tutte le interfacce I/O dei diversi sistemi di controllo.

Il sistema basato su EPICS porterà un'architettura software omogenea con tutti i benefici aggiuntivi che ne conseguono, come l'interoperabilità completa tra i sistemi, e servizi essenziali fra i quali l'archiviazione dei dati e la registrazione.

Le innovazioni apportate al sistema di controllo del progetto SPES saranno aggiunte al laboratorio del front-end on-line.

Driver dello strumento di misura “nanodac” attraverso il software EPICS

Il registratore “nanodac”, della casa Eurotherm[®], è lo strumento scelto per l’acquisizione della temperatura della camera target attraverso delle termocoppie, di tipologia differenti e opportunamente posizionate. Come tutti i diversi device che sono e saranno presenti nel progetto SPES, anche questo lettore dovrà essere interfacciato con la rete di controllo EPICS. Per questo sarà necessario creare un apposito IOC all’interno di un PC industriale, in grado attraverso un opportuno driver e database, di essere gestito tramite l’interfaccia operatore del CSS.

Nel capitolo 2.6.1 è stato presentato il progetto preliminare di quando trattato nei successivi paragrafi ed il posizionamento del registratore all’interno del laboratorio off-line del front-end.

3.1 Introduzione allo strumento di registrazione/regolazione “nanodac”

Il registratore/regolatore nanodac[™] è un’unità compatta, 1/4 DIN, con montaggio a pannello, che dispone di 4 ingressi universali ad elevata accuratezza per la registrazione di dati e offre il controllo PID. Il display da 3,5” TFT offre una visualizzazione parametri di processo con un’ampia selezione di schermate configurabili. E’ possibile visualizzare: trend orizzontali e verticali, grafici a barre orizzontali e verticali, pagine numeriche, stato degli allarmi e loop di controllo. Il prodotto, oltre a fornire molteplici visualizzazioni in tempo reale e storiche, fornisce diverse strategie di archiviazione dei dati utilizzando la memoria flash integrata da 50 MB, un dispositivo USB rimovibile e il trasferimento di dati via FTP verso un server specificato. I quattro canali di ingresso universali offrono elevata accuratezza (adatta all’uso in applicazioni Nadcap - *National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program*) e campionamento da 125 ms. Si possono inoltre utilizzare altri 14 canali virtuali per funzioni matematiche, contatori, comunicazioni Slave e totalizzatori.

Lo strumento nanodac può fornire anche due loop di controllo indipendenti. Questa funzionalità di controllo utilizza un algoritmo PID, garantendo prestazioni e affidabilità elevate. Tra le sue funzionalità sono incluse le possibilità di effettuare l’autotune, l’eliminazione degli overshoot (*cutback*) e la compensazione per variazioni dell’alimentazione grazie al feedforward.

3.2 Presentazione del protocollo di comunicazione modbus

Il protocollo MODBUS definisce il formato e la modalità di comunicazione tra un “master” che gestisce il sistema e uno o più “slave” che rispondono alle interrogazioni del master. Il protocollo definisce come il master e gli slave stabiliscono ed interrompono la comunicazione, come trasmettitore e ricevitore devono essere identificati, come i messaggi devono venire scambiati e come gli errori rilevati.

Si possono connettere un master e fino a 247 slave su una linea comune, occorre notare che questo è un limite logico del protocollo, l’interfaccia fisica può peraltro limitare ulteriormente il numero di dispositivi. Solo il master può iniziare una transazione. Una



Fig. 3.1: Foto dello strumento “nanodac”

transazione può avere il formato domanda/risposta diretta ad un singolo slave o broadcast in cui il messaggio viene inviato a tutti i dispositivi sulla linea che non danno risposta. Una transazione è composta da una struttura singola domanda/singola risposta o una struttura singolo messaggio broadcast/nessuna risposta. Alcune caratteristiche del protocollo sono definite e sono:

- standard di interfaccia;
- parità;
- numero di stop bit;
- formato RTU (binario).

3.2.1 Formato dei messaggi

Per poter comunicare tra due dispositivi, il messaggio deve essere contenuto in un “involucro”. Quest’ultimo lascia il trasmettitore attraverso una “porta” ed è “trasportato” lungo la linea fino ad una analoga “porta” sul ricevitore. MODBUS stabilisce il formato di questo involucro che, tanto per il master che per lo slave, comprende:

- L’indirizzo del dispositivo con cui il master ha stabilito la transazione (l’indirizzo “0” corrisponde ad un messaggio broadcast inviato a tutti i dispositivi slave);
- Il codice della funzione che deve essere o è stata eseguita;
- I dati che devono essere scambiati;
- Il controllo d’errore composto secondo l’algoritmo CRC16.

Se un dispositivo individua un errore nel messaggio ricevuto (di formato, di parità o nel CRC16) il messaggio viene considerato non valido e scartato, uno slave che rilevi un errore nel messaggio quindi non eseguirà l’azione e non risponderà alla domanda, così come se l’indirizzo non corrisponde ad un dispositivo in linea.

Formato dei caratteri

Normalmente i dispositivi che adottano il protocollo MODBUS utilizzano un formato 8, N, 1. Ovvero: 8 bit di dati, senza alcun controllo di parità e con 1 bit di stop

L'indirizzo

Come sopra menzionato, le transazioni MODBUS coinvolgono sempre il master, che gestisce la linea, ed uno slave per volta (tranne nel caso di messaggi broadcast). Per identificare il destinatario del messaggio viene trasmesso come primo carattere un byte che contiene l'indirizzo numerico del dispositivo slave selezionato. Ciascuno degli slave quindi avrà assegnato un diverso numero di indirizzo che lo identifica univocamente. Gli indirizzi ammissibili sono quelli da 1 a 247, mentre l'indirizzo 0, che non può essere assegnato ad uno slave, posto in testa al messaggio trasmesso dal master indica che questo è "broadcast", cioè diretto a tutti gli slave contemporaneamente. Possono essere trasmessi come broadcast solo messaggi che non richiedano risposta per espletare la loro funzione, quindi solo le assegnazioni.

Il codice funzione

Il secondo carattere del messaggio identifica la funzione che deve essere eseguita attraverso la comunicazione trasmessa dal master, cui lo slave risponde a sua volta con lo stesso codice ad indicare che la funzione è stata eseguita. Normalmente le MODBUS più utilizzate sono quelle riportate di seguito :

Funzione	Descrizione
01	Read Coil Status
02	Read Input Status
03	Read Holding Registers
04	Read Input registers
05	Force Single Coil
06	Single register
07	Read Status
15	Force multiple Coils
16	Preset Multiple Registers

Tab. 3.1: Funzioni Modbus

Il CRC16

Gli ultimi due caratteri del messaggio contengono il codice di ridondanza ciclica (*Cyclic Redundancy Check*) calcolato secondo l'algoritmo CRC16. Questo verifica se sono stati persi dei pacchetti di informazioni.

Sincronizzazione dei messaggi

La sincronizzazione del messaggio tra trasmettitore e ricevitore viene ottenuta interponendo una pausa tra i messaggi pari ad almeno 3,5 volte il tempo di un carattere. Se il dispositivo ricevente non riceve per un tempo di 3,5 caratteri, ritiene completato il messaggio precedente e considera che il successivo byte ricevuto sarà il primo di un nuovo messaggio e quindi un indirizzo.

3.3 Progettazione del driver

Verrà ora presentato come creare un IOC con lo strumento “nanodac” partendo dall’installazione del software necessario fino alla struttura dei diversi record che si sono creati per arrivare all’interfaccia operatore. Per l’installazione del software EPICS all’interno di una macchina con sistema operativo Ubuntu si faccia riferimento all’appendice B. Per prima cosa è essenziale installare il pacchetto EPICS base (appendice B.1), Asyn (appendice B.3) e Sequencer (appendice B.2). Per l’installazione del protocollo modbus, si faccia riferimento all’appendice B.4.

3.3.1 Creazione dell’IOC per lo strumento nanodac

Per creare un IOC per lo strumento si deve creare una cartella dove verranno inseriti i diversi file. Nel nostro caso si è utilizzato il nome TaIoni_Tmcp, dove TaIoni fa riferimento a *target and ion source*, perchè i sensorie che si vogliono misurare sono disposte nella *camera target*, invece Tmcp è riferito alle termocoppie. La procedura è la seguente.

1. Creare e posizionarsi sulla cartella

```
mkdir TaIoni_Tmcp
```

2. Eseguire

```
makeBaseApp.pl -t -ioc TaIoni_Tmcp
```

3. Eseguire

```
makeBaseApp.pl -t -ioc -i TaIoni_Tmcp
```

4. Modificare il file configure/RELEASE come in appendice C.1

```
ASYN=.../support/asyn4-26
```

```
MODBUS=.../support/modbusR2-7
```

5. modificare il file iocBoot/iocTaIoni_Tmcp/st.cmd come specificato in appendice C.2, considerando la seguente struttura generale

```
drvAsynIPPortConfigure(portName, hostInfo, priority, noAutoConnection,  
                        noProcessEos)
```

```
modbusInterposeConfig(portName, linkType, timeoutMsec, writeDelayMsec)
```

```
drvModbusAsynConfigure(portName, tcpPortName, slaveAdress,  
                        modbusFunction, modbusStartAdress, modbusLenght, dataType,  
                        pollMsec, plcType)
```

6. Creare il file include.dbd descritto in appendice C.4

```
touch TaIoni_TmcpApp/src/include.dbd
```

7. Modificare il file TaIoni_TmcpApp/src/Makefile come in appendice C.3

```
test_LIBS += asyn
```

```
test_LIBS += modbus
```

```
TaIoni_TmcpApp_DBD += include.dbd
```

8. A questo punto è necessario creare i database. In `TaIoni_TmcpApp/Db/` si crea il file

```
touch TaIoni_TmcpApp/Db/read_nanodac.db
```

e lo si modifica come in appendice C.5.

9. In `TaIoni_TmcpApp/Db/` si crea il file

```
touch TaIoni_TmcpApp/Db/configure_nanodac.db
```

e lo si modifica come in appendice C.6.

10. In `TaIoni_TmcpApp/Db/` si crea il file

```
touch TaIoni_TmcpApp/Db/eurotherm.substitution
```

e lo si modifica come in appendice C.7.

11. E' infine necessario modificare il file `TaIoni_TmcpApp/Db/Makefile`, inserendo i database creati come in appendice C.8

```
DB += configure_nanodac.db
```

```
DB += read_nanodac.db
```

```
DB += eurotherm.substitutions
```

12. Compilare eseguendo il comando

```
make clean uninstall
```

e

```
make
```

Arrivati a questo punto l'IOC è perfettamente installato. Il processo può essere avviato in due modi distinti, il primo manualmente, il secondo tramite il riavvio automatico della macchina.

Per l'avvio manuale è necessario eseguire le seguenti istruzioni in un terminale di Ubuntu:

1. Posizionarsi nella cartella dell'IOC ed eseguire

```
cd iocBoot/iocTaIoni_Tmcp/
```

2. Nel nostro caso si è eseguita l'istruzione

```
../bin/linux-x86_64/TaIoni_Tmcp st.cmd
```

3. A questo punto viene compilato il codice `st.cmd` e avviato l'IOC

Per l'avvio automatico è necessario installare il software *sysv-rc-softioc* (appendice B.5) ed eseguire le seguenti istruzioni:

1. Posizionarsi nella cartella dell'IOC e copiare il file `/usr/share/doc/sysv-rc-softioc/config.example` come `config`

```
cp /usr/share/doc/sysv-rc-softioc/config.example config
```

2. Modificare il file appena copiato (appendice C.9)

- Inserire il nome della propria applicazione IOC sulla linea **NAME=...**
- Inserire il proprio nome utente sulla linea **USER=...**
- Inserire il proprio hostname sulla linea **HOST=...**
- Inserire nell’ultima riga

```
[ CHDIR="$CHDIR"/iocBoot/iocTaIoni_Tmcp ]
```

3. Assegnare i permessi di esecuzioni al file st.cmd

```
[ chmod +x iocBoot/iocTaIoni_Tmcp/st.cmd ]
```

4. E’ necessario cambiare la line

```
[ export EPICS_HOST_ARCH=...
```

Con il path corretto nel file

```
[ /usr/share/sysv-rc-softioc/softioc ]
```

5. Eseguire

```
[ sudo manage-iocs install TaIoni_Tmcp ]
```

Questo andrà a creare lo script iniziale **/etc/init.d/softioc-TaIoni_Tmcp**

6. Quando l’IOC è in esecuzione, ci si può collegare da console usando l’applicazione telnet conoscendo la porta configurata nel file **config**. Nel nostro caso basta eseguire

```
[ telnet localhost 7106 ]
```

Dove le diverse opzioni per le funzioni del driver sono descritte in dettaglio nella tabella seguente:

comandi per drvModbusAsynConfigure		
Parametri	Data Type	Descrizione
portName	string	Nome della porta modbus da creare
tcpPortName	string	Nome della porta IP che si è scelto precedentemente
slaveAdress	int	L’indirizzo che si è scelto per il device slave nella comunicazione modbus.
modbusFunction	int	Codice della funzione scelta per la porta (es. 23 per la funzione di sola lettura)
modbusStartAdress	int	Indirizzo di inizio per accedere al segmento di dati.
modbusLeght	int	La lunghezza del segmento di dati. E’ specificata in bit.
modbusDataType	int	Serve per impostare il tipo di dati della porta. Il tipo di dati si sceglie in base alla tabella drvUser.
pollMsec	int	Tempo di ritardo del <i>polling</i> per la verifica ciclica, viene specifica in msec. Se 0 viene letto solo durante la creazione della porta.
plcType	string	Questo parametro viene usato per fornire delle indicazione in asynReport.

comandi per drvAsynIPPortConfigure		
Parametri	Data Type	Descrizione
portName	string	Nome della porta IP
hostInfo	IP	Indirizzo IP dello strumento
Priority	int	Priorità di trasmissione dei dati. Valore default 0
noAutoConnect	int	Impostato a 0 in modo che asynManager svolga automaticamente le connessioni
noProcessEos	int	Impostato a 0 perchè la comunicazione modbus su TCP non richiede di processare la fine della stringa

comandi per modbusInterposeConfig		
Parametri	Data Type	Descrizione
portName	string	Nome della porta IP che si è scelto precedentemente
linkType	int	Tipologia di collegamento: 0 = TCP/IP 1 = RTU 2 = ASCII
timeoutMsec	int	Il timeout espresso in millisecondi per svolgere le operazioni di lettura e scrittura. Se 0, viene usato il valore di default pari a 2000 m.
writeDelayMsec	int	Il ritardo in msec prima che ognuno scriva da EPICS al device. Viene usato solamente nel caso di comunicazione RTU. Se 0 viene impostato il valore di default di 3.5 ms.

Tab. 3.2: Descrizione dei parametri del software modbus di Mark Rivers

3.3.2 Creazione dei database per l'IOC

Per la scrittura dei database si è cercato uno standard. In questo modo nel caso si volesse aggiungere uno o più strumenti uguali basteranno inserire poche righe di codice per configurarlo.

Per questo motivo si è creato il file “*eurotherm.substitution*” che permette di sostituire all'interno dei database un nome più corto di quello effettivamente utilizzato. Questo per permettere una stesura più veloce e semplificata dei singoli record.

Pertanto sono stati creati 2 database diversi:

- read_nanodac.db: utilizzato per la lettura delle PV e di informazioni riguardanti lo strumento;
- configure_nanodac.db: utilizzato per la scrittura di informazioni all'interno dello strumento.

Nelle seguenti pagine viene fornita una breve introduzione sui record utilizzati all'interno dei database e su come sono stati utilizzati.

In linea generale un record presenta dei campi comuni, fra i quali:

- DESC: dove viene fornita una breve descrizione di cosa produce il record;
- SCAN: per decidere ogni quanto effettuare la scansione di quel determinato record;

- PINI: per inizializzare il record all’esecuzione del programma senza aspettare la scansione;
- DTYP: per individuare il tipo di comunicazione fornita dallo strumento a cui il record si deve interfacciare.

Record ai (*analog input*)

Questo tipo di record è stato utilizzato per leggere il valore dei canali in ingresso allo strumento “nanodac”, per leggere l’offset sulle PV e per verificare se il sensore inserito in un determinato ingresso è guasto.

Particolare campo di questo record è “*field(INP, "@asynMask\$(PORT), OFFSET, BIT)MODBUS_DATA"*”. Di seguito vengono descritti i parametri del campo:

- INP: definisce l’ingresso a cui il record accede per procurarsi il valore;
- @asynMask\$(PORT): indica il valore della porta creata precedentemente nella funzione `drvModbusAsynConfigure`;
- OFFSET: indica l’offset a cui si trova la specifica porta per la funzione che si sta svolgendo. Ad esempio se si vuole comunicare con la porta 6256 e la porta di comunicazione creata è la 6250, allora si dovrà indicare il valore 6;
- BIT: indica quanti bit devono essere acquisiti per la corretta lettura della porta.

Record ao (*analog output*)

Questo tipo di record è stato utilizzato per scrivere su una porta dello strumento. Questo ha permesso di modificare il valore di offset.

Particolare campo di questo record è “*field(OUT, "@asynMask(PORT), OFFSET, BIT)MODBUS_DATA"*”, dove OUT si riferisce alla particolare porta a cui il record deve scrivere il valore. I parametri sono equivalenti a quelli precedentemente descritti.

Record calc (*calculation*)

Questo tipo di record viene usato per effettuare delle operazioni algebriche, logiche ecc. con valore presi da altri record. Il suo utilizzo è stato quello di modificare il range di lettura della temperatura e la modifica del valore di offset. I campi privilegiati di questo record sono:

- INPA: definisce il record da cui prendersi il valore per effettuare il calcolo. A questo ingresso viene assegnata la variabile A;
- CALC: definisce l’operazione valuta. In questo campo si possono inserire i normali operatori algebrici fra cui +, −, / ecc. ma anche le funzioni come *sin()*, *cos()* ecc. Il risultato di questa operazione è anche il valore del record;
- EGU: indica l’unità di misura riferita al valore del record;
- PREC: indica la precisione del valore, ovvero i numeri dopo la virgola.

In figura 3.3 e figura 3.2 vengono visualizzate le rappresentazioni grafiche dei record, che sono stati creati per lo strumento “nanodac”, attraverso il software VDCT (*Visual Database Configuration Tool*).

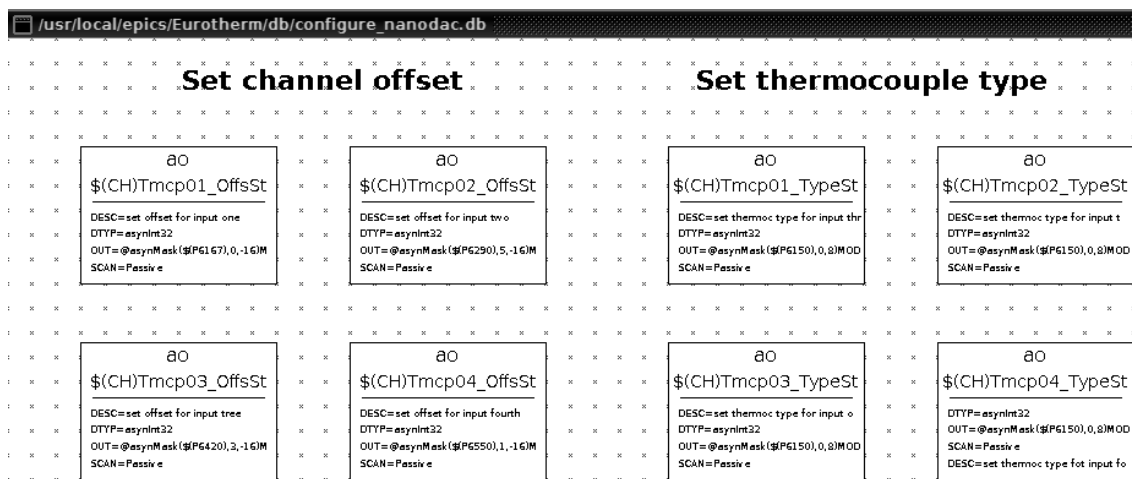


Fig. 3.2: Visualizzazione grafica del database configure_nanodac.db

Nome canale	Indirizzo				nome PV
	can 1	can 2	can 3	can 4	
Valore PV	256	260	264	268	TaIoni_TmcpXX_TempRd
Sensore rotto	6161	6289	6417	6545	TaIoni_TmcpXX_SensRd
Offset	6167	6295	6423	6553	TaIoni_TmcpXX_OffsSt
Tipo di linearizzazione	6150	6278	6406	6534	TaIoni_TmcpXX_TypeSt

Tab. 3.3: Indirizzo delle porte utilizzate dallo strumento “nanodac”

3.3.3 Porte utilizzate per la configurazione dello strumento

In tabella 3.3 vengono specificate le porte che sono state utilizzate per la configurazione dello strumento “nanodac” con i relativi nomi assegnati ai diversi record. Dove si sono utilizzate le notazioni “can 1” per definire l’indirizzo a cui si deve accedere per il primo ingresso. La sigla “TmcpXX” dove XX sta ad indicare il numero della termocoppia (es. Tmcp01 indica la termocoppia inserita nel primo canale).

- TaIoni_TmcpXX_TempRd: indica il valore della temperatura acquisita;
- TaIoni_TmcpXX_SensRd: è il valore del sensore utile ad indentificare quando ciò che legge non ha senso, pertanto viene definito come rotto per un valore pari a 100 ed in buono stato quando viene letto un valore uguale a 1;
- TaIoni_TmcpXX_OffsSt: utilizzato per settare l’offset del valore di quel determinato canale;
- TaIoni_TmcpXX_TypeSt: utilizzato per settare il tipo di termocoppia inserita in quel determinato canale.

3.4 Installazione dell'hardware dello strumento

Lo strumento “nanodac” è stato inserito nel rack di alta tensione a 40 kV. Questo perchè il segnale che dovrà acquisire proviene dalle termocoppie¹ posizionate sul target che si

¹La termocoppia è un trasduttore di temperatura il cui funzionamento è basato sull’effetto termoelettrico. Questo effetto permette ad un circuito costituito da conduttori metallici o semiconduttori, attraverso una differenza di temperatura, di generare elettricità.

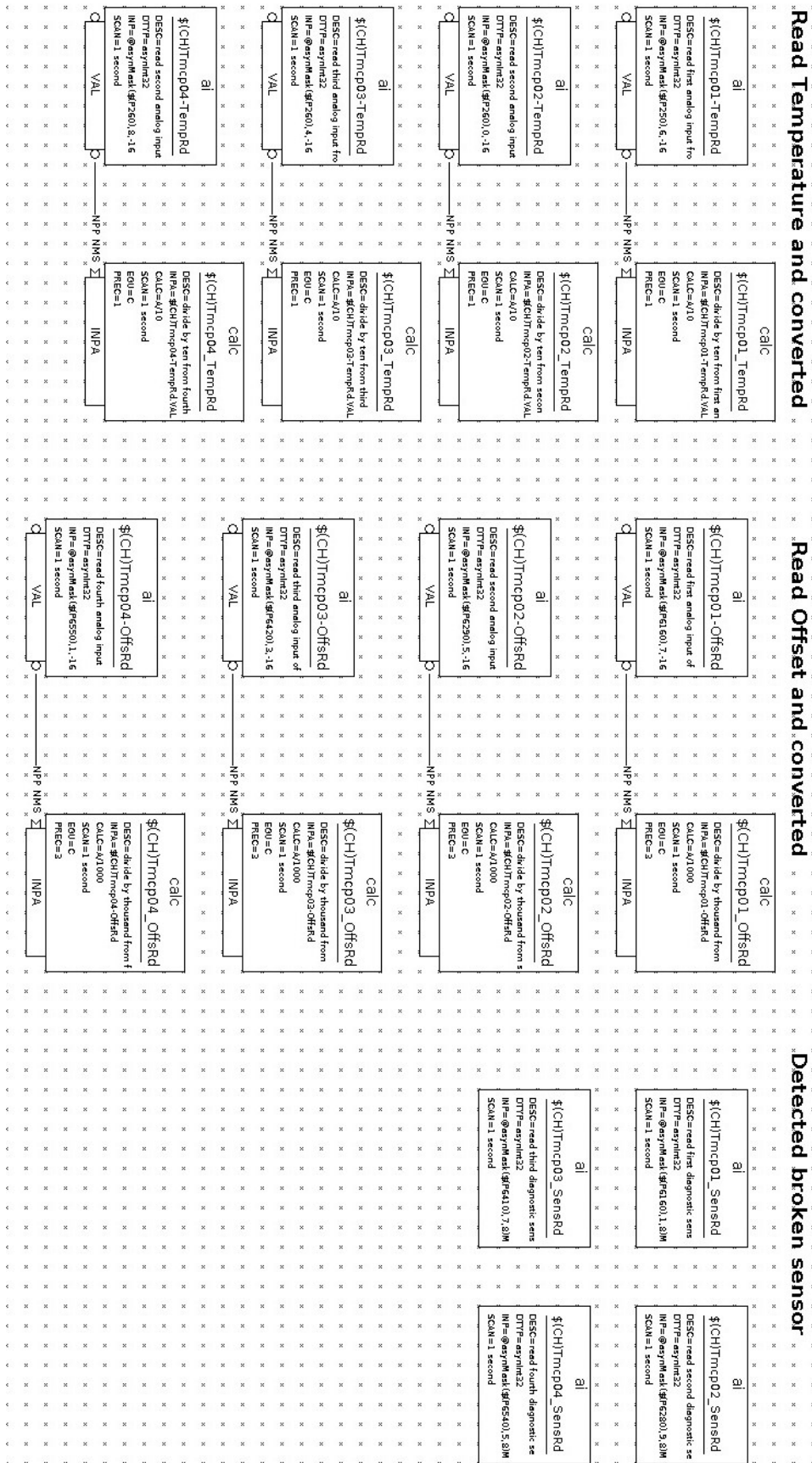


Fig. 3.3: Visualizzazione grafica del database read_nanodac.db

trova ad alta tensione. Per l'esperimento sono state utilizzate termocoppie di *tipo C* e *PT100*. L'installazione elettrica effettuata per lo strumento è descritta nella figura 3.4, mentre quello per le termocoppie in figura 3.5.

Prendendo come esempio l'installazione della PT100 nel canale 1, è necessario inserire un ponte fra gli ingressi 1- e 1+, su quest'ultimo viene posizionato un filo della termocoppia, mentre l'altro andrà inserito nel canale 1l.

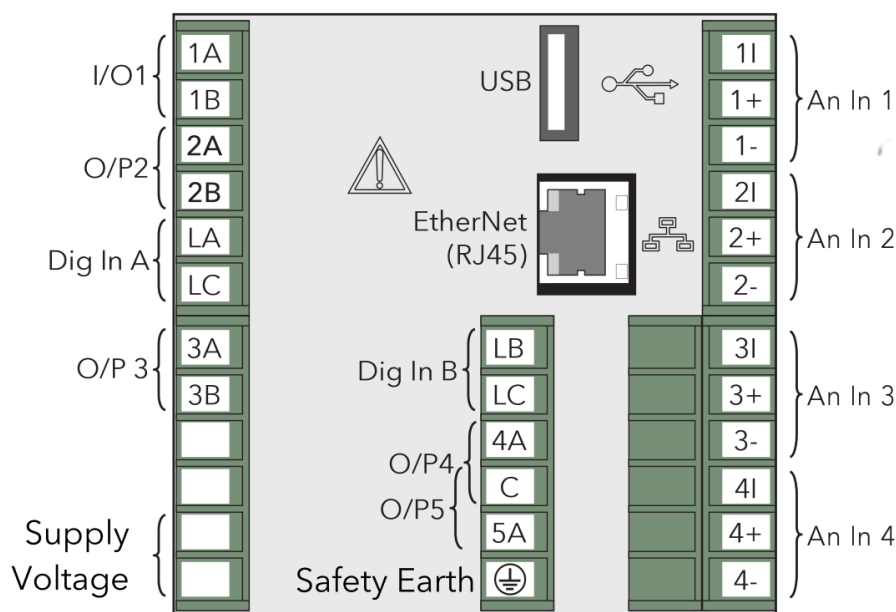


Fig. 3.4: Schema per installazione elettrica dello strumento

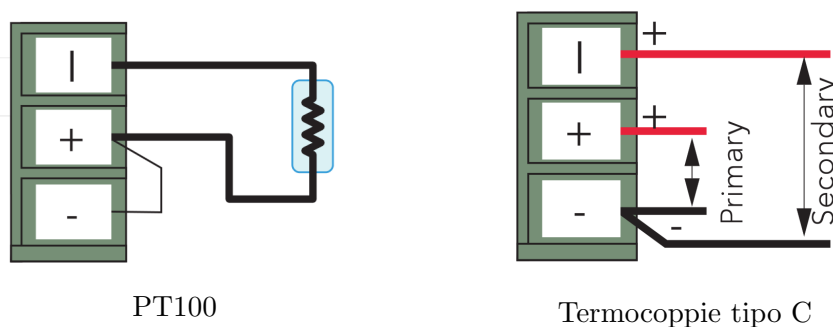


Fig. 3.5: Schema di installazione delle termocoppie utilizzate

In figura 3.4, viene descritto il diagramma di flusso della strumentazione. La misura di temperatura viene letta dal sensore che viene letto dal “nanodac”. Questo comunica attraverso la rete ethernet, nel nostro caso, con l’IOC 10.5.0.164 in cui è stato installato il sistema operativo Ubuntu ed i software necessari per la comunicazione attraverso la rete EPICS. Dopo l’elaborazione da parte dei diversi record il segnale viene trasmesso attraverso la rete ethernet all’interfaccia grafica in cui l’operatore può leggere i valori letti dallo strumento e configurare le termocoppie in base alle necessità.

che indica il valore della termocoppia viene inserita la scritta “out of range”.

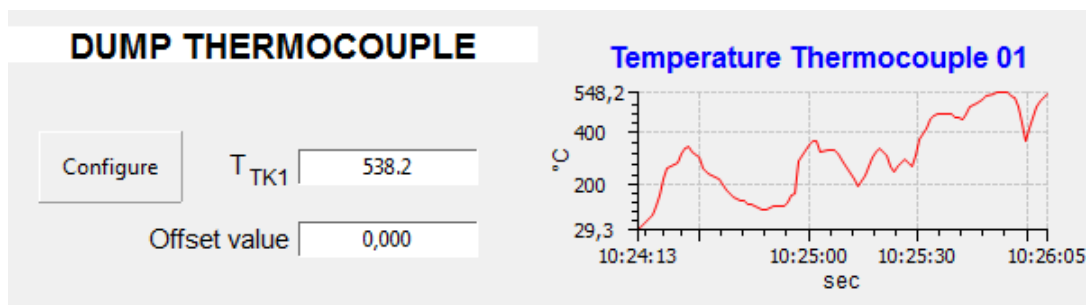


Fig. 3.7: Interfaccia CSS nel caso di termocoppia connessa correttamente

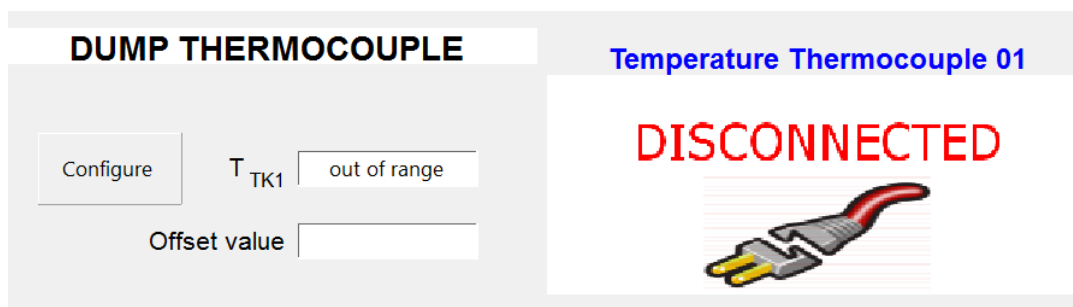


Fig. 3.8: Interfaccia CSS nel caso di termocoppia disconnessa

In figura 3.9 viene rappresentata l'interfaccia per la configurazione dello strumento. Essa presenta a sinistra delle finestre numeriche, sotto la scritta “Insert offset value”, dove vengono inseriti i valori di offset che si desiderano per i diversi canali. Una volta inserito il valore e premuto il tasto di invio viene visualizzato sulle finestre sotto la scritta “Validation”, il valore che lo strumento ha ricevuto ed impostato. A sinistra è stato inserito uno schema identico per la configurazione del tipo di termocoppie che sono configurate nei diversi canali. Mentre in basso viene descritta la procedura manuale per inserire i valori di offset e delle termocoppie. Premendo sul pulsante attivo con scritto “Instruction”, si apre il file pdf con la procedura di configurazione manuale dello strumento, comprensivo di immagini esplicative, con cui l'operatore può interagire con il device in caso di guasto.

Configure Thermocouple		Insert Thermoc type	
Insert offset value	Validation	Insert Thermoc type	Validation
Channel 01	###.###	Channel 01	###.###
Channel 02	###.###	Channel 02	###.###
Channel 03	###.###	Channel 03	###.###
Channel 04	###.###	Channel 04	###.###

Thermoc type: 1 = type C
6 = type K
22 = PT100

Manual procedure:
For configure the device log in as "configurazione" and insert password "100". Push "Instruction" button for see illustrate instruction and for know how to set nanodac channel parameter.

Instruction

Fig. 3.9: Interfaccia CSS per configurare lo strumento

3.6 Test effettuati per verificare la strumentazione

In questo capitolo vengono descritte le prove effettuate per verificare che la strumentazione fosse perfettamente funzionante, dalla prova dello strumento con il software fornito, fino all’installazione nel laboratorio del front-end e pertanto al regolare utilizzo da parte dei ricercatori.

3.6.1 Prove con il software “*iTools Engineering Studio*”

Per testare la strumentazione si è usato il software della casa Eurotherm[®] dal nome “*iTools Engineering Studio*”. Questo ha permesso di verificare che la strumentazione utilizzata, ovvero le termocoppie, lo switch ethernet, ed il device “nanodac”, funzionasse correttamente e che la comunicazione avvenisse con successo. In figura 3.10 si nota l’interfaccia grafica del software. Per agganciare il device voluto, dopo averlo configurato per la connessione in rete (preferibilmente con un IP statico), ci si posiziona sul menù multifunzione. Dopo aver premuto sul pulsante “*Aggiungi*” si inserisce l’indirizzo IP dello strumento, dopo una breve scansione lo strumento comparirà all’interno del “*device panel view*”. Attraverso il menù a sinistra si possono vedere i parametri interni, mentre al centro vengono esplorati i diversi parametri andando a visualizzare il nome, una breve descrizione, l’indirizzo ed il valore del parametro.

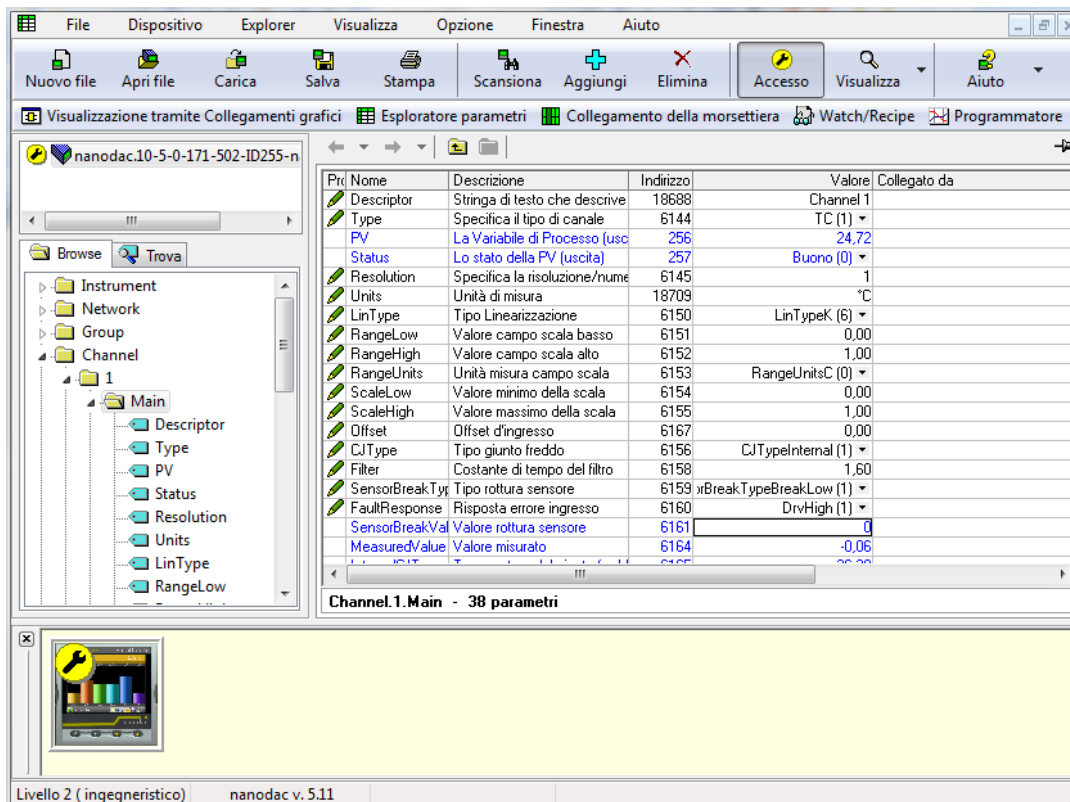


Fig. 3.10: Screenshot del programma *iTools Engineering Studio*

3.6.2 Prove con il software “*Simply Modbus TCP Client*”

Dopo aver effettuato questo test si è passati ad utilizzare un altro strumento chiamato “*Simply Modbus TCP Client*”. Attraverso questo software si sono potuti verificare diversi dati dello strumento che invece nel software usato precedentemente venivano calcolati automaticamente. Questi dati sono:

- mode: il modo della comunicazione, nel nostro caso TCP;
- IP Address: l'indirizzo IP;
- Port: la porta di comunicazione Modbus, generalmente è la 502;
- Slave ID: l'indirizzo dello strumento impostato come Slave (per ogni indirizzo principale si ha la possibilità di inserire 255 indirizzi Slave);
- First Register: indirizzo modbus da cui parte la registrazione;
- No. of Register: numero di registri acquisiti a partire dal valore inserito in First Register;
- function code: codice della funzione modbus che si vuole utilizzare;
- minus offset: offset minimo da cui inizia a leggere i registri;
- register size: grandezza dei registri.

Nella tabella principale, centrale rispetto all'interfaccia software (figura 3.11), vengono visualizzati i dati del registro, cioè la sua grandezza, il numero, i bytes letti, il valore acquisito dall'indirizzo e delle note aggiuntive se sono presenti.

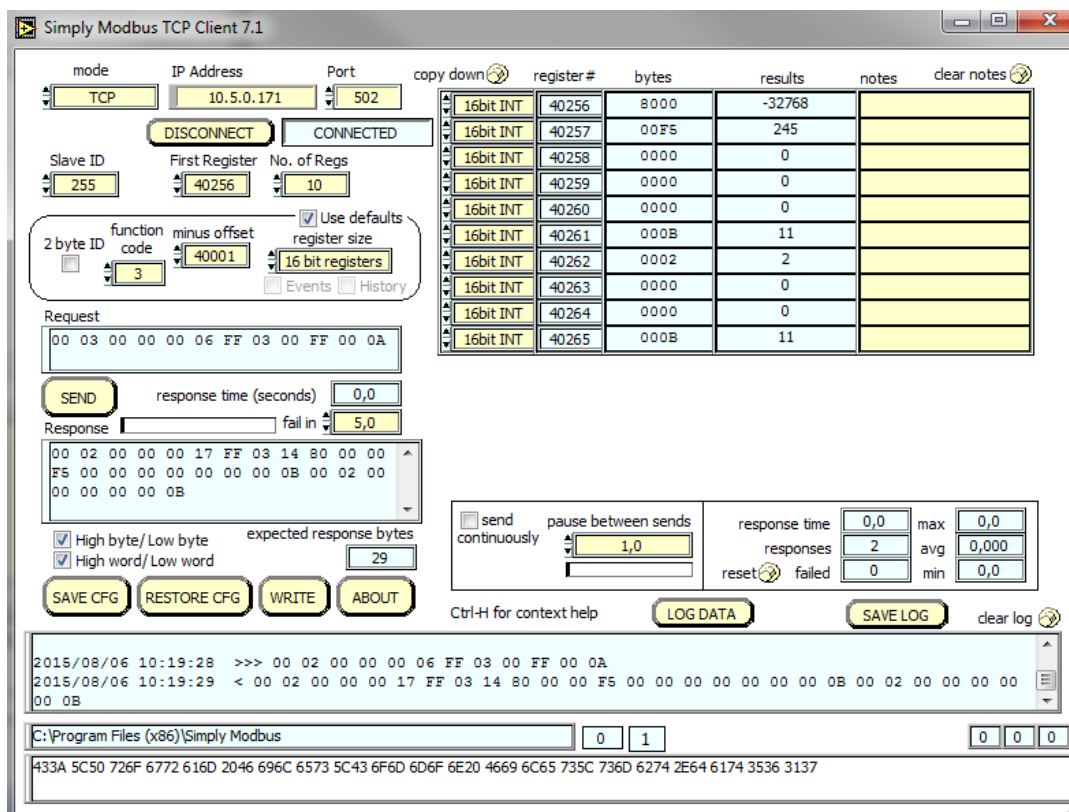


Fig. 3.11: Screenshot del programma *Simply Modbus TCP Client*

3.6.3 Installazione della strumentazione all'interno del laboratorio offline del front-end

Una volta verificato che la comunicazione fosse stabile, ed aver ottenuto tutte le informazioni necessarie riguardanti le diverse porte che si sono volute utilizzare, si è creato

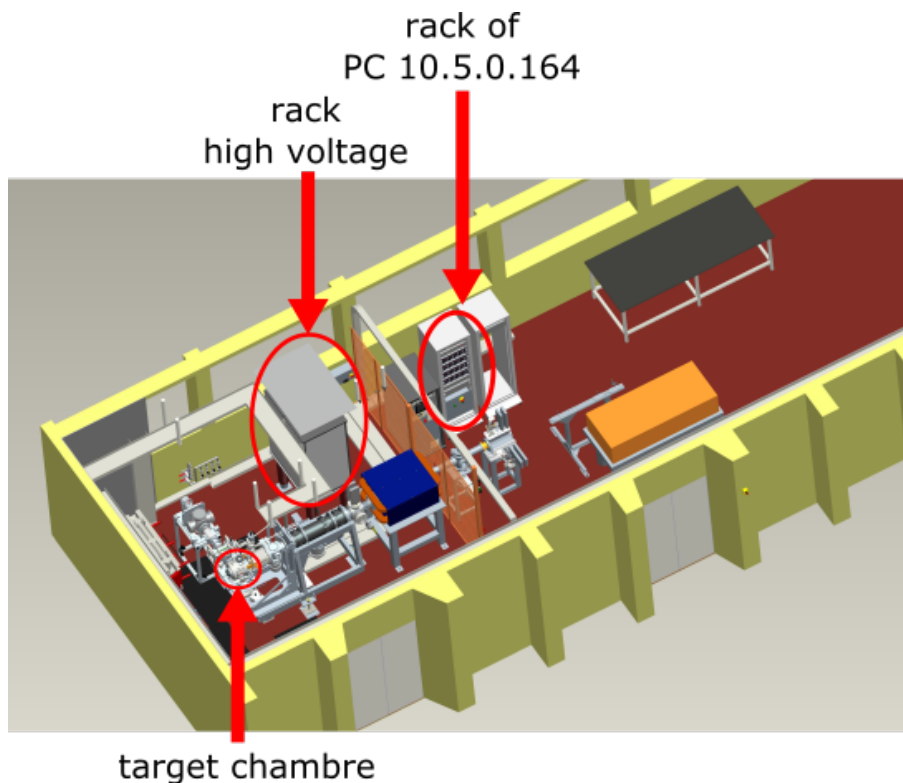


Fig. 3.12: Disposizione del laboratorio front-end con “Creo”.

il driver come descritto nel capitolo 3.3. Testato anche quest’ultimo si è portata tutta la strumentazione nel laboratori off-line del front-end per l’installazione dell’hardware. In figura 3.12 si mostra la rappresentazione del laboratorio front-end creata attraverso il software “Creo”. Le termocoppie sono posizionate nella camera target e sono collegate al lettore attraverso dei fili che percorrono una canalina sopraelevata, questo perchè sono in alta tensione. Il nanodac è posizionato all’interno del rack di alta tensione e comunica con l’IOC attraverso un convertitore di fibra ottica, il quale permette di isolare la tensione di massa del segnale, permettendo così di non avere delle scariche nel ricevitore.

In figura 3.13 vengono inserite le foto di dove è stato posizionato lo strumento all’interno del rack e dove sono state posizionate le termocoppie sulla camera.

3.7 Verifica della temperatura della camera target.

Una prima prova sul campo per la strumentazione appena installata è stato quello di verificare la temperatura letta durante il corretto funzionamento del front-end e confrontarlo con dati raccolti in precedenza e quelli ottenuti attraverso le simulazioni FEM “(*Finite Element Method*²)”.

Dopo i primi test si è notata una diminuzione della temperatura in corrispondenza dell’*O-ring* posto tra la *camera target* ed il *plate*, con una frequenza periodica. Grazie al nuovo device si sono potuti acquisire quattro segnali contemporaneamente, che hanno permesso di misurare diverse termocoppie. In figura 3.14 viene inserito un grafico delle variazioni di temperatura riguardo la *camera target*, il canale di uscita dell’acqua della camera ed il canale di ingresso del *chiller*, questo strumento viene utilizzato per raffreddare l’acqua che circola sulla superficie della camera. Da qui si è potuto notare, come la

²In matematica è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche.

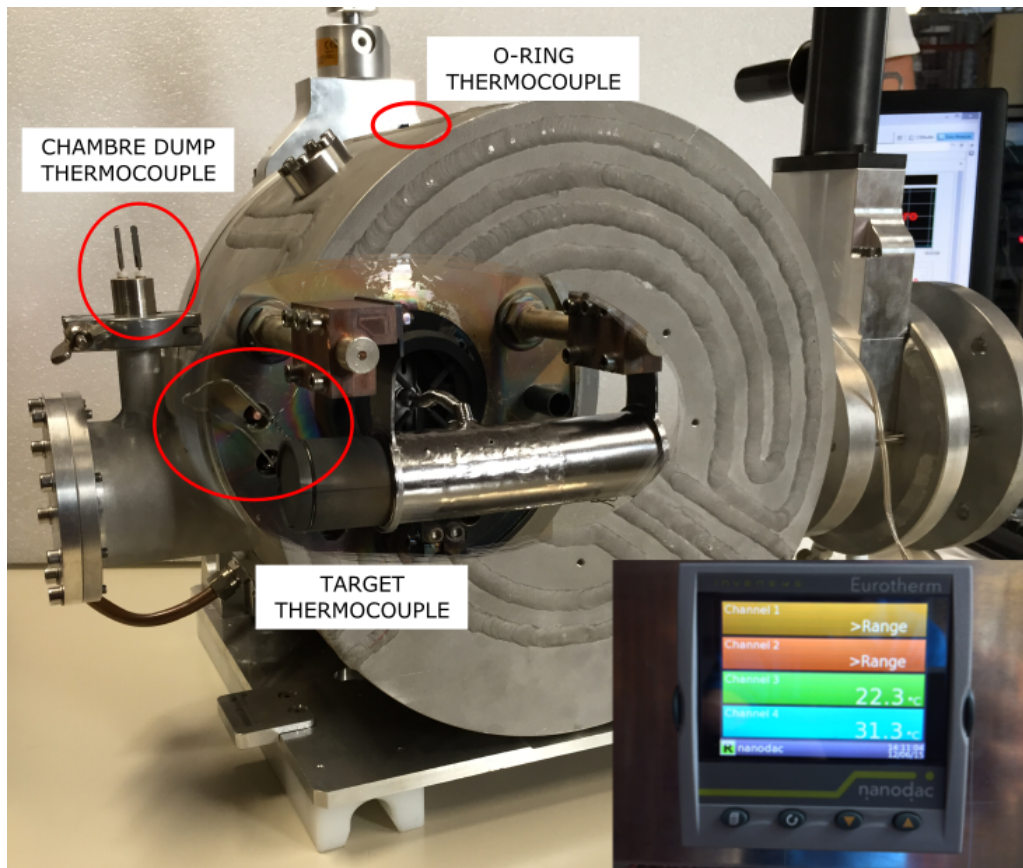


Fig. 3.13: Foto della posizione delle termocoppie all'interno e all'esterno della camera target, in basso a destra la foto dello strumento nanodac in funzione.

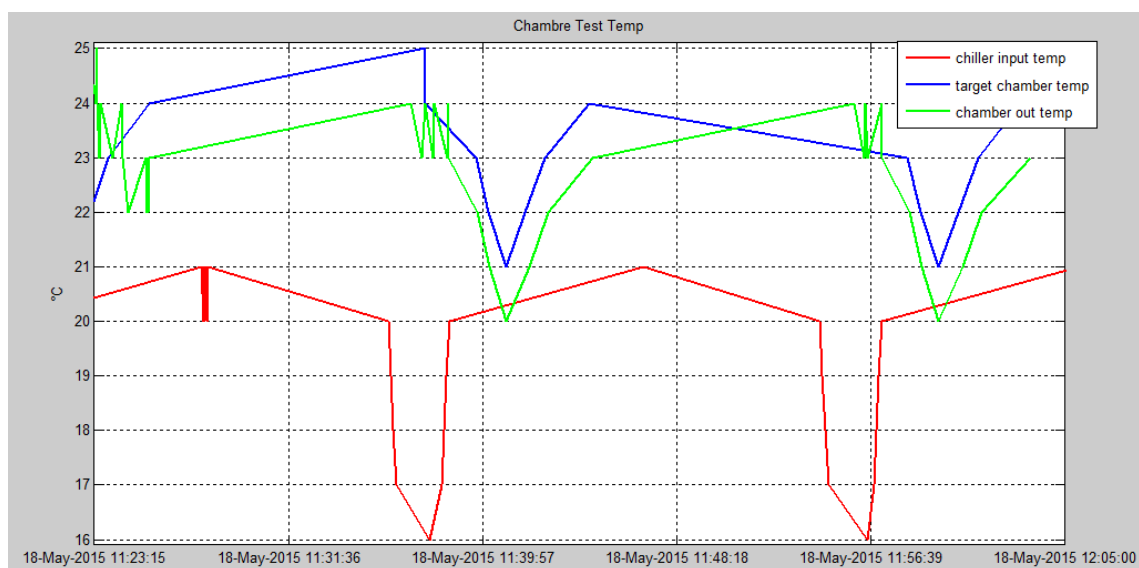


Fig. 3.14: Grafico del test di temperatura sulla camera.

diminuzione periodica del segnale proveniente dalla camera, risultasse compatibile con la frequenza di attivazione dello strumento per refrigerare l’acqua. Difatti, l’abbassamento della temperatura del liquido proveniente dal *chiller*, viene a verificarsi durante l’attivazione dello stesso, con una frequenza di circa 20 minuti nel nostro caso o più in generale al raggiungimento della soglia dei 21°C.

Data la natura del problema, non si sono potute trovare delle soluzioni, accettando di fatto quando accade. Questo test ha permesso, oltre a verificare la strumentazione appena installata, di comprendere un fenomeno non previsto in precedenza.

3.8 Conclusioni

In questo capitolo è stato descritto come configurare un lettore della serie nanodac e di come si è inserito all’interno del laboratorio in modo affidabile e sicuro. Tale strumento verrà anche installato on-line per la verifica della temperatura della camera target.

E’ stata fornita una descrizione su tutta la procedura da eseguire a partire dalla verifica iniziale fino alla messa in servizio del lettore “nanodac”. Sono stati visti i record che sono stati utilizzati per il suo corretto funzionamento attraverso il software EPICS. Si è mostrata l’interfaccia operatore che è stata sviluppata tramite il software CSS. All’interno dei capitoli si sono prese in considerazione delle possibilità di malfunzionamento dell’apparecchiatura e la procedura da intraprendere nel caso si verificassero tali problemi.

Attualmente il device è in uso e perfettamente affidabile nel laboratorio off-line del front-end.

Nuova acquisizione della diagnostica di fascio

Due strumenti di fondamentale importanza per determinare l'intensità e la direzione del fascio di particelle prodotte nel progetto SPES sono la *faraday cup* e il *beam profiler*. La *faraday cup* è uno strumento di misura in grado di acquisire l'intensità di corrente del fascio che impatta su di essa. Per la rilevazione del profilo del fascio viene utilizzato lo strumento di diagnostica chiamato *beam profiler* il quale utilizza lo stesso principio di funzionamento della *farady cup* ma non blocca completamente il fascio.

In ordine con la volontà di creare uno standard all'interno dei laboratori, le schede elettroniche per l'acquisizione dei segnali provenienti dai due sensori sono state modificate. Per raggiungere tale scopo si sono utilizzati il software "*OrCAD Capture*" per la progettazione dello schematico, mentre il software "*PCB editor*" è stato utilizzato per la realizzazione del circuito stampato. Per la gestione in rete dei dati si è utilizzato il database di EPICS assieme al driver per la scheda Adlink DAQe-2214.

Nel capitolo 2.6.2 è stato presentato il progetto preliminare per la realizzazione della nuova diagnostic box al cui interno andranno inserite le schede e la loro posizione all'interno del laboratorio off-line del front-end.

4.1 Introduzione al *beam profiler* ed alla *faraday cup*

Le unità per la diagnostica dei fasci sono uno degli strumenti più importanti ed ampiamente utilizzati dalle *facility* con necessità di controllare gli acceleratori. Essi permettono agli operatori di misurare i parametri del fascio per essere utilizzati come feedback, grazie ai quali si può determinare la corrente, la posizione e la direzione del fascio. Ai LNL, l'unità standard per la diagnostica del fascio è composta da una *faraday cup*, utilizzata per la misura della corrente, ed un *beam profiler* per misurare la distribuzione spaziale delle particelle del fascio [22].

4.1.1 Descrizione degli strumenti di diagnostica

La Faraday cup

La Faraday Cup è un dispositivo che intercetta un fascio di particelle cariche e ne misura l'intensità di corrente. Il nome è in onore di Michael Faraday (1791-1867), chimico e fisico britannico che contribuì ai campi dell'elettromagnetismo e dell'elettrochimica.

Nella sua forma più semplice la Faraday Cup consiste in una camera metallica conduttrice elettricamente isolata, che intercetta trasversalmente le particelle del fascio. Un cavo elettrico ad essa collegato conduce la corrente che si stabilisce nella coppa verso l'esterno, dove il segnale rilevato viene opportunamente elaborato da strumenti di misura (figura 4.1).

La rilevazione può avvenire in modo semplice con l'impiego di un amperometro posto tra il cavo conduttore e la terra, oppure mediante un voltmetro od un oscilloscopio che visualizza l'andamento della differenza di potenziale misurata ai capi di un resistore calibrato posto tra il cavo conduttore e la terra.

Descrizione della figura 4.1:

1. Corpo conduttore della faraday cup;
2. Camera della faraday cup (la superficie interna può essere rivestita);

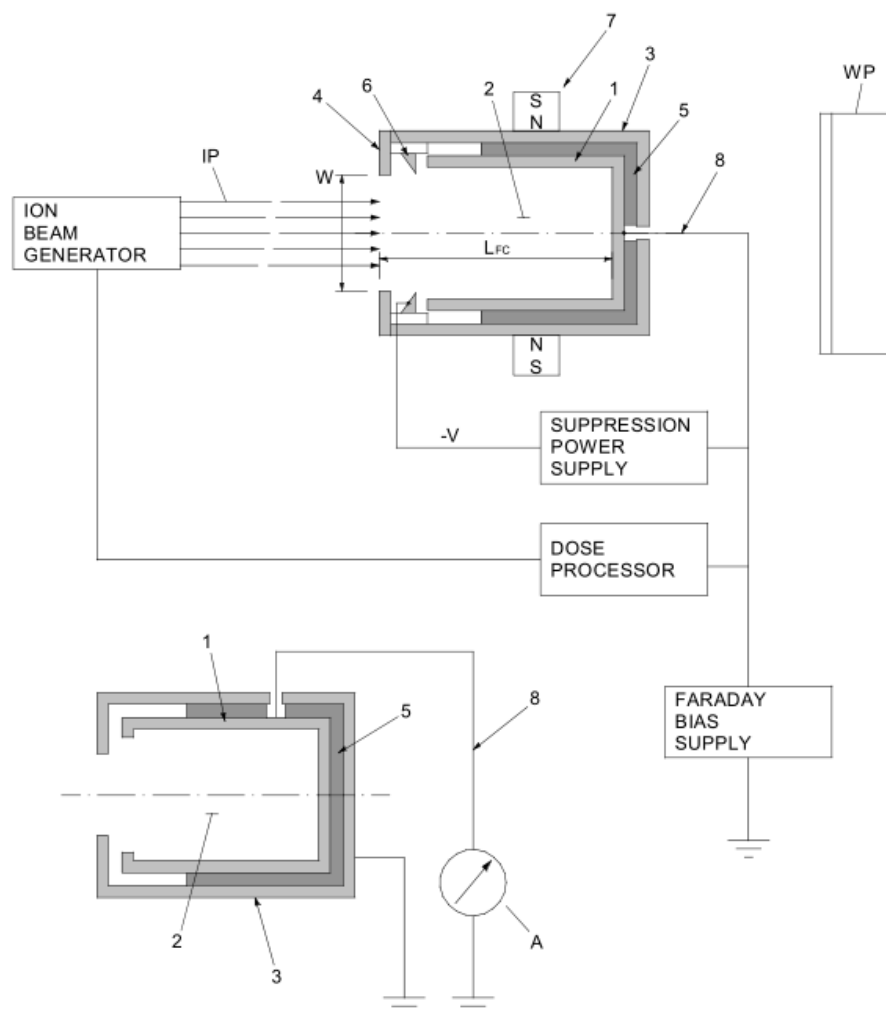


Fig. 4.1: Schematizzazione della faraday cup

3. Astuccio metallico che avvolge il corpo della faraday cup (può essere posto a potenziale negativo e quindi sopprimere gli elettroni secondari quando non è presente l'elettrodo di soppressione);
4. Diaframma o piatto frontale che definisce la sezione di ingresso alla camera;
5. Mezzi isolanti (a bicchiere o ad anello);
6. Elettrodo soppressore ad anello; produce un campo elettrico che respinge all'interno della camera gli elettroni secondari che tenderebbero a sfuggire attraverso l'apertura di ingresso;
7. Assemblamento di magneti che producono il campo magnetico all'interno della camera per inibire la fuga degli elettroni in quanto ne costringono la traiettoria. Possono non essere presenti, in quanto rafforzano l'effetto soppressore già realizzato dagli elettrodi soppressori;
8. Cavo conduttore;

W : Ampiezza dell'apertura di ingresso della camera;

L_{FC} : Lunghezza della Faraday Cup;

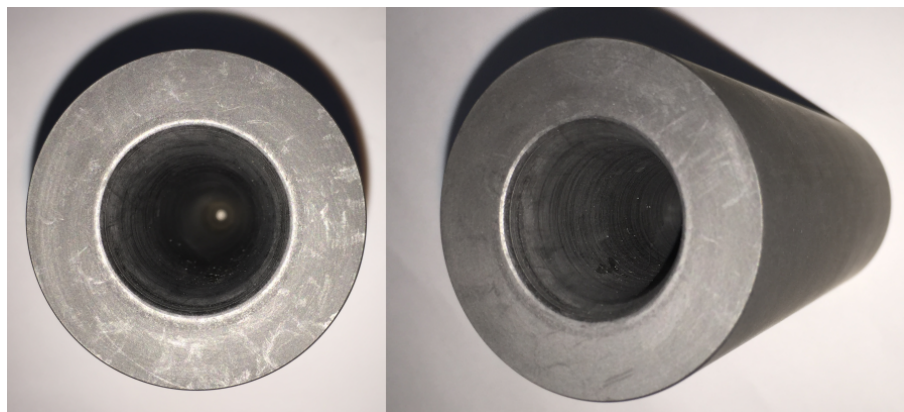


Fig. 4.2: Foto della faraday cup

WP : Workpiece (a seconda delle applicazioni l'utilizzazione può essere: wafer semiconduttore, componenti da saldare con fascio elettronico ecc.);

IP : Fascio di ioni primari;

ES : Elettroni secondari emessi;

A : Amperometro o Elettrometro, è un apparato rivelatore dell'intensità di corrente elettrica.

La tazza di materiale conduttore è la parte sensibile del dispositivo, ed ha come funzione quella di intercettare e raccogliere gli ioni del fascio che si intende analizzare. Per fascio si intende un flusso ordinato di particelle cariche o di ioni. Nel caso specifico gli atomi vengono ionizzati ed accelerati in una certa direzione all'interno di una conduttura ad alto vuoto ed hanno carica elettrica negativa se sono dotati di un elettrone in più, oppure positiva se hanno una carenza di un elettrone. Il fascio entra attraverso l'apertura della tazza e quando gli ioni vengono a contatto con la superficie di essa, prelevano l'elettrone di cui necessitano per bilanciare la propria carica. Nella Faraday-Cup, come pure per il collimatore, gli ioni accelerati sono atomi di idrogeno ^1H privati del loro unico elettrone, dunque tali elementi hanno carica positiva e il loro nucleo è formato da soli protoni, per questa ragione il fascio è detto protonico.

La faraday cup rappresenta uno strumento di diagnostica distruttivo in quanto al momento della misura, l'intero fascio è fermato. Si prevede quindi che il dispositivo sia movimentato per essere inserito o disinserito dalla linea d'asse del fascio [23]. In figura 4.2 si può notare la foto della faraday cup di alta potenza che verrà utilizzata nei laboratori del front-end.

Il Beam profiler

In generale il beam profiler è un dispositivo di diagnostica utilizzato per risalire alle caratteristiche di un fascio sorgente mediante l'intercettazione dello stesso ad opera di un'opportuna sonda.

A differenza della faraday cup tale strumento non si presta a fermare completamente il fascio. Dunque non è distruttivo nei suoi confronti, ma si limita ad intercettarlo parzialmente in un certo intervallo di tempo. Tale periodo è sufficiente per poter eseguire la scansione del fascio e risalire alle sue caratteristiche in termini di forma e posizione.

La sonda del Beam-Profiler è presente in diverse tipologie di soluzioni con forme e materiali diversi. Inoltre la scelta di una certa architettura dipende dalle caratteristiche del fascio intercettato e dalle applicazioni specifiche in cui deve operare.

Le soluzioni comunemente adottate per le sonde del beam profiler sono nelle configurazioni a griglia o a filo rotante. In entrambi i casi viene captato un segnale di corrente elettrica proporzionale all'intensità del fascio intercettato. In particolare, per energie del fascio inferiori ai 2 MeV/u (*megaelectron volt/atomic mass unit*), le particelle sono fermate completamente e il segnale elettrico acquisito dalle sonde risulta proporzionale alle cariche degli ioni fermati. Tuttavia nella maggior parte dei casi non è prevista la soppressione degli elettroni secondari, perciò l'effetto di questi può perturbare il segnale acquisito.

Nella configurazione a griglia, l'intensità del fascio viene campionata istante per istante dai diversi fili che la costituiscono, mano a mano che questi intercettano il fascio. Pertanto durante la movimentazione della sonda i segnali acquisiti sono sensibili alle variazioni longitudinali e trasversali dell'intensità del fascio misurata nel tempo. Nel profilo a griglia, la massima corrente acquisita è limitata dalla potenza del fascio che si vuole intercettare, onde evitare di compromettere i filamenti, mentre la minima corrente richiesta dev'essere stimata in riferimento alla geometria del sistema, tenendo conto del diametro del fascio e del disturbo prodotto dall'elettronica utilizzata per l'elaborazione del segnale.

Il tipo di beam profiler utilizzato è nella configurazione a griglia. Questo elemento genera un segnale analogico di corrente in grado di rappresentare le proprietà fisiche del fascio. Poiché l'intensità di corrente del fascio, generato dal RIB, sarà molto più basso rispetto al fascio attualmente prodotto ai laboratori, è stato realizzato un beam profiler su misura. Questo nuovo modello è suddiviso in due aree, la prima composta da una griglia di fili (wire grid), che rappresenta lo standard dei rilevatori ai LNL. Mentre la seconda area di rilevamento è formata da un reticolato su circuito stampato (pad matrix), che viene utilizzato per stabilire la posizione del fascio grazie alla capacità del Microchannel Plate (MCP) di raccogliere gli elettroni sull'anodo [24].

Lo spazio tra i diversi fili ed il reticolato dei due rilevatori è pari a $250\ \mu\text{m}$. Entrambi i sistemi sono collocati su un singolo circuito stampato (PCB - Printed Circuit Board), questo ha permesso di utilizzare una singola movimentazione. La figura 4.3 rappresenta una foto del beam profiler realizzato.

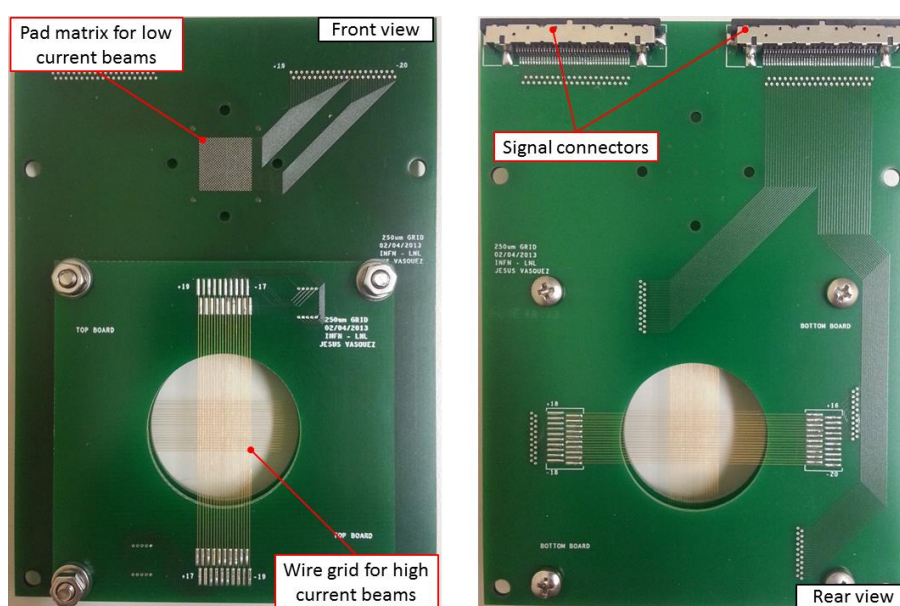


Fig. 4.3: Rilevatore beam profiler (a sinistra la vista frontale, a destra la vista anteriore).

4.1.2 Acquisizione della diagnostica del fascio

Ognuno di questi strumenti di acquisizione, utilizzano un sistema di amplificazione in grado di condizionare il segnale prima della sua acquisizione. Per la *faraday cup* è presente un amplificatore logaritmico che è in grado di convertire la corrente letta in tensione. L'IOC è stato fornito di un ingresso analogico per leggere tale tipo di segnale. Nel database di EPICS, il segnale letto è riconvertito alla corrispondente corrente del fascio. Per il *beam profiler* sono invece presenti 40 amplificatori logaritmici identici a quelli utilizzati per la *faraday cup*. Questi 40 segnali sono scansionati su un unico canale analogico. Un ingresso analogico dell'IOC è stato configurato in modo da leggere il segnale in uscita dagli amplificatori, mentre si è utilizzato il segnale di clock del PC industriale per fornire un controllo ai multiplexer analogici. In questo caso è stata realizzata una funzione che effettua una scansione sull'asynDriver in grado di generare il clock e simultaneamente leggere gli ingressi analogici. Alla fine della sequenza di scansione, i dati raccolti sono posizionati su un vettore di 40 elementi, questi sono registrati in un record di tipo *waveform* di EPICS.

L'implementazione in EPICS del sistema di acquisizione, consiste in un record di ingresso analogico (AI - *analog input*), che permette di leggere i segnali in uscita dagli amplificatori della *faraday cup* attraverso un canale a cui è connesso un ADC, in grado di interfacciarsi con i componenti asynDriver. Per il *beam profiler* sono stati invece usati due record di tipo *waveform* che monitorano i segnali degli amplificatori (lungo i piani X e Y), usando per ciascun piano un canale a cui è connesso un ADC in grado di interfacciarsi con gli asynDriver (che permettono di selezionare i canali acquisiti). La figura 4.4 mostra il diagramma a blocchi di quanto appena affermato.

Per questo sistema di acquisizione, è stata realizzata una GUI (*Graphical User Interface*)¹ creata usando il software CSS. Questa è stata integrata ai LNL nella schermata principale di diagnostica, in modo che l'operatore riesca ad avere un veloce riscontro dei parametri riguardanti la corrente ed il profilo del fascio. La figura 4.5 mostra uno screenshot dell'interfaccia operatore.

4.2 Motivazione delle modifiche apportate alla diagnostic box

E' stato essenziale modificare le schede per il controllo dei segnali acquisiti da *faraday cup* e *beam profiler*, a causa di una standardizzazione della diagnostic box. Un'immagine della vecchia diagnostic box si può vedere in figura 4.6 dove si può notare la disposizione dei componenti al suo interno.

Le dimensioni della nuova diagnostic box saranno ridotte rispetto a quella precedente a causa delle seguenti modifiche:

- Eliminazione della Raspberry Pi;
- Eliminazione della interconnection board;
- Eliminazione della scheda per il controllo dei motori elettrici. Dato la necessità di inserire un'altra tipologia di motori, verrà realizzata una scheda per il controllo dei motori pneumatici descritta nel capitolo 5;
- Sostituzione della scheda di acquisizione del *beam profiler* con la nuova versione;
- Sostituzione della scheda di acquisizione della *faraday cup* con la nuova versione.

¹L'interfaccia grafica utente, nota anche come GUI, è un tipo di interfaccia utente che consente all'utente di interagire con la macchina controllando oggetti grafici convenzionali.

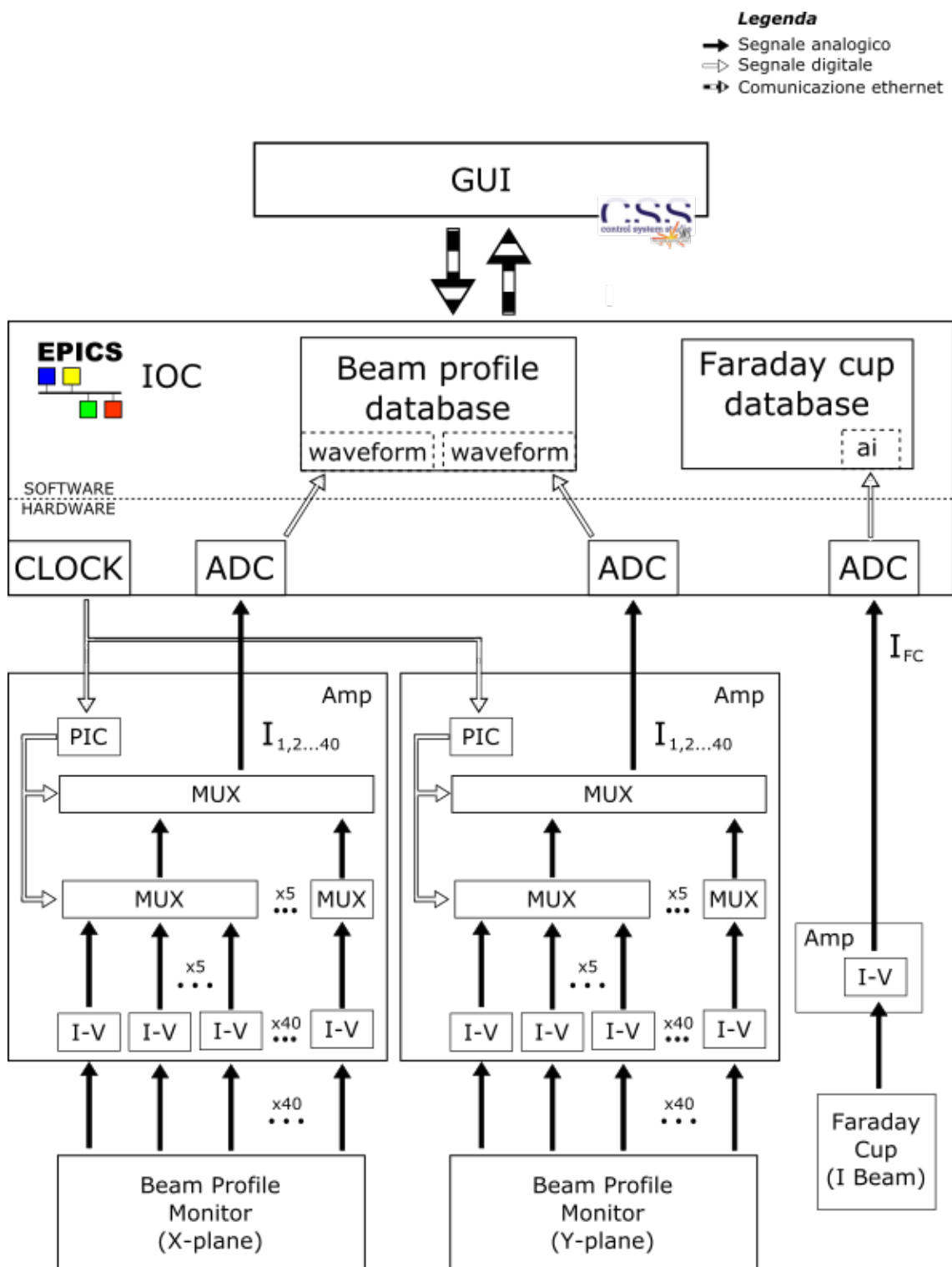


Fig. 4.4: Diagramma di flusso della box di diagnostica



Fig. 4.5: Schermata dell'interfaccia operatore per il controllo e la visualizzazione del beam profiler (a sinistra) e della faraday cup (a destra).

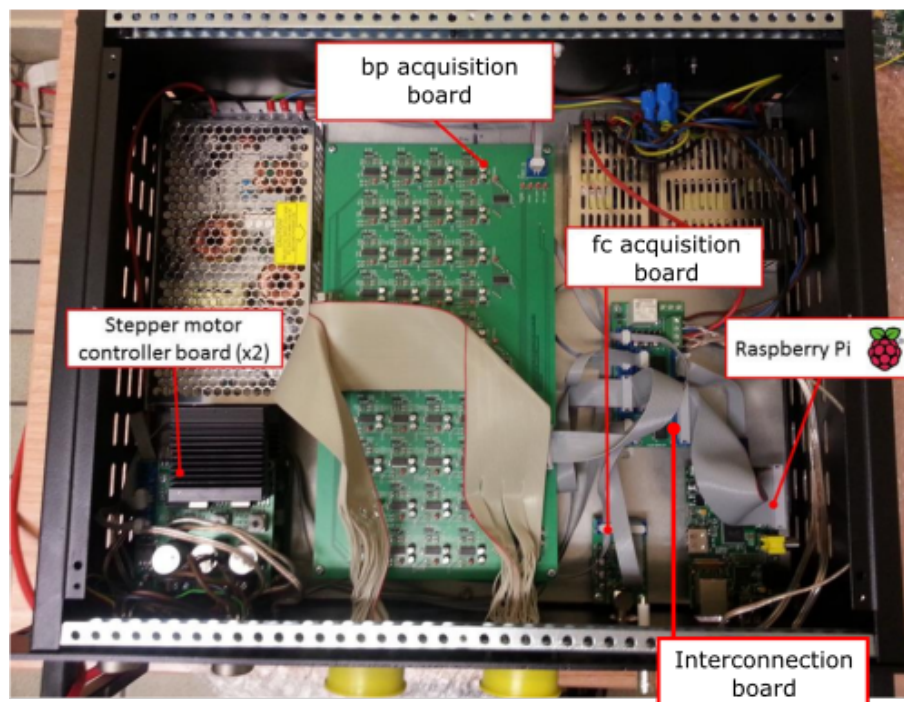


Fig. 4.6: Disposizione componenti all'interno della vecchia diagnostic box

Un importante cambiamento è stata quella della scheda del beam profiler, dove si è tolto l'ADC (*Analog to Digital Converter*²) inserendo al suo posto un PIC (*Programmable Interface Controller*³). Questo ha permesso di eliminare la Raspberry Pi, utilizzata per elaborare il segnale ed inviarlo in rete attraverso gli IOC, inserendo al suo posto un PC industriale in grado di controllare più ingressi e uscite contemporaneamente. Con questo metodo si è potuto ridurre il numero di Raspberry Pi presenti nel laboratorio utilizzando al loro posto un computer più affidabile.

La scheda elettronica della faraday cup è stata modificata togliendo l'ADC ed inserendo al suo posto un connettore BNC⁴ direttamente collegato all'uscita dell'amplificatore logaritmico. La motivazione di questa operazione è identica a quella descritta per il beam profiler. Essendo già presente nel PC industriale un ADC, questo ha permesso di acquisire direttamente il segnale analogico.

4.3 Presentazione della componentistica elettronica

Verranno ora presentati i principali componenti che sono presenti nella scheda del beam profiler. Mentre la scheda elettronica della faraday cup presenta solamente l'amplificatore logaritmico che verrà descritto in seguito. Per la comunicazione col PC industriale è stato inserito un connettore BNC all'uscita del componente, mentre uno stesso connettore è posizionato all'ingresso per ricevere il segnale. Lo schematico completo delle due schede viene presentato in appendice D.

4.3.1 Amplificatore logaritmico LOG112

L'amplificatore logaritmico LOG112 è un circuito integrato versatile in grado di calcolare il rapporto logaritmico tra due segnali di corrente, uno di riferimento e l'altro di ingresso. Il segnale di uscita è tagliato a 0.5 V per decade della corrente in ingresso. Inoltre all'interno dell'integrato è presente un amplificatore operazionale che può essere utilizzato per la scalatura del segnale in uscita. In figura 4.7 viene rappresentato lo schema a blocchi, dove:

- I_1 : Corrente di ingresso;
- I_2 : Corrente di riferimento;
- V_{O3} : Tensione di uscita.

Il segnale che si riceve in uscita dall'integrato viene calcolato secondo l'equazione 4.3.1.

$$V_{O3} = K \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \text{LOG} \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (4.3.1)$$

dove $K = 1 + R_2/R_1$ rappresenta il guadagno dell'amplificatore operazionale.

Nella scheda realizzata si vuole adattare il segnale ad una soglia di ± 10 V (questo limite è dato dall'ingresso analogico del PC industriale), pertanto si è impostato un valore di $K = 4.1$. Mentre la corrente di riferimento $I_2 = 124$ nA. Questo perchè l'integrato in condizioni di utilizzo deve riuscire a leggere con buona precisione da 100 pA fino a 250 μ A. Questo range di corrente produce un segnale di uscita, in accordo con l'equazione 4.3.1, che spazia approssimativamente dai -6.3 V ai 9.1 V.

Lo schematico sviluppato per l'integrato viene rappresentato in figura 4.8.

²Il convertitore analogico-digitale è un circuito elettronico in grado di convertire un segnale analogico con andamento continuo (ad es. una tensione) in una serie di valori discreti.

³PIC è una famiglia di circuiti integrati a semiconduttore con funzioni di microcontrollore.

⁴I connettori BNC sono una famiglia di connettori unipolari a baionetta usati per l'intestazione di cavi coassiali.

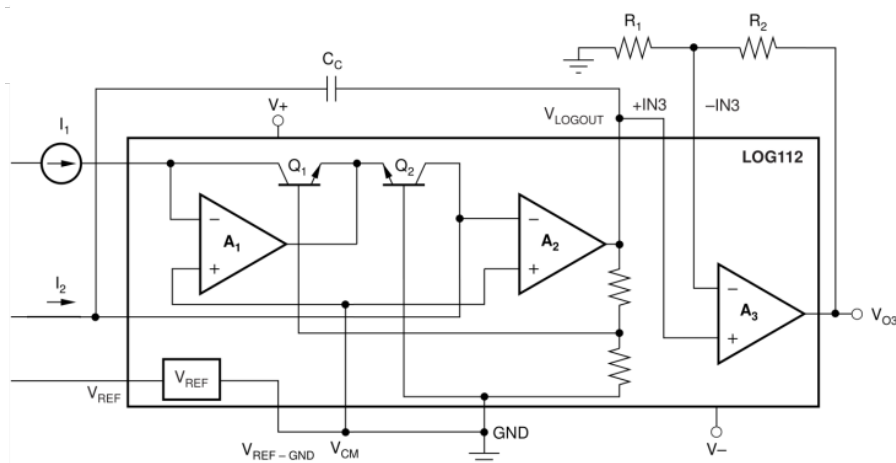


Fig. 4.7: Schema a blocchi LOG112

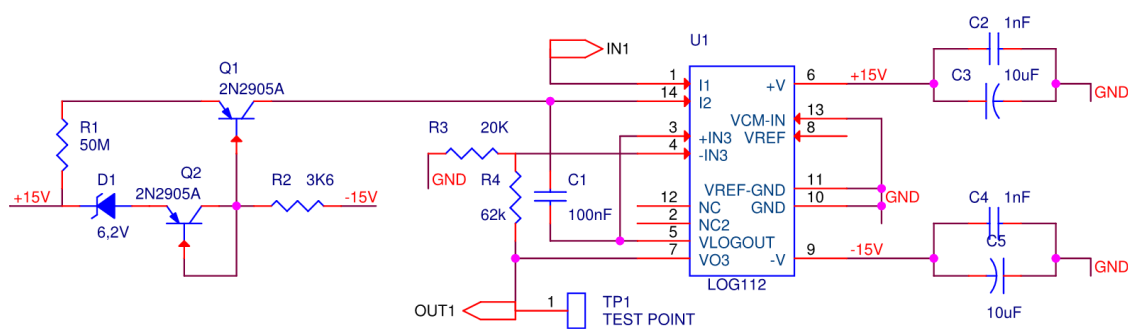


Fig. 4.8: Schematico LOG112

4.3.2 Multiplexer analogico DG408

Il multiplexer DG408 include un array di 8 switch analogici. Questi permettono di selezionare un ingresso mettendolo in comunicazione con l'uscita attraverso una logica di controllo. Questo integrato è stato utilizzato nella scheda del beam profiler come rappresentato in figura 4.9. Si vogliono acquisire 40 segnali, pertanto si sono realizzati 2 stadi, dove nel primo sono stati utilizzati 5 integrati, nel secondo invece se ne utilizza uno per inglobare i 5 segnali e portarli in uscita lungo 1 canale. Questi integrati sono comandati dal microcontrollore PIC18F27J13.

4.3.3 Microcontrollore PIC18F27J13

Un microcontrollore è un dispositivo elettronico che integra in un unico chip: un processore, una memoria permanente, una memoria volatile e dei canali (PIN) di I/O. Questa struttura li rende particolarmente adatti per lo sviluppo di applicazioni specifiche di controllo digitale dove il basso costo, le ridotte dimensioni e i bassi consumi, sono spesso condizioni importantissime.

Il PIC18F27J13, già utilizzato in altri progetti ai laboratori di Legnaro, è stato scelto per la sua già testata e confermata affidabilità, il costo contenuto ed un adeguato numero di pin dedicati ad ingressi e periferiche.

L'integrato sarà programmato off-line e successivamente inserito nella scheda. Esso verrà comandato tramite il clock del PC industriale. Attraverso questo segnale verranno gestiti i comandi da inviare ai diversi multiplexer per selezionare il canale da acquisire.

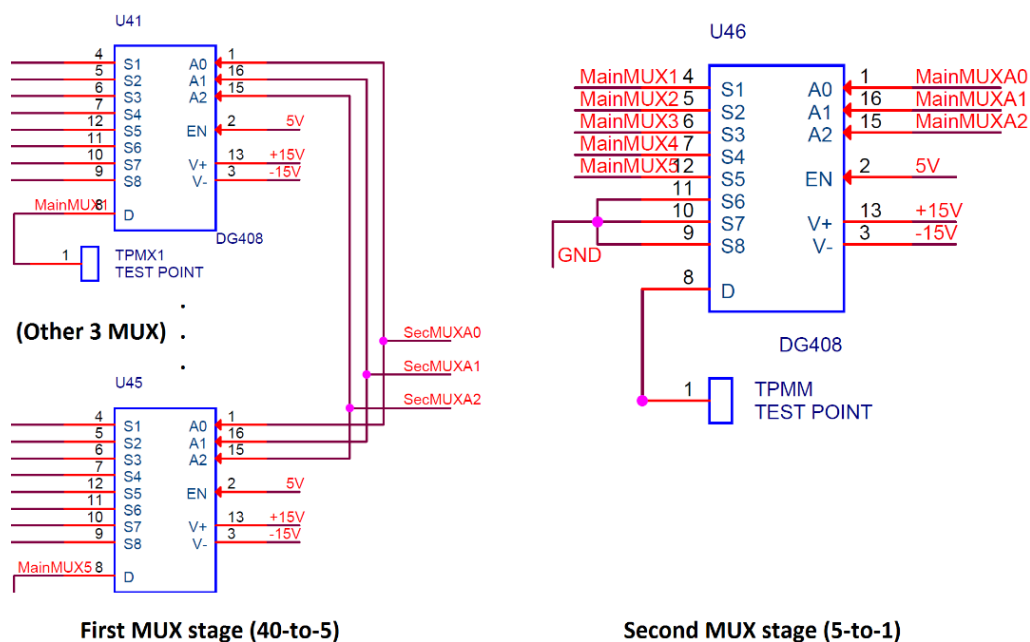


Fig. 4.9: Disposizione dei multiplexer DG408 nello schematico

4.3.4 Buffer 74HCT365D

Per comandare i multiplexer si sono processate le uscite del microcontrollore attraverso il buffer 74HCT365D, che ha permesso di portare le uscite del PIC da 3.3 V a 5 V. Si sono utilizzate le uscite a coppie di 3 per riuscire a comandare i multiplexer analogici DG408 del primo e del secondo stadio come rappresentato in figura 4.10

4.3.5 Alimentatore MCP1827S330

L'integrato MCP1827S330, permette di modellare la tensione in ingresso di 5 V fino a 3.3 V, questo per riuscire ad alimentare correttamente il microcontrollore PIC18F27J13.

4.4 Progettazione del circuito stampato

Per la progettazione del circuito si è utilizzato il software “PCB Editor”. Attraverso questo programma della casa Cadence[®], avendo realizzato lo schematico con “OrCAD Capture”, è bastato andare all'interno del menù “tool” per far comparire l'elenco a tendina dove si è selezionata l'opzione “create netlist”. Dopo aver controllato automaticamente le diverse regole preimpostate, il software apre una pagina in cui si possono disegnare i bordi, le piste e piazzare i componenti del circuito stampato.

Per posizionare i diversi componenti si sono rispettate delle regole generali fra le quali:

- I connettori sono stati posizionati lungo i bordi della scheda per semplificare le operazioni di aggancio/sgancio ed inserendoli il più vicino possibile al rispettivo connettore di uscita della box di diagnostica;
- Inserire i test point⁵ il più vicino possibile all'ingresso del segnale che devono verificare;

⁵Un test point è un punto di un circuito elettronico che si vuole usare per monitorare lo stato di un circuito, oppure per inserire un segnale di test.

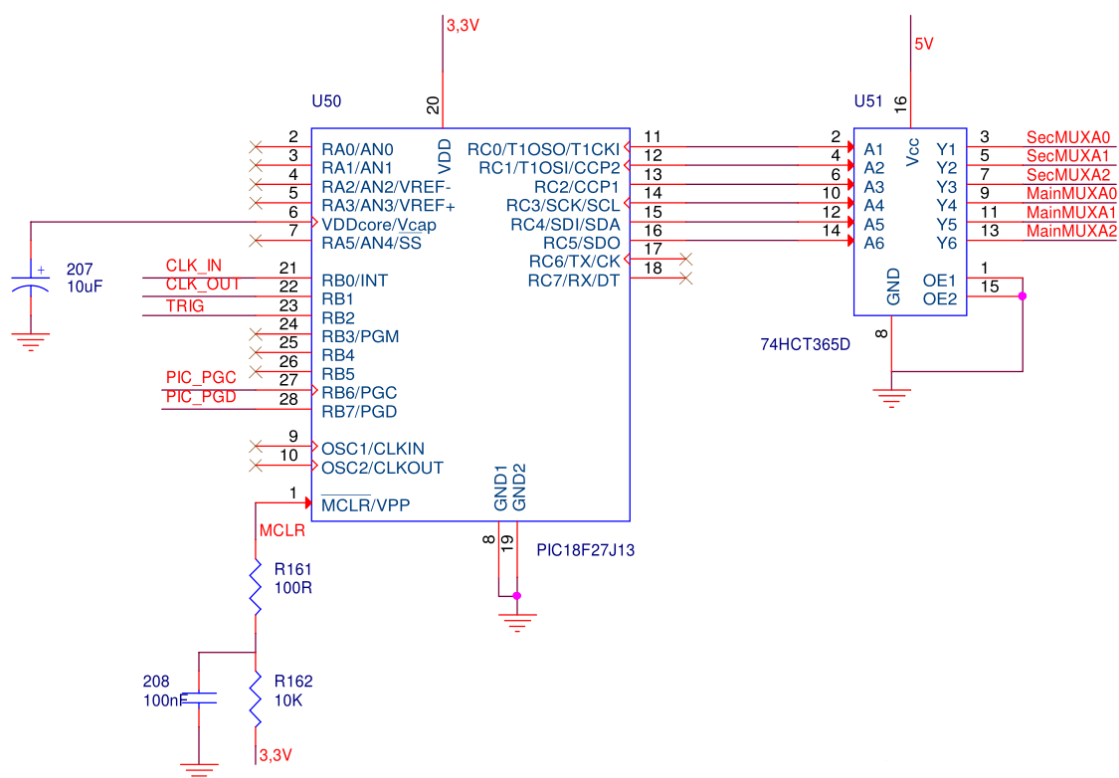


Fig. 4.10: Schematico del microcontrollore PIC18F27J13 e del buffer 74HCT365D

- Si è cercato di rispettare una geometria per quel che riguarda il posizionamento degli amplificatori logaritmici, ovvero di posizionare vicino all'integrato i componenti di cui ha bisogno e di rispettarlo per l'inserimento dei successivi amplificatori;
- Per quanto riguarda il PIC si è cercato di posizionarlo vicino al suo connettore ed inserendo le diverse resistenze e condensatori di cui necessita per il funzionamento in prossimità del componente;
- Posizionare i diversi integrati su un'unica faccia, mentre per le piste si sono utilizzate due facce;
- Ottenere un piano di massa unico eliminando eventuali zone isolate.

4.4.1 Dimensionamento delle piste

Generalmente i fattori che influenzano la scelta della larghezza delle piste sono:

- Densità massima dei componenti sul circuito stampato compatibilmente con la necessità di garantire un'isolamento minimo tra le piste, onde evitare scariche di tipo elettrostatico, in presenza di gradienti di tensione elevati, ma anche per facilitare il processo di produzione o di collaudo e diagnosi dei guasti .
- Necessità di utilizzare al massimo lo spazio a disposizione diminuendo la larghezza delle piste.

Può accadere che certe piste (alimentazione e massa ad esempio) richiedano una verifica dei parametri elettrici. La resistenza dei conduttori è di fondamentale importanza per la determinazione della caduta di tensione che presentano al passaggio di una certa corrente, sia

per la determinazione della dissipazione di potenza e della conseguente sovratemperatura delle piste.

La resistenza è data da:

$$R = \frac{r \cdot L}{s \cdot W} [\Omega] \quad (4.4.1)$$

dove R è la resistenza in Ohm, L è la lunghezza della pista in mm, W la larghezza della pista in mm, s è lo spessore in metri, r è la resistività specifica della pista in rame.

La resistività r si può assumere pari a quella del rame trascurando eventuali contributi di rivestimenti, in accordo con la formula:

$$r = 0.0176 \cdot 10^{-6} [Ohm \cdot m] \text{ (a } 20^\circ C) \quad (4.4.2)$$

La potenza dissipata provoca, per effetto Joule, una sovratemperatura delle piste rispetto all'ambiente circostante, con conseguente aumento della resistenza delle piste per effetto del coefficiente di temperatura del rame. L'aumento di resistività si può verificare tramite la formula:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0)) [\Omega] \quad (4.4.3)$$

Dove R è la resistenza a temperatura T , R_0 a temperatura T_0 , α è il coefficiente termico dipendente dal materiale che nel caso del rame è $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$. Tale sovratemperatura è legata alla corrente I , che attraversa la pista, e dalla sua larghezza W . Per prima cosa va calcolata l'area della sezione di rame tramite la formula:

$$Area = \left(\frac{I}{k \cdot (T - T_0)^b} \right)^{\frac{1}{c}} [mils^2] \quad (4.4.4)$$

A questo punto si procede con il calcolo della larghezza della pista:

$$W = \frac{Area}{thick \cdot 1.378} [mils] \quad (4.4.5)$$

Dove I viene espressa in *Ampere*, per motivi di sicurezza è consigliabile incrementare la massima corrente ammissibile del 50-100% nel determinare la larghezza delle piste. La variabile *thick* è espresso in *oz/ft²*. Inoltre si sono prese le costanti $k = 0.048$, $b = 0.44$, $c = 0.725$ i quali sono dei parametri presi nel rispetto della norma IPC-2221.

Nel nostro caso la criticità risiede nell'amplificatore logaritmico (LOG112), il quale a pieno carico sopporta correnti pari a 10 mA con tensioni fino a 15 V. Si considera inoltre una pista di lunghezza L massima pari a 150 mm. Lo spessore minimo fornito dalla ditta è di $35 \mu m = 1 \text{ oz/ft}^2$. La corrente massima che deve supportare la pista sarà pari a:

$$I_{max} = 0.01 \cdot 40 = 0.4 [A]$$

Dove 0.01 rappresenta la corrente assorbita da un amplificatore, mentre 40 è il numero degli integrati. Preso un coefficiente di sicurezza del 100% avrò una corrente pari a 0.8 A, con cui si andrà ad effettuare il calcolo per la larghezza della pista, considerando una sovratemperatura di 20 gradi:

$$Area = \left(\frac{0.8}{0.048 \cdot (40 - 20)^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} = 7.87 [mils^2]$$

$$W = \frac{7.87}{1 \cdot 1.378} = 5.71 [mils]$$

Dato che la larghezza minima che la ditta fornisce come indicazione per la realizzazione di una pista è pari a 6 mils, non si è preso in considerazione il dimensionamento appena

spiegato. Questo ha permesso di rimanere con un buon margine entro i limiti di sicurezza e di scegliere 6 mils come larghezza della pista per il circuito stampato.

Si è poi preso in considerazione la caduta di tensione lungo la pista. La resistenza della pista, esprimendo l'area in centimetri quadri e la lunghezza della pista in centimetri, dovrà essere:

$$R = \frac{0.0176 \cdot 10^{-6} \cdot 15}{5.07 \cdot 10^{-5}} \cdot (1 + \alpha \cdot 20) = 0.56 [\Omega]$$

Che provoca una caduta di tensione di $V = R \cdot I_{max} = 0.45 [V]$, la quale ci permette di stare entro i limiti costruttivi degli integrati.

4.4.2 Creazione dei file gerber

Il formato di file Gerber è lo standard utilizzato difatto per la produzione dei circuiti stampati, per tracciare le connessioni elettriche quali piste, vias, e piazzole. In aggiunta, il file contiene informazioni per la foratura e la fresatura del circuito stampato.

Questi files sono generati da software di sbroglio circuitale, nel nostro caso “PCB Editor”, e vengono inviati ai costruttori di PCB per essere caricati nei software CAM⁶.

La versione che si è inviata all'azienda è l'Extended Gerber, o RS-274X. Questo è stato creato seguendo un percorso guidato che ha generato i seguenti file:

- TOP.art - file gerber per lato componenti;
- BOTTOM.art - file gerber per lato saldatura;
- OUTLINE.art - file gerber per dimensioni e fresature;
- SOLDERMASK_TOP.art - file gerber per solder mask⁷ lato componenti;
- SOLDERMASK_BOTTOM.art - file gerber per solder mask lato saldatura;
- SILKSCREEN_TOP.art - file gerber per serigrafia lato componenti;
- PASTE_TOP.art - file gerber per padstack;
- BoardName_drill-1-2.drl - file di controllo per macchina di foratura;
- Placement.txt - file di posizionamento dei componenti per il pick & place.

4.5 Implementazione delle schede in EPICS

Volendo gestire i segnali analogici proveniente dalle schede elettroniche ad un PC industriale, è stato necessario utilizzare lo strumento asynDriver per sviluppare un driver di interfaccia. Tale software è in grado di comunicare con il device support di EPICS e con i driver a basso livello della scheda Adlink DAQe-2214. In particolare si è utilizzato il driver “drvDAQE2214” realizzato ai LNL. Tramite l'utilizzo di questo software è stato possibile interfacciare il database sviluppato in EPICS con le schede elettroniche progettate.

Per la realizzazione dei database si sono utilizzate le procedura standard della creazione di un IOC, andando a caricare il file “TaDiag.SRCS + = drvDAQE2214.v2.cpp” oltre

⁶Con il termine CAM (*Computer Aided Manufacturing*), si indica una categoria di prodotti software che analizzano un modello geometrico virtuale, bidimensionale o tridimensionale, per generare le istruzioni necessarie a una macchina utensile a controllo numerico computerizzato (CNC) per seguire un “percorso utensile” definito da tali istruzioni

⁷Per “solder mask” si intende uno strato di materiale polimerico, applicato alla piste di rame nei circuiti stampati, per proteggerli dall'ossidazione e per prevenire la formazione di ponti di stagnatura che potrebbero formarsi tra due piazzole adiacenti.

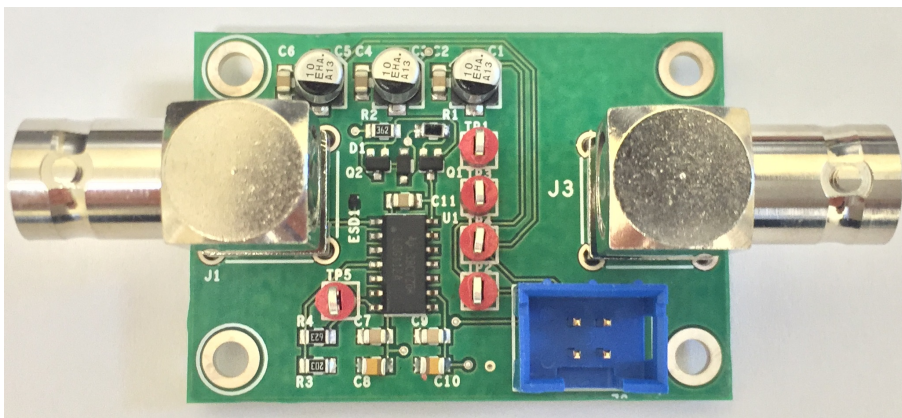


Fig. 4.11: Scheda Faraday Cup realizzata

al solito database dell'applicazione. Dopo la creazione di quest'ultimo si sono andati a configurare gli ingressi utilizzati dal driver in cui il PC industriale acquisisce il segnale, si è pertanto modificato il file "st.cmd" inserendo la seguente riga:

```
DAQE2214Config(portName, boardNum, AI polling time, DI polling time,
Ch0_size, Ch1_size, Ch2_size, Ch3_size, Ch4_size, Ch5_size,
Ch6_size, Ch7_size, Ch8_size, Ch9_size, Ch10_size, Ch11_size,
Ch12_size, Ch13_size, Ch14_size, Ch15_size);
```

comandi per drvDAQE2214		
Parametri	DataType	Descrizione
portName	string	Nome della porta che si è scelto
boardNum	int	Numero della scheda Adlink DAQe-2214
AI polling time	int	Polling time delle periferiche per ingressi analogici
DI polling time	int	Polling time delle periferiche per ingressi digitali
Ch0_size	int	Numero di campioni acquisiti dal canali analogico 0. Se viene impostato il valore 0 il canale è disabilitato, se viene inserito un valore > 1 è necessario assegnare il canale ad un record di tipo waveform.

Tab. 4.1: Descrizione dei parametri del driver drvDAQE2214

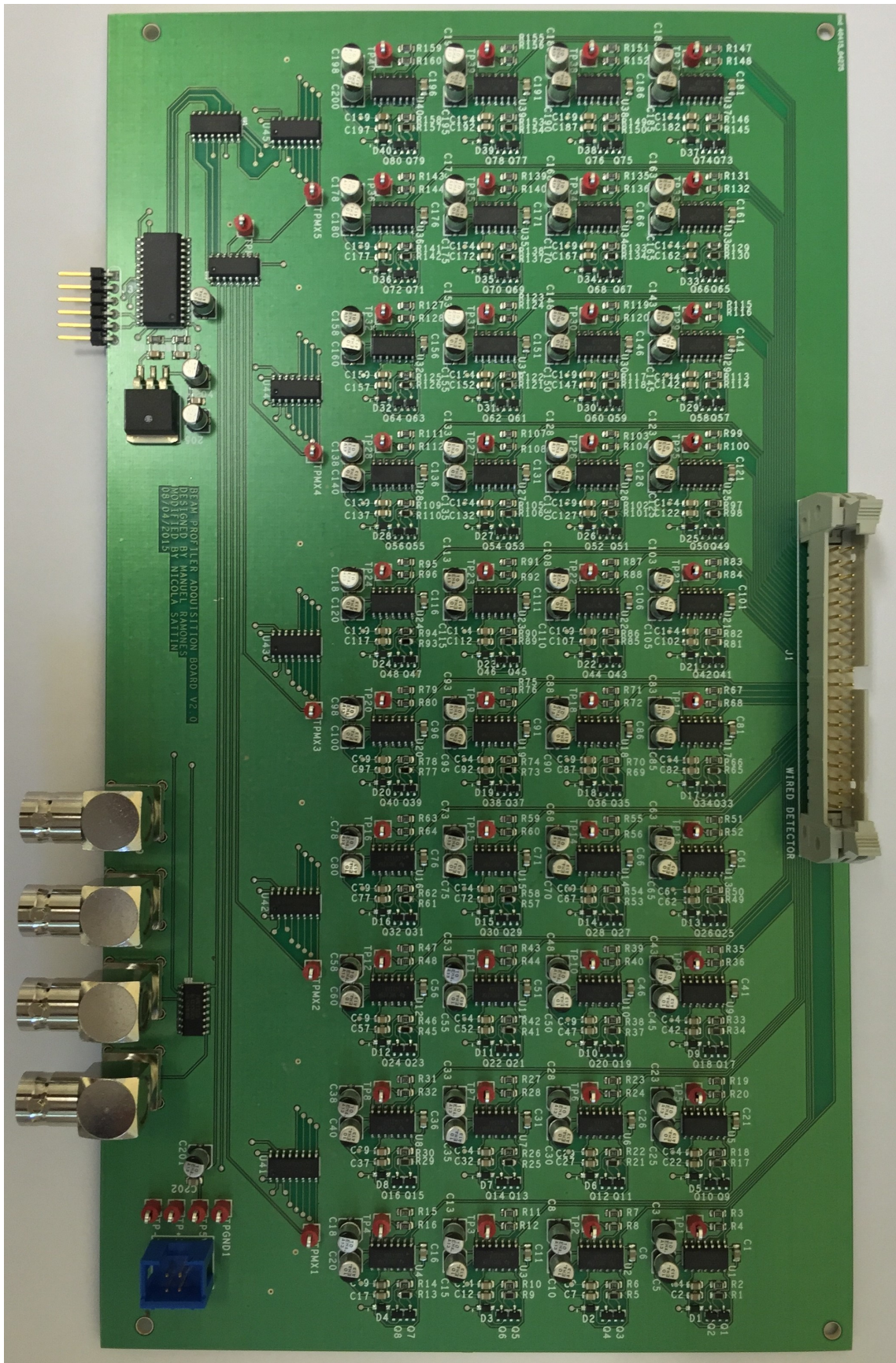


Fig. 4.12: Scheda Beam Profiler realizzata

Conclusa l'impostazione del driver si sono andati a realizzare i database di beam profiler e faraday cup.

4.5.1 Faraday Cup Database

Per la faraday cup si sono invece creati tre record. Il primo permette di leggere la corrente in nanoAmpere con una precisione di due cifre decimali. Il secondo invece permette di abilitare o disabilitare il calcolo effettuato dal terzo record. Quest'ultimo è in grado di calcolare l'integrale della corrente generata dal flusso. Pertanto permette di sapere quanti atomi sono stati ionizzati nel lasso di tempo in cui lo strumento di diagnostica è rimasto inserito. Ciò ha permesso, durante le fasi di test, di verificare l'efficienza della sorgente. In figura 4.13 viene rappresentato il record utilizzato.

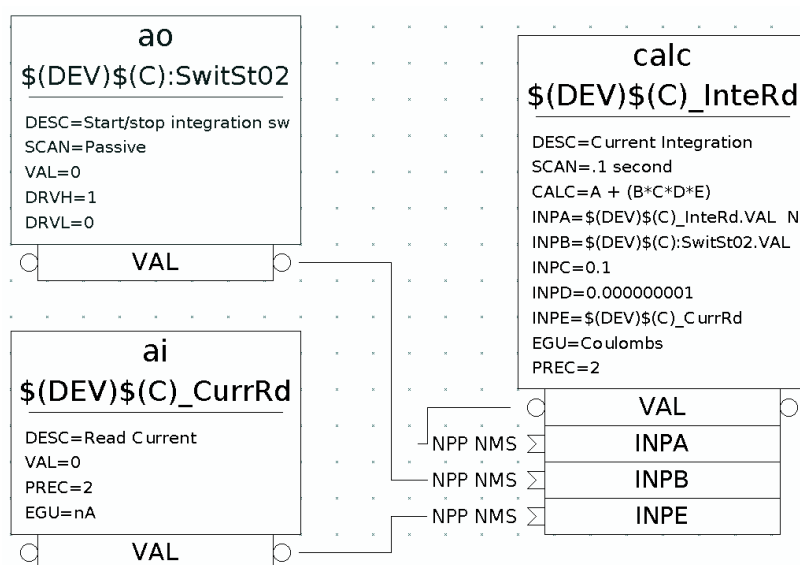


Fig. 4.13: Record realizzati per la faraday cup

4.5.2 Beam Profiler Database

Per il beam profiler è stato creato un record di tipo waveform. Questo è composto da un array di 40 elementi di tipo double. Il valore letto è riferito ai nanoAmpere ed ha una precisione di due cifre decimali. In figura 4.14 viene rappresentato il record utilizzato.

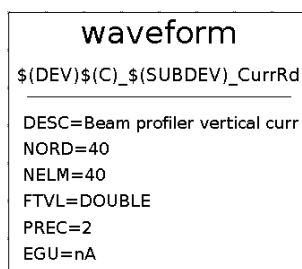


Fig. 4.14: Record realizzato per il beam profiler

4.6 Conclusioni

In questo capitolo è stato descritto come si sono modificati due circuiti stampati pre-esistenti, rendendo così possibile la creazione di uno standard per le box di diagnostica, consentendone l'utilizzo da parte dei PC industriali.

Sono state fornite le informazioni principali sull'utilizzo e sul funzionamento degli strumenti di diagnostica di beam profiler e faraday cup. Sono stati presentati i principali componenti con cui sono state realizzate le schede elettroniche andando a definire alcune regole generali per il posizionamento degli integrati. Sono state descritte le consuetudini sia per effettuare un corretto dimensionamento delle piste del circuito stampato, che per la creazione del file gerber, usato dall'azienda per la realizzazione delle schede elettroniche. Si è mostrata infine l'implementazione delle schede nella rete EPICS attraverso l'utilizzo del driver "drvDAQE2214" e dei database realizzati.

Attualmente le schede sono state ordinate all'azienda MDSRL che ha formulato un preventivo di 1.357 € per la scheda del beam profiler e di 68 € per la scheda della faraday cup.

Progettazione della scheda elettronica per la movimentazione degli strumenti di diagnostica

L'obiettivo di questo capitolo è quello di fornire una descrizione di come si è svolta la progettazione della scheda elettronica “pneumatic board” utilizzata per la movimentazione del beam profiler, della faraday cup e delle slitte collocate all'interno delle crociere 1 e 2 (vedi figura). Le slitte permettono di selezionare la parte di fascio di interesse bloccando le restanti particelle.

Verranno definiti i parametri di progetto con una breve introduzione sui motori pneumatici, elettrovalvole e micro interruttori per posizionare con precisione i sensori sulla linea del fascio.

Si è utilizzato il software “*OrCAD Capture*” per la progettazione dello schematico, mentre attraverso il software “*PCB editor*” si è realizzato del circuito stampato.

Per la gestione in rete dei dati si è utilizzato il database di EPICS assieme al driver per la scheda Adlink DAQe-2214 che ha permesso la gestione dei segnali provenienti dalla scheda elettronica.

Verranno infine valutati alcuni test effettuati sulla strumentazione di prova per verificare eventuali errori di progetto e aggiungere componenti non considerati all'inizio dello studio.

5.1 Il sistema di movimentazione pneumatica

Come già anticipato nel capitolo 4, gli strumenti di diagnostica vengono movimentati per essere inseriti o disinseriti dalla linea d'asse del fascio, in relazione alla necessità di interagire con esso o di permetterne il cammino senza alterarne le caratteristiche. In particolare, nell'applicazione in esame tali strumenti sono montati su supporti ad intercettazione azionati da attuatori pneumatici.

Il sistema di movimentazione viene fissato ad una flangia ISO-TaperedTM DN160 che dovrà essere opportunamente lavorata per realizzare le sedi dei vari componenti o i fori necessari ai passanti da vuoto. Esso è composto principalmente da:

- Un motore pneumatico;
- Un giunto di collegamento tra motore e vite;
- Una vite e una chiocciola trapezoidali;
- Un cuscinetto nella parte finale della vite a contatto con la flangia;
- Un soffietto al cui interno è collocato un albero;
- Due interruttori per determinare il finecorsa;
- Una struttura di sostegno e posizionamento di tutti i precedenti componenti.

Le tipologie di strumenti che richiedono un attuatore pneumatico, si diversificano in base alla necessità di acquisire un diverso numero di informazioni. Nella flangia per la farady cup si sono collocati due connettori BNC della CeramTec, uno per l'acquisizione del segnale e l'altra per alimentare il soppressore. Nella flangia per il beam profiler si

sono inseriti due connettori da 40 poli per l'acquisizione dei segnali della griglia verticale e orizzontale. Nel sostegno della movimentazione per le slitte si è collocato un potenziometro lineare in grado di determinarne la posizione con precisione.

In figura 5.1 si vede il modello della movimentazione pneumatica delle slitte. Le slitte sono sostanzialmente degli schermi che servono a limitare parzialmente o ad occludere completamente la sezione di passaggio del fascio di particelle.

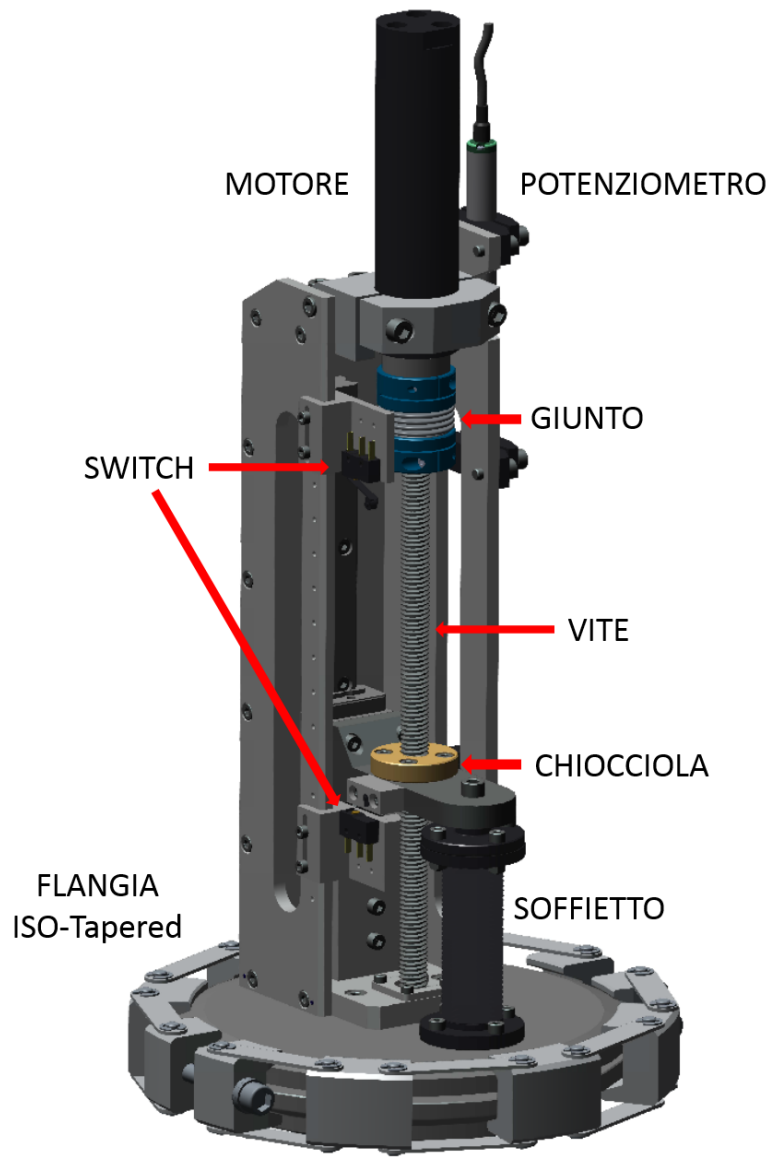


Fig. 5.1: Modello del sistema di movimentazione pneumatico delle slitte.

5.1.1 I motori rotativi pneumatici

I motori pneumatici sono degli attuatori meccanici che consentono di mettere in rotazione l'albero motore utilizzando la forza generata dall'aria compressa. Il vantaggio principale di questi dispositivi è quello di ottenere una coppia molto elevata in relazione alla compattezza realizzativa. Dato che sono dispositivi completamente meccanici e realizzati con

materiali compatibili con ambienti radioattivi, risultano adatti all'installazione sul front end, consentendo inoltre un agevole collocamento dato il poco volume occupato e permettendo di fornire una coppia elevata senza l'utilizzo di riduttori. Sono dispositivi molto robusti e non subiscono l'influenza dovuta a variazioni di temperatura o di umidità. Lo svantaggio principale dei motori pneumatici è dovuto alla difficoltà di controllo, che a differenza dei motori elettrici, non può essere così preciso data l'assenza di dispositivi elettronici. Inoltre hanno un costo che è dalle 2 alle 4 volte maggiore rispetto ad uno elettrico equivalente, risultando comunque sufficientemente reattivi quando viene avviato o interrotto il flusso d'aria.

I motori pneumatici utilizzati sono di tipo volumetrico a palette. La loro struttura è illustrata in figura 5.2. Il componente principale è un rotore scanalato che ruota in modo eccentrico in una camera formata da un cilindro e da due fondelli terminali. Poiché il rotore è fuori centro e il suo diametro esterno è inferiore a quello del cilindro, risulta definita nella geometria una camera a mezza luna. Gli alloggiamenti hanno al loro interno le palette che si muovono liberamente, dividendo la camera a mezza luna in due parti separate di differenti dimensioni. Durante la rotazione, la forza centrifuga aiutata dall'aria compressa, spinge le palette contro la parete del cilindro, mantenendo le varie camere stagne fra loro. La reale efficienza di queste tenute viene denominata "perdita interna".

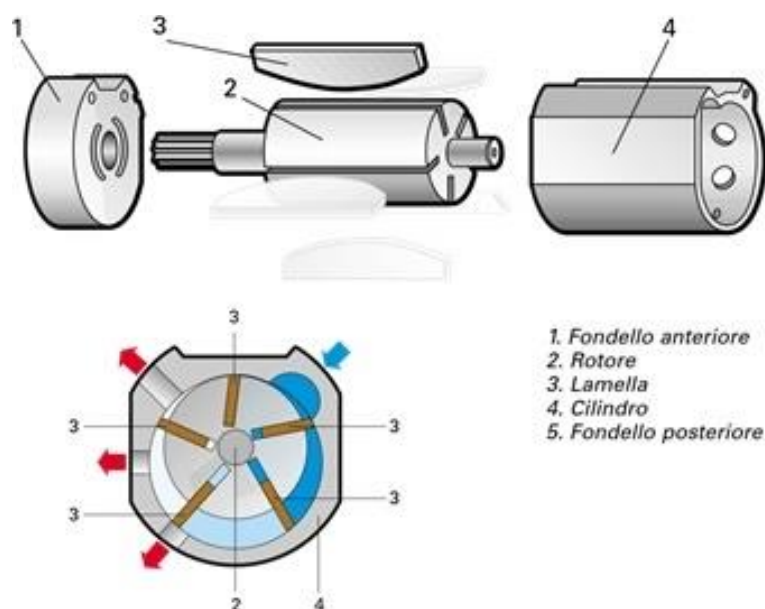


Fig. 5.2: Struttura del motore pneumatico a palette

Il funzionamento descritto di seguito è illustrato in figura 5.3.

- A - L'aria entra all'interno della camera "a". La camera "b", quella fra la seconda e la terza paletta, è in tenuta stagna dalla seconda paletta. La pressione interna alla camera "b" è ancora uguale alla pressione d'ingresso dell'aria. Questa pressione agisce sulla terza paletta facendo muovere il motore in senso orario.
- B - Le palette hanno iniziato la loro rotazione nel cilindro, nella camera "b" avviene un processo di espansione. La pressione interna inizia ora a ridursi, ma la forza espressa è ancora in grado di muovere il rotore sino a che l'area sulla terza paletta risulta più ampia di quella della seconda paletta nella camera "b". Inoltre la pressione interna agisce sulle due palette che vanno a contenere la camera "a".
- C - Le palette hanno ruotato completamente. La camera "b" ora è completamente vuota e non è più in grado di contribuire alla trasmissione della potenza del motore. La

forza che muove il rotore ora arriva dalla spinta sulle prime due palette. Grazie a questo semplice principio l'energia trasmessa dall'aria compressa viene convertita in movimento di rotazione da camera a camera così da permettere la rotazione del motore stesso.

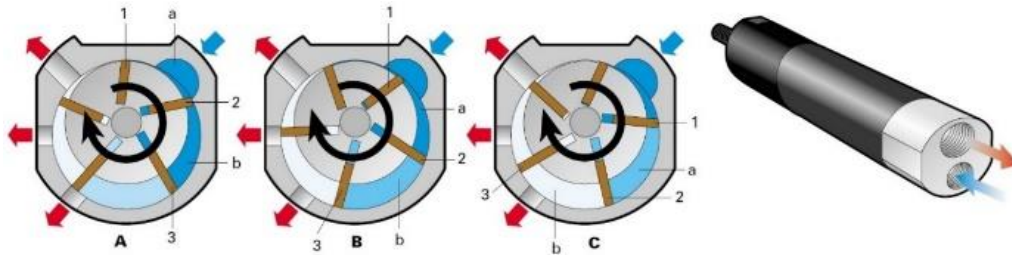


Fig. 5.3: Funzionamento motore pneumatico

Finora è stato visto un motore non reversibile, ovvero ad un unico senso di rotazione, in quanto la struttura del motore stesso non è simmetrica. Nel nostro caso, si è utilizzato un motore reversibile (figura 5.4), dotato di due condotti, "a" e "b", che agiscono alternativamente da alimentazione e da scarico secondario. Questa tipologia di motori sfruttano, per il moto, il principio appena descritto dei motori non reversibili. Lo scarico primario "c" è fisso e non cambia la sua funzione. In questo caso, l'aria che rimane nella camera dopo che lo scarico "c" si è chiuso, subisce una certa compressione, limitando in questo modo il rapporto di espansione tra pressione iniziale e finale.

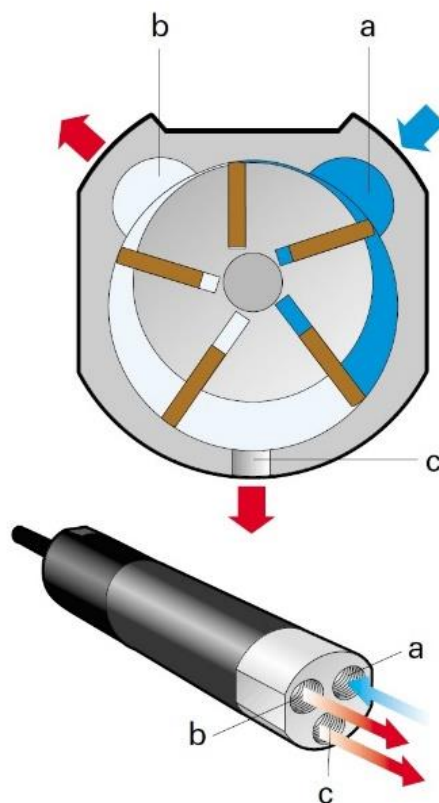


Fig. 5.4: Funzionamento del motore reversibile

Nella fase di avviamento e a basse velocità, parte dell'aria compressa fluisce sotto le palette, premendole contro la superficie interna del cilindro, creando così delle camere di

lavoro stagne. Durante la rotazione, la forza centrifuga aiutata dall'aria compressa, spinge le palette contro la parete del cilindro. A velocità superiori, tuttavia, la pressione esercitata contro la superficie del cilindro non deve essere così elevata, in modo da evitare l'usura eccessiva delle parti a contatto. Nei motori ad alta velocità, i rotori sono normalmente più lunghi e snelli ed equipaggiati di tre o quattro palette, in modo da ottenere una forza centrifuga più blanda, evitando così un incremento della dispersione in attrito tra le superfici a contatto.

In figura 5.5 sono indicate le curve caratteristiche di coppia, potenza e consumo d'aria di un motore pneumatico. Una particolarità dei motori ad aria è che possono lavorare lungo tutta la curva caratteristica della coppia, dalla velocità a vuoto fino all'arresto, senza subire alcun danno.

La potenza prodotta è data dal prodotto della coppia per la velocità:

$$P = \frac{(2 \cdot \pi \cdot M \cdot n)}{60} [W] \quad (5.1.1)$$

dove:

- P, è la potenza [W];
- M, è la coppia [Nm]
- n, è il numero di giri [giri/min].

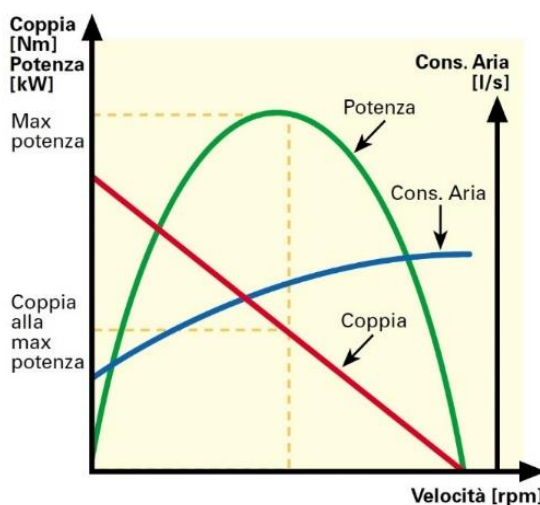


Fig. 5.5: Curva caratteristica dei motori pneumatici

I motori pneumatici producono una curva di potenza caratteristica che presenta il valore massimo (coppia alla massima potenza) a circa il 50% della velocità a vuoto. Il punto di lavoro del motore sarà frutto della combinazione tra la coppia richiesta e la velocità operativa. Nel caso in esame non è specificata una velocità di lavoro, ma è sufficiente erogare la coppia necessaria per portare a termine le movimentazioni.

Il consumo di aria è proporzionale alla velocità del motore e perciò è massimo alla velocità a vuoto. È misurato in Nl/s (normal litro al secondo), non è il volume effettivo che l'aria compressa occupa nel motore, ma è il volume che occuperebbe se fosse espansa alla pressione atmosferica, come viene considerato normalmente in tutte le attrezzature pneumatiche. Anche in condizione di stallo (alla massima pressione applicata) il motore consuma dell'aria. Questo è dovuto dalla presenza di piccole perdite interne tra i vari componenti. Normalmente tutti i motori pneumatici a palette producono una coppia di spunto variabile dovuta alla posizione delle palette nel motore quando si avvia la rotazione.

Il valore della coppia di spunto minima può essere considerato come un valore garantito all'avvio. La variazione differisce tra tipi di motori e deve essere controllata su base individuale. E' da notare che la variazione di coppia è maggiore nei motori reversibili rispetto a quelli non reversibili, quindi la coppia di spunto minima risulta essere inferiore per i motori reversibili. Il motore scelto è il 28M dell'azienda "fiam" [25], il quale è stato precedentemente utilizzato all'interno dei laboratori.

5.1.2 Le elettrovalvole

Per alimentare i motori pneumatici reversibili è necessario avere la possibilità di fornire la corretta quantità di aria (come portata e pressione) e di poter applicare i 3 stati operativi ad ogni motore:

- stop (motore fermo);
- marcia avanti (rotazione in senso orario);
- marcia indietro (rotazione in senso antiorario).

Per rendere realizzabile questa soluzione si utilizzano delle elettrovalvole che saranno a loro volta pilotate dal sistema di controllo.

Le elettrovalvole sono, da un punto di vista funzionale, delle valvole distributrici il cui azionamento avviene elettricamente. Diventa così di particolare importanza l'elettromagnete (o bobina) realizzato mediante un solenoide¹ in filo di rame isolato, avvolto su di un nucleo di materiale non magnetico (amagnetico). Quando la bobina è in tensione si provoca lo spostamento di uno stantuffo interno all'elettrovalvola che consente il passaggio d'aria al fine di spostare l'otturatore e consentire o impedire il passaggio della stessa tra due connessioni pneumatiche.

Le elettrovalvole di tipo monostabile presentano una posizione di lavoro che viene raggiunta, in assenza di comandi elettrici, grazie al posizionamento dell'otturatore garantito da una molla meccanica interna. Quelle di tipo bistabile invece, in assenza di comando elettrico, mantengono l'ultima posizione di lavoro raggiunta. Per classificare le elettrovalvole si considerano le vie e le posizioni, una valvola con v vie e n posizioni è indicata come "valvola v/n ". Schematicamente si indicano le posizioni con delle caselle che contengono: i flussi d'aria, le connessioni (numerare) e la tipologia di azionamento applicata ad ogni posizione. Ad esempio una valvola 3/2 è composta da 3 vie e 2 posizioni (figura 5.6).

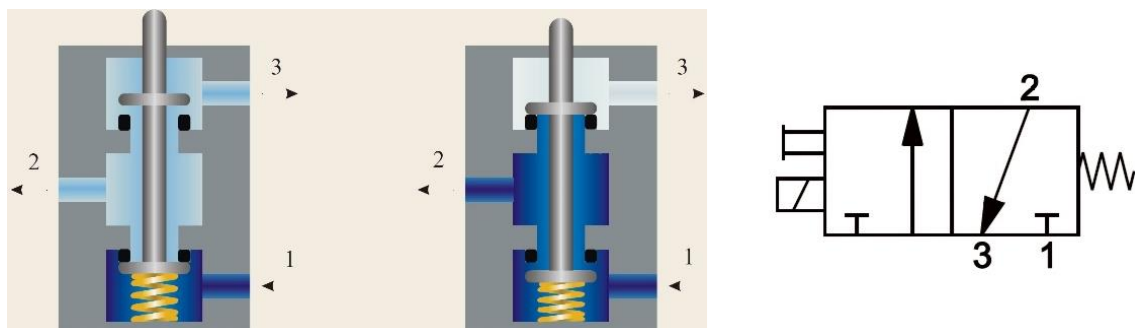


Fig. 5.6: Schema di funzionamento valvola 3/2

Nel nostro caso risulta un consumo d'aria da parte dei modelli 28M pari a 5.8 Nl/s (384 Nl/min). Il margine di sicurezza che si è ritenuto opportuno applicare è di 1.5 volte

¹Un solenoide è una bobina di forma cilindrica formata da una serie di spire circolari molto vicine fra loro e realizzate con un unico filo di materiale conduttore.

la portata d'aria del motore, quindi è richiesta all'elettrovalvola una portata pari a circa 576 Nl/min.

Per realizzare un sistema di elettrovalvole il più semplice e compatto possibile, è opportuno applicare ad ogni motore una sola elettrovalvola, indipendente dalle altre, che possa garantire i 3 stati operativi nel modo più efficace. Questo risultato è ottenibile utilizzando elettrovalvole 5/3 o 3/2+3/2. Le due opzioni sono molto simili e sono caratterizzate da 3 stati di lavoro, associabili ai 3 stati dei motori. Sono monostabili dato che si portano meccanicamente nella posizione di riposo in caso di assenza di comando elettrico e presentano due bobine (doppio impulso), così da poter alimentare il motore con due stati differenti in base al comando elettrico inviato (marcia avanti o marcia indietro). La posizione di riposo presenta 3 opzioni sia per le valvole 5/3 che per le 3/2+3/2. Per il primo tipo di elettrovalvole si può scegliere tra centri aperti, centri chiusi e centri in pressione (figura 5.7). Per il secondo tipo tra “normalmente chiuso-normalmente chiuso” (NC-NC), “normalmente chiuso-normalmente aperto” (NC-NO), “normalmente aperto-normalmente aperto” (NO-NO) (figura 5.8).

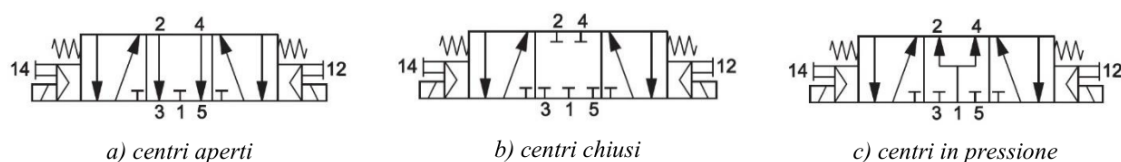


Fig. 5.7: Opzioni per elettrovalvola 5/3

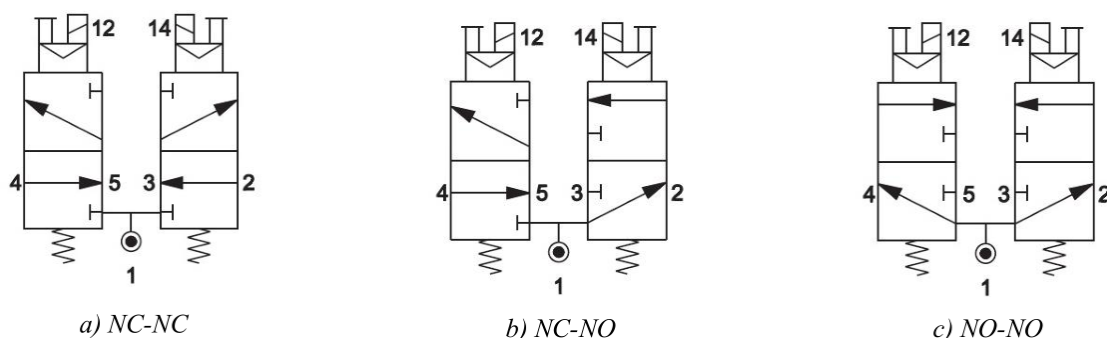


Fig. 5.8: Opzioni per elettrovalvola 3/2 + 3/2

Per ottenere un corretto funzionamento dei motori pneumatici è necessario bloccare l'alimentazione d'aria quando si è in assenza di comando alle bobine (condizione di stop), quindi risultano opportune o elettrovalvole 5/3 centri chiusi o 3/2+3/2 NC-NC. Queste tipologie consentono di portare meccanicamente la valvola in posizione centrale quando le bobine sono a riposo.

Per il nostro azionamento sono state scelte le valvole 5/3 centri chiusi prodotte dall'azienda Camozzi (modello 368-011-02) che consentono una portata d'aria pari a 700 Nl/min e sono dotate di bobine funzionanti ad una tensione elettrica di 24 V DC (modello U77). Queste elettrovalvole supportano una pressione di lavoro che va dai 2 ai 10 bar.

5.1.3 Gli interruttori di finecorsa

Per controllare che la posizione dei diversi sensori sia all'interno del raggio d'azione del fascio si sono installati dei micro interruttori che permettono di arrestare il motore pneumatico. Il finecorsa è un micro interruttore azionato da una parte meccanica che permette

al sistema di controllo di leggere un contatto elettrico (aperto o chiuso) e di conseguenza interpretare cosa sta accadendo nel sistema meccanico. Una linguetta di alluminio solidale alla chiocciola permette l'innesco degli switch. Sono sufficienti due finecorsa per ogni movimentazione (uno per ogni posizione finale).

Per consentire una taratura variabile sulla posizione del finecorsa sono state realizzate delle staffe di fissaggio metalliche dotate di un'asola che consente di allontanare o avvicinare il dispositivo lungo la direzione della movimentazione, potendo modificare a piacimento la posizione di lavoro standard.

Nel sistema di movimentazione sono stati installati i micro interruttori Omron (modello SS10GL2T) normalmente aperti (NA). In caso di rottura dello switch è stato predisposto un finecorsa meccanico.

5.2 Presentazione della componentistica elettronica

Verrano ora presentati i principali componenti che sono presenti nella scheda pneumatic board. Lo schematico completo viene presentato in appendice E.

5.2.1 Buffer 74HCT365D

Le uscite del PC industriale sono elaborate grazie al buffer 74HCT365D. Questo le porta da 3.3 V a 5 V per riuscire a comandare i relè a stato solido. Una sua presentazione è già stata sviluppata nel capitolo 4.3.4.

5.2.2 Relè a stato solido DC60P

Il relè a stato solido DC60P è stato impiegato per comandare le elettrovalvole utilizzate nella movimentazione degli strumenti di diagnostica. Questo integrato è composto da un optoisolatore e da un relè.

L'optoisolatore è un componente elettronico che permette di trasferire un segnale fra due circuiti mantenendo l'isolamento galvanico² fra gli stessi. Il simbolo generico per la descrizione del componente è costituito da un LED e un fototransistor. Le variazioni di luminosità legate al segnale in ingresso vengono rilevate dall'elemento fotosensibile ottenendo il trasferimento dell'informazione da un circuito all'altro senza che vi sia continuità elettrica.

Il relè è un dispositivo elettrico comandato dalle variazioni di corrente per influenzare le condizioni di un altro circuito. In sostanza, il relè è un deviatore che viene azionato da un elettromagnete.

L'integrato ha la funzione di ricevere il segnale proveniente dal PC industriale, precedentemente processato dal buffer, in modo che la base del transistor NPN sia attraversata da una corrente di 0.5 mA. Con questo procedimento viene a formarsi il collegamento che permette al fotoaccoppiatore di attivare il relè e creare una differenza di potenziale di 24 V ai capi del solenoide. Un diodo per il ricircolo della corrente è stato posizionato ai capi dell'ingresso della bobina nella scheda elettronica.

In figura 5.9 viene rappresentato lo schematico utilizzato per il componente.

5.2.3 Pull Up network

Il Pull Up network è stato inserito per garantire che gli ingressi del sistema logico siano ai livelli previsti quando i dispositivi esterni sono scollegati o ad alta impedenza. Nel nostro caso si è posizionata una resistenza da 10 k Ω nella configurazione pull-up. Questa debole

²L'isolamento galvanico, è la condizione per cui tra due punti a differente potenziale non ha luogo una circolazione di corrente continua.

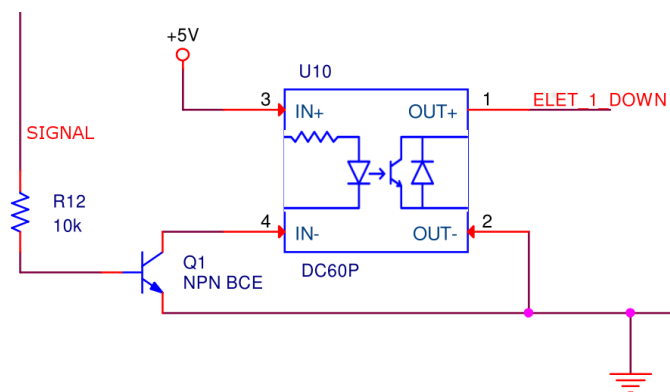


Fig. 5.9: Schematico DC60P

resistenza “tira” la tensione del filo in cui non è presente una differenza di potenziale ed è collegata verso il suo livello di tensione di origine quando gli altri componenti della linea sono inattivi. Questo perché quando tutte le altre connessioni terminali sulla linea sono inattive, sono ad alta impedenza e agiscono come se fossero scollegate. A causa di questo comportamento il circuito agisce come se fosse scollegato, e nessuna corrente fluirà sulla linea, e la tensione del filo (comune tra gli altri componenti sulla linea) sarà quella del generatore di tensione, secondo le regole della Legge di Ohm.

5.3 Diagramma di flusso

La logica seguita per comandare l’elettrovalvola è stata quella di gestire il PC industriale tramite l’interfaccia grafica del CSS. All’interno dell’IOC si è realizzato un record “ao” che ha permesso di inviare un segnale digitale a 3.3 V e successivamente di convertirlo a 5 V tramite il buffer. Questo segnale va ad attivare l’opto isolatore del relè a stato solido che innesca il solenoide dell’elettrovalvola collegata al motore pneumatico per eseguire la movimentazione scelta.

Per la lettura degli interruttori di fine corsa si è inserito all’interno della scheda una Pull Up network e per l’IOC si è realizzato un record di “ai” che gestisce il segnale degli switch. L’attivazione o la disattivazione di questi interruttori è visualizzabile tramite l’interfaccia grafica del CSS.

Il record “calc” è stato inserito per creare un controllo nella gestione dei comandi ai relè. Esso permette di disabilitare il pulsante di movimentazione nel caso in cui sia premuto il finecorsa sulla stessa direzione, impedendo così al motore di avviarsi inutilmente.

Il diagramma di flusso appena descritto è inserito in figura 5.10.

5.4 Test tramite strumentazione di prova

Il circuito di prova è stato realizzato su una scheda millefori in carta di resina sintetica con uno spessore del rame pari a 35 μm e stagnato manualmente. I diversi componenti sono stati posizionati sufficientemente distanti per permettere il lavoro di stagnatura.

La prova svolta sul sistema di movimentazione è stato realizzato utilizzando la seguente strumentazione:

- Un PC industriale;
- Un connettore per gestire gli ingressi del PC industriale;
- Un connettore per gestire le uscite del PC industriale;

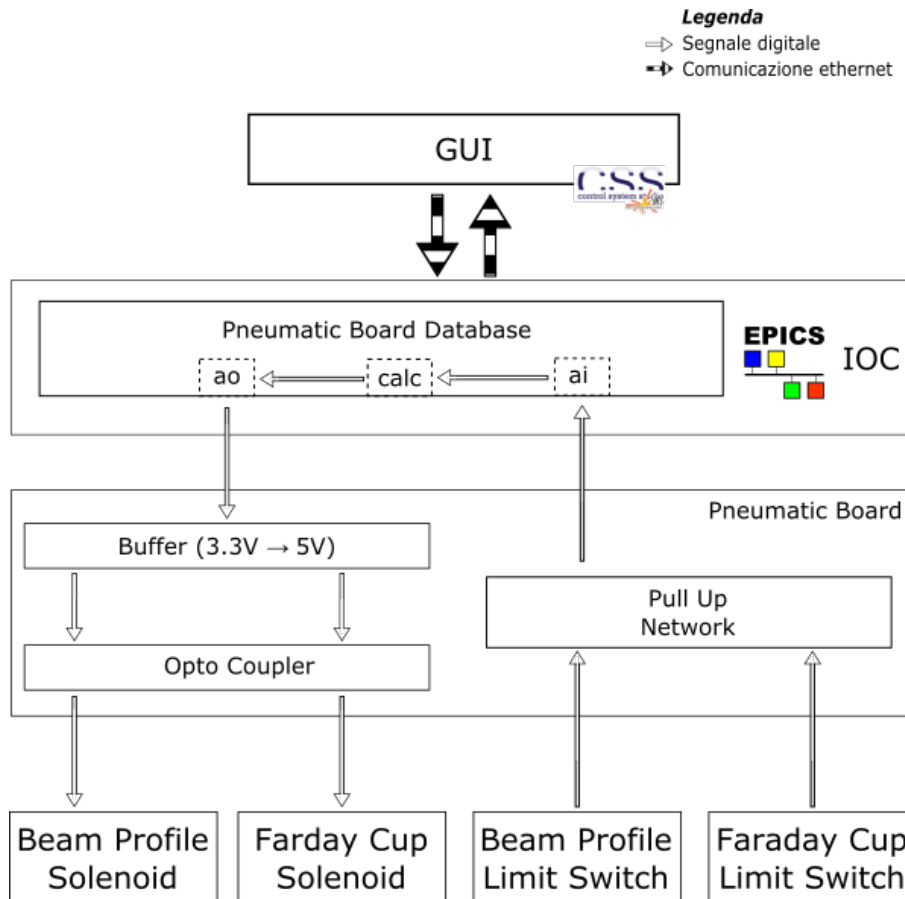


Fig. 5.10: Diagramma di flusso della movimentazione pneumatica

- Una scheda di alimentazione per i diversi componenti;
- Una pneumatic board per la gestione dei segnali;
- Una elettrovalvola 5/3;
- Un sistema di movimentazione.

In figura 5.11 e 5.12 sono inserite rispettivamente le foto del banco prova per il test della pneumatic board e del sistema di movimentazione.

Attraverso la prova sperimentale si è verificata l'affidabilità del circuito creato accertandosi che le tempistiche di comando rispettino le specifiche sul posizionamento del rilevatore. Si sono inoltre poste le basi per lo sviluppo del database e la configurazione della scheda Adlink DAQe-2214 nella rete EPICS.

Il test ha fatto constatare la necessità di posizionare dei led sulla scheda di alimentazione per verificare che i componenti erogino correttamente le tensioni richieste.

Per verificare i ritardi dovuti al tempo di elaborazione dei segnali si è utilizzato un oscilloscopio. Il primo controllo è stato quello di attivare la movimentazione tramite il comando dato dalla GUI (l'acquisizione del segnale è riferita all'ingresso del PC nel canale dedicato all'attivazione del motore pneumatico) e di verificare il tempo trascorso per l'attivazione del solenoide. Un secondo controllo si è svolto per constatare il ritardo derivante dalla pressione del microinterruttore (dovuta alla linguetta posizionata sul supporto della chiocciola) fino alla disattivazione del solenoide.

In figura 5.13 e 5.14 vengono inseriti i grafici dei test effettuati sui ritardi della movimentazione dovuti al controllo.

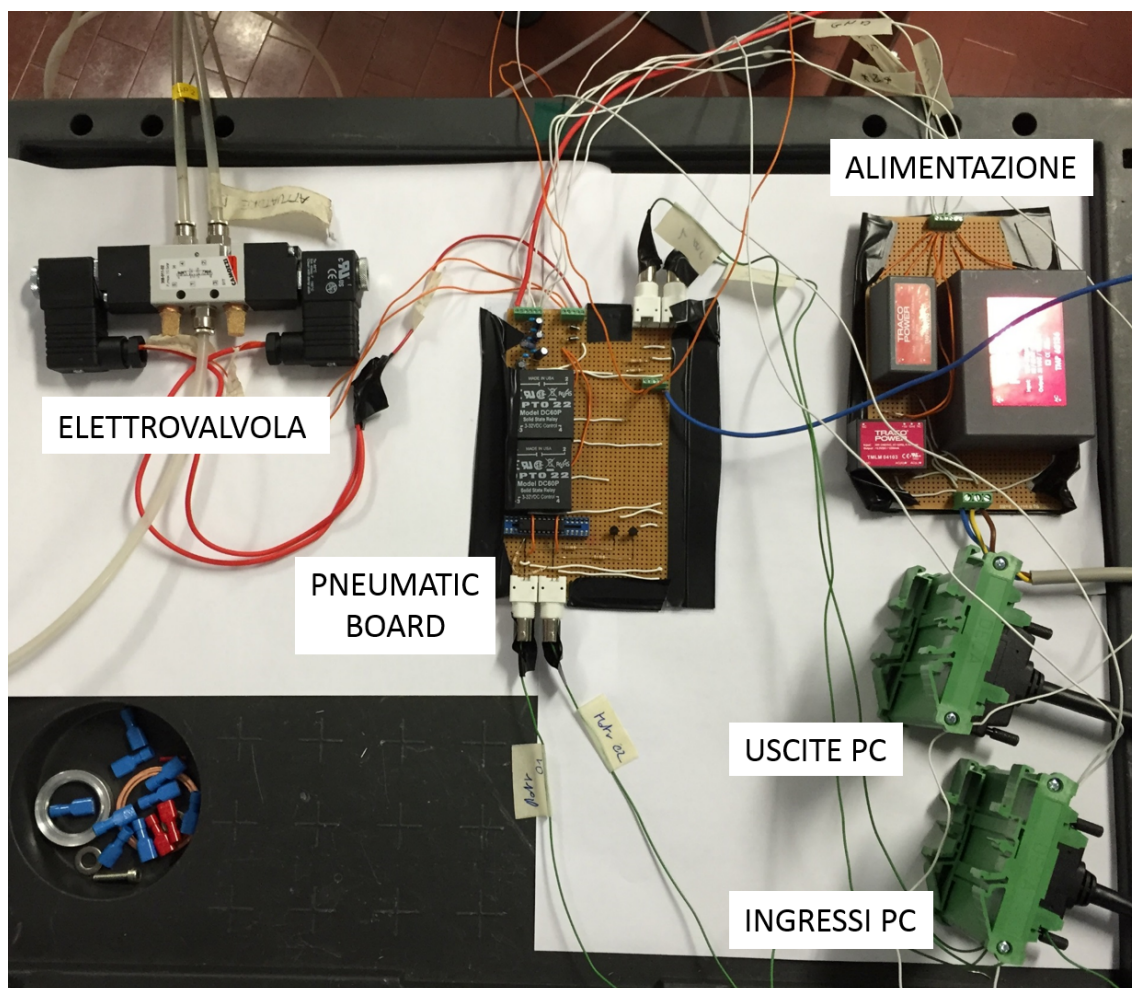


Fig. 5.11: Strumenti utilizzati per il test della pneumatic board.

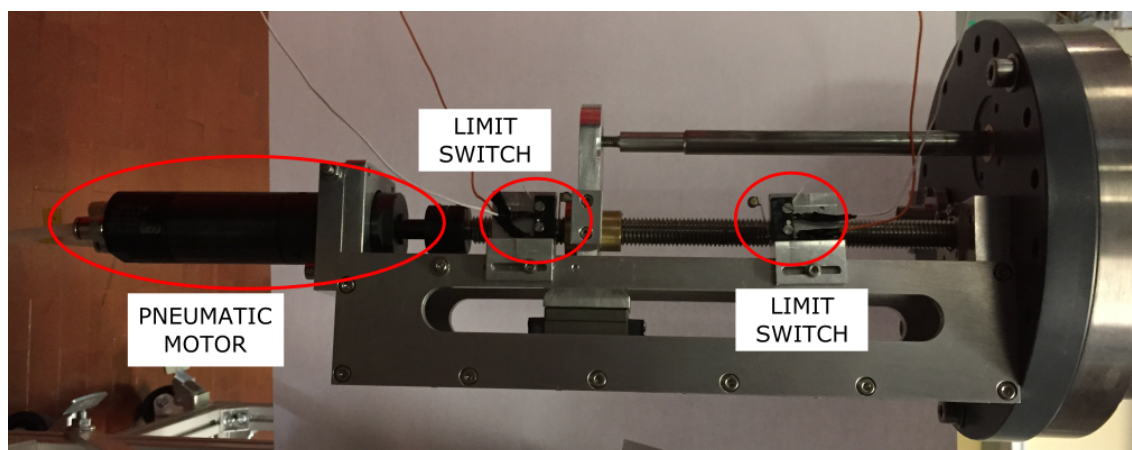


Fig. 5.12: Foto del sistema movimentazione utilizzato durante i test.

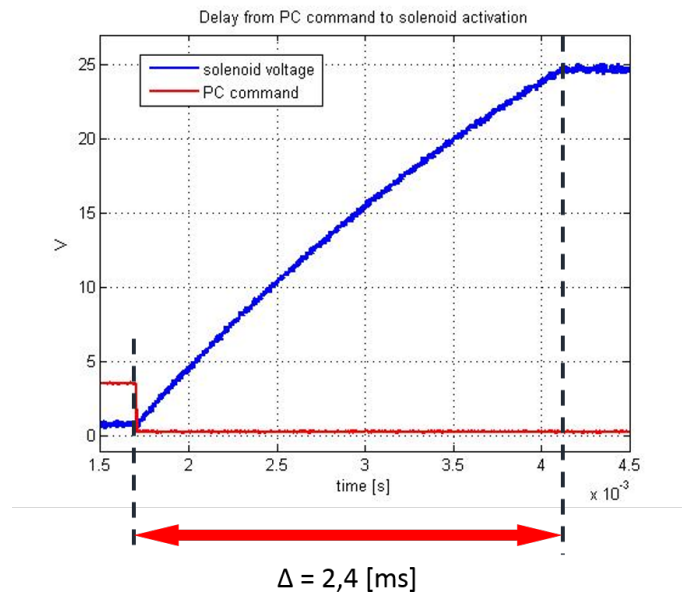


Fig. 5.13: Viene mostrato il tempo trascorso tra il comando proveniente dal PC e l'attivazione effettiva del solenoide.

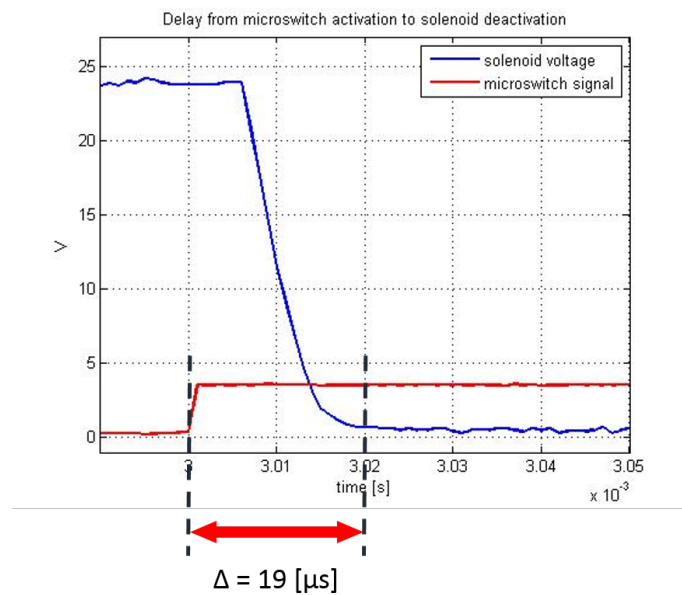


Fig. 5.14: Viene mostrato il tempo trascorso dal segnale proveniente dallo switch di finecorsa fino alla disattivazione del solenoide.

Si è inoltre valutata la precisione del posizionamento della chiocciola nella fase di arresto del motore pneumatico. Essa è dovuta alla pressione da parte della linguetta, posta sul sostegno della chiocciola, sul microinterruttore utilizzato per segnalare il finecorsa. Dal grafico di figura 5.15 si evidenzia l'errore di posizionamento, le misure prese si riferiscono alla distanza compresa tra il sostegno del microinterruttore a quello della chiocciola. Tale range di precisione risulta essere compatibile con le specifiche richieste.

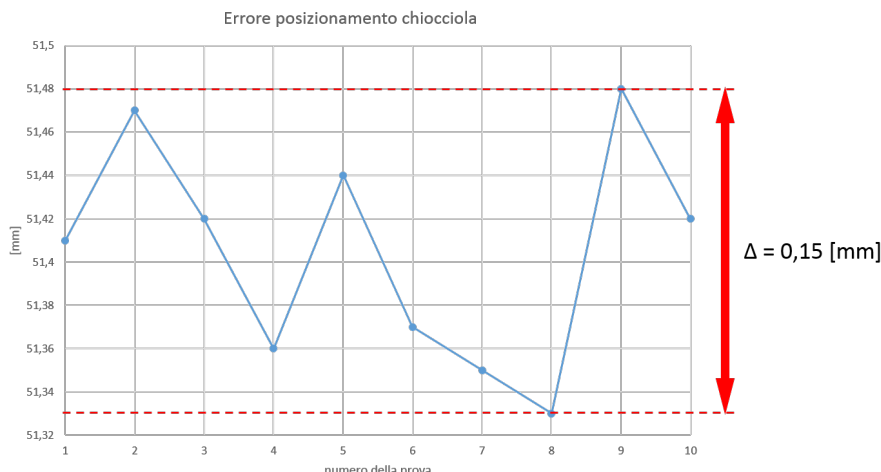


Fig. 5.15: Errore di posizionamento della chiocciola del motore pneumatico nella fase di test.

5.5 Progettazione del circuito stampato

Nella realizzazione del PCB della scheda elettronica pneumatic board attraverso il software “PCB Editor” sono state rispettate alcune norme generali, descritte nel capitolo 4.4, che permettono di assicurare un posizionamento dei componenti coerente con i PCB realizzati per il laboratorio del progetto SPES.

5.5.1 Dimensionamento delle piste

Si riprendono i calcoli visti nel capitolo 4.4.1 per dimensionare correttamente le piste della scheda pneumatica. In questo caso la criticità risiede nella pista a 24 V che porta l’alimentazione ai quattro solenoidi. La potenza assorbita da quest’ultimo elemento è pari a 3.1 W da cui si ottiene una corrente di circa 0.13 A, raddoppiando questo valore otteniamo un buon margine di sicurezza da cui si partirà per effettuare la verifica.

$$I_{max} = \frac{3.1}{24} \cdot 2 \cdot 4 = 1.04 [A]$$

Lo spessore minimo del rame fornito dalla ditta è di $35 \mu m = 1 \text{ oz}/ft^2$, mentre la lunghezza della pista sarà al massimo di 60 mm sulla scheda., la sovratemperatura considerata è di $20^\circ C$. Secondo l’equazione 4.4.5 si ottiene:

$$Area = \left(\frac{1.04}{0.048 \cdot (40 - 20)^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} = 11.30 [mils^2]$$

$$W = \frac{11.30}{1 \cdot 1.378} = 8.20 [mils]$$

A fronte di questi risultati la larghezza della pista scelta è stata quindi pari a 9 mils che ha permesso di rimanere con un buon margine entro i limiti di sicurezza.

Si è poi preso in considerazione la caduta di tensione lungo la pista. La resistenza della pista, esprimendo l’area in centimetri quadri e la lunghezza della pista in centimetri, dovrà essere:

$$R = \frac{0.0176 \cdot 10^{-6} \cdot 6}{7.29 \cdot 10^{-5}} \cdot (1 + \alpha \cdot 20) = 0.02 [\Omega]$$

Che provoca una caduta di tensione di $V = R \cdot I_{max} = 0.02 [V]$ e di rimanere nel range accettabile per la costruzione.

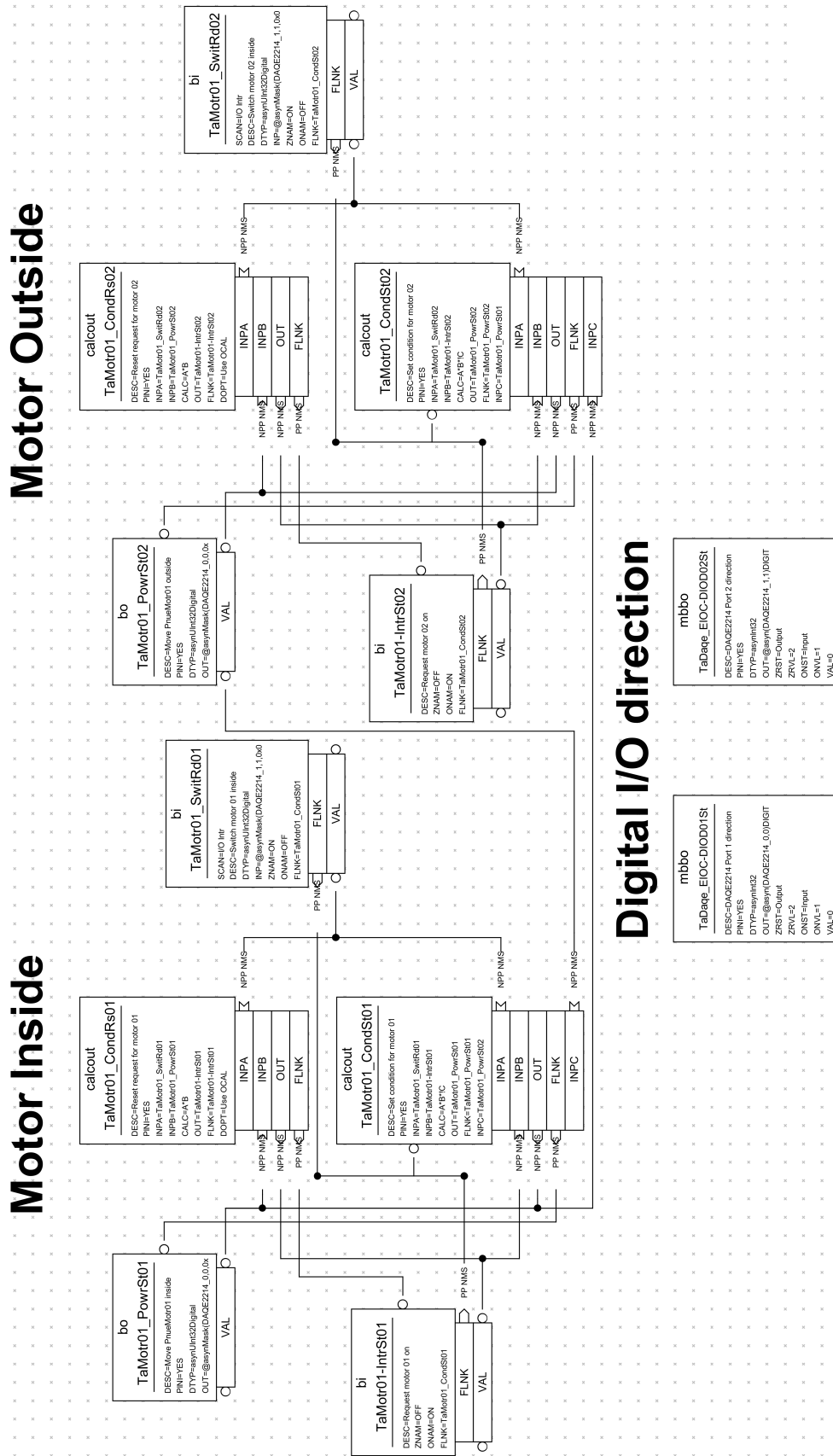


Fig. 5.16: Visualizzazione grafica dei record utilizzati per la pneumatic board.

I file gerber sono stati realizzati in modo analogo a quelle di beam profiler e faraday cup (capitolo 4.4.2).

5.6 Implementazione della scheda in EPICS

La scelta di utilizzare una scheda elettronica appositamente progettata per coordinare la movimentazione pneumatica, risiede nel fatto che la gestione del database, ed in particolare la regolazione di un determinato strumento, risulta essere maggiormente fluida nei sistemi nativi EPICS.

Per configurare correttamente l'IOC si è utilizzato il driver “drvDAQE2214” (descritto nel paragrafo 4.5), tramite il quale si è realizzata l'interfaccia con la scheda Adlink DAQe-2214. Per l'inizializzazione degli ingressi e uscite digitali si è andato a modificare il file “st.cmd”. Il codice sorgente viene inserito nell'appendice F.

5.6.1 Pneumatic board database

Tramite la scrittura sul record “TaMotr01-IntrSt01” si invia una richiesta al record “TaMotr01_CondSt01” per l'attivazione dell'elettrovalvola. Questa ha esito positivo solamente se il fincorsa elettrico, installato nella direzione del moto voluto, non è premuto dalla linguetta installata sul supporto della chiocciola della movimentazione o non sia attivo il comando speculare “TaMotr01-IntrSt02” per l'avvio del motore nella direzione opposta. Se tali condizioni hanno esito affermativo si innesca il solenoide tramite il record “TaMotr01_PowrSt01”, che spostando il pistone interno all'elettrovalvola fa passare il flusso d'aria, permettendo al motore di muoversi. Alla fine della movimentazione viene innescato meccanicamente il microinterruttore di fincorsa attivando il record “TaMotr01_SwitRd01” che permette attraverso il record “TaMotr01_CondRs01” di inizializzare il record di richiesta iniziale. Per definire la direzione di ingresso o di uscita di una porta digitale della scheda DAQe2214 si è utilizzato il record “TaDaqe_{EOC} – DIOD02St”.

In figura 5.16 viene inserita una visualizzazione grafica dei record utilizzati per la pneumatic board tramite il software vdct.

5.7 Conclusioni

In questo capitolo è stata descritta la realizzazione della scheda elettronica pneumatic board partendo dalle specifiche di progetto. Si sono fornite le nozioni principali per comprendere il funzionamento del sistema di movimentazione pneumatica utilizzato all'interno del laboratorio e degli integrati utilizzati per la realizzazione della scheda elettronica.

I test effettuati tramite la strumentazione di prova hanno evidenziato alcune modifiche necessarie che hanno portato alla realizzazione definitiva del circuito stampato, inoltre hanno permesso di verificare la precisione attenuata sulla movimentazione tramite il sistema di controllo. Sono state evidenziate le criticità riguardanti il dimensionamento e la realizzazione delle piste sul PCB.

Si è mostrata infine l'implementazione delle schede nella rete EPICS attraverso l'utilizzo del driver “drvDAQE2214” e dei database realizzati.

Attualmente il file gerber delle schede elettroniche della pneumatic board deve essere spedito in azienda per la realizzazione del PCB.

Proposta di aggiornamento dei sistemi di controllo nel laboratorio off-line del Front-End

Questo capitolo si prefigge il compito di vagliare delle possibilità in merito ad eventuali modifiche sul sistema di controllo del Front-End. In particolare verranno presi in considerazione l'introduzione di un nuovo rack sul quale verrà inserita la strumentazione dedicata alla diagnostica del fascio protonico. All'interno del rack verranno inserite le schede per l'acquisizione del segnale derivante dalla faraday cup e dai collimatori, inoltre per l'elaborazione e la trasmissione dei dati verranno prese in considerazione diverse proposte. I collimatori sono oggetti in grado di sagomare il fascio nel modo appropriato.

Data la necessità di misurare la corrente nel dump della camera target, si è preso in considerazione la realizzazione di una box in grado di svolgere tale mansione; essa potrà essere posizionata nel rack di alta tensione.

Infine si è ponderata l'eventualità di allungare l'emittance meter (strumento utilizzato per misurare l'emittanza del fascio lungo il canale radiativo) per permettere al fascio di occupare una porzione maggiore della finestra di rilevazione.

In figura 6.1 viene mostrato il laboratorio off-line del front-end prima della proposta di aggiornamento.

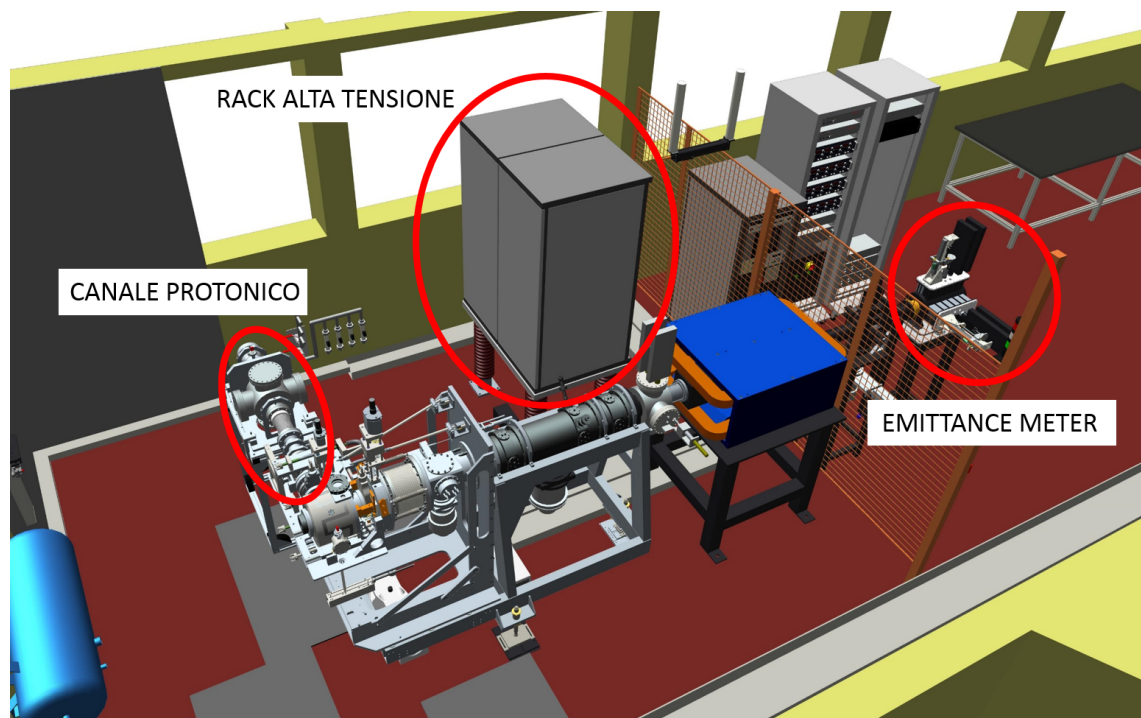


Fig. 6.1: Planimetria del laboratorio front-end prima della proposta di aggiornamento.

6.1 Progetto preliminare dei sistemi di controllo del canale protonico

Gli strumenti posizionati all'interno del canale protonico sono dimensionati per un fascio avente un'energia specifica di 40 MeV/u ed una potenza di 9.4 kW . Per plasmare il fascio si sono posizionati dei collimatori affinché il target riceva una potenza massima pari a 8 kW .

In generale, un collimatore è un dispositivo in grado di dare la forma desiderata ad un fascio proveniente da una sorgente ed è situato lungo il percorso del fascio principale per modellarlo in funzione delle applicazioni specifiche. In particolare, nel caso in esame, tale dispositivo è collocato nel canale protonico del Front-End ed è utilizzato per controllare la dimensione del fascio protonico prodotto, dunque funge da vero e proprio schermo di correzione per conferire al fascio una forma voluta a valle. I collimatori realizzati ai laboratori si diversificano fra loro dal momento che i primi tre sono provvisti di un unico connettore, mentre l'ultimo ne possiede quattro. Tali connettori sono isolati in allumina e vengono utilizzati per misurare la corrente di fascio che impatta sul collimatore. La disparità fra i collimatori risiede nella volontà di utilizzare l'ultimo collimatore non solo come rilevatore ma anche come sistema di controllo per verificare la rotazione del fascio attorno all'asse del canale protonico (chiamata wobbling). In figura 6.2 a sinistra si mostra come i collimatori modellano il fascio, a destra è presentato il modello CAD dell'ultimo collimatore.

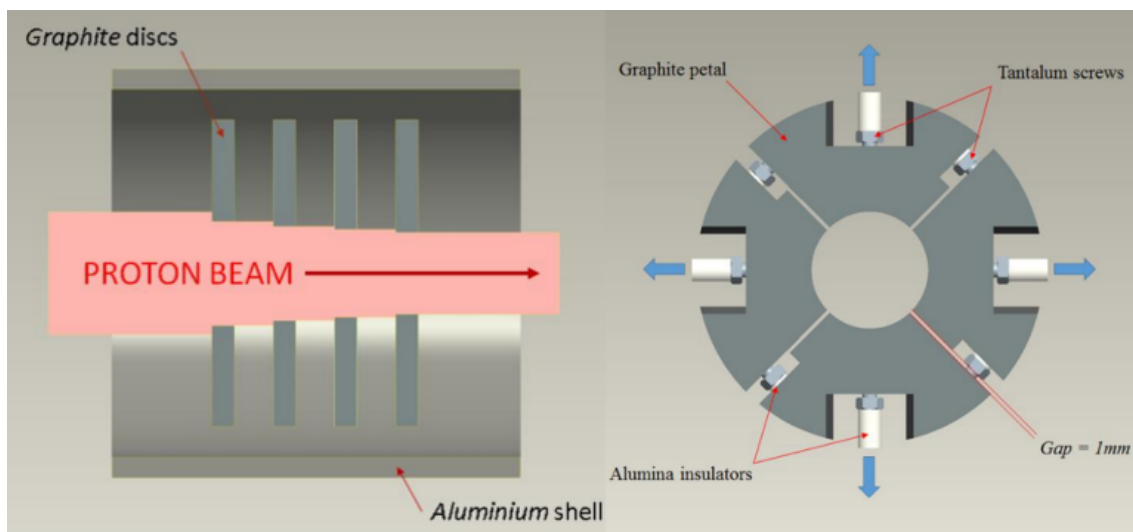


Fig. 6.2: A sinistra si notano i quattro collimatori che modellano il fascio protonico, a destra il modello 3D dell'ultimo collimatore.

Nel canale protonico, seguendo la direzione del fascio, successivamente ai collimatori ne è collocato uno singolo utilizzato come sistema di sicurezza e infine una faraday cup estraibile alla cui estremità è posto un ulteriore collimatore per il controllo dell'intergrità strutturale dello strumento.

La seguente tabella, oltre a riportare la tipologia e la quantità degli strumenti utilizzati, indica il numero totale di segnali acquisiti in base allo strumento utilizzato ed l'ordine con cui il fascio li intercetta.

Strumento	Quantità elementi	Quantità segnali
Collimatore singolo	3	3
Collimatore a quattro petali	1	4
Collimatore singolo di controllo	1	1
Faraday cup	1	1
Collimatore singolo di controllo	1	1
Totale	7	10

Tab. 6.1: Numero di segnali acquisiti e sensori presenti nel canale protonico.

Si riscontra allora la necessità di utilizzare 10 schede elettroniche di tipo faraday cup descritte nel capitolo 4 per l'acquisizione dei segnali inviati dai sensori precedentemente descritti.

6.1.1 Studio di fattibilità per l'elaborazione dei segnali della box di diagnostica del canale protonico

Per l'acquisizione del fascio protonico che va ad impattare sui collimatori è possibile creare una box di diagnostica apposita, che possa ricevere un segnale di corrente ed inviarlo tramite un convertitore in fibra ottica fino al PC industriale per cui esso possa essere elaborato ed implementato nella rete EPICS. Dato che gli strumenti nel canale protonico sono posti ad una differenza di potenziale di $+500 V$ rispetto alla massa del sistema di acquisizione principale, risulta fondamentale usare la fibra ottica.

Le soluzioni prese al vaglio dopo aver verificato la disponibilità della strumentazione hardware trovata su internet, sono state le seguenti:

1. Inserire nel box metallico il numero necessario di schede (fc acquisition board - v2) per cui ad ognuna va agganciato un convertitore in fibra ottica analogico (AFL-220) per la trasmissione ed uno per la ricezione del segnale. Quest'ultimo viene gestito da un PC industriale in grado di elaborarlo e creare dei record in EPICS. La formula per la quantità del materiale diventa: $(componenti + FO) \times N$. Dove N rappresenta il numero di segnali che si vogliono analizzare e per componenti si intende la scheda di acquisizione. La soluzione proposta viene rappresentata in Figura 6.3.
2. Inserire nel box metallico un PC per elaborare direttamente il segnale, in questo caso la comunicazione viene trasferita con un convertitore in fibra ottica ethernet (AT-MC101XL) fino al suo ricevitore. Questo permette di interfacciarsi direttamente al PC industriale tramite la rete EPICS. La formula per il calcolo del materiale diventa: $componenti \times N + PC + FO$. La soluzione proposta viene rappresentata in Figura 6.4.
3. Inserire tra la scheda (fc acquisition board) ed il convertitori di fibra ottica (EKS IOL3000), una scheda di conversione in grado di portare il segnale da $\pm 10 V$ a $0 \div 10 V$. Questo a causa del range in ingresso del dispositivo. Un pregio del metodo appena elencato è la riduzione del numero di dispositivi all'interno del box, ma come difetta ha una diminuzione di risoluzione del segnale di tensione in uscita dalla scheda. La formula per il calcolo del materiale diventa: $componenti \times N + FO \times (N/4)$. La soluzione proposta viene rappresentata in Figura 6.5.

Da notare che per ogni configurazione sono necessari N canali analogici sul PC industriale.

Si sono svolte delle ricerche per quel che riguarda prezzo e disponibilità dei dispositivi in fibra ottica. I preventivi proposti dalle aziende contattate sono:

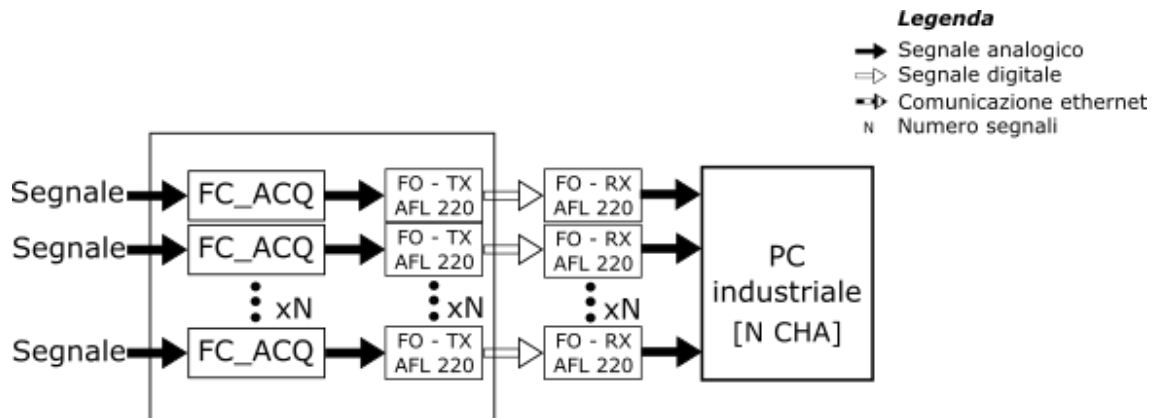


Fig. 6.3: Soluzione proposta N.1

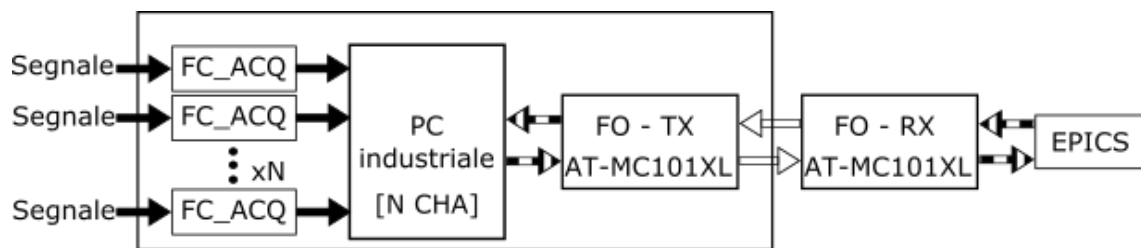


Fig. 6.4: Soluzione proposta N.2

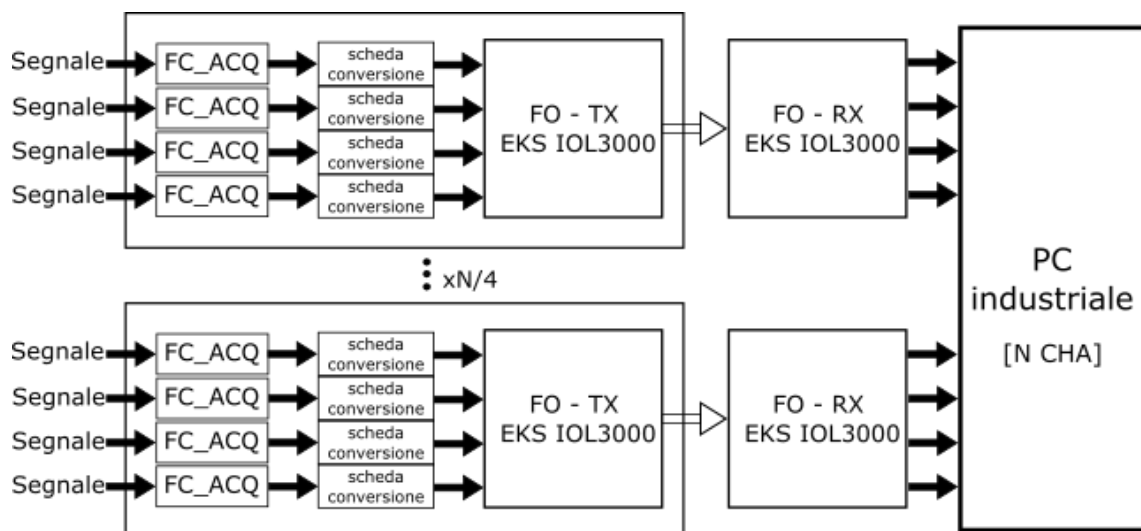


Fig. 6.5: Soluzione proposta N.3

- EKS IOL3000 circa 970 € (ricevitore e trasmettitore)
- AFL 220 circa 2060 € (ricevitore e trasmettitore)
- AT-MC101XL circa 172 € (solo trasmettitore)

Il PC industriale considerato per l'elaborazione dei segnali ha un costo indicativo di 4000 €.

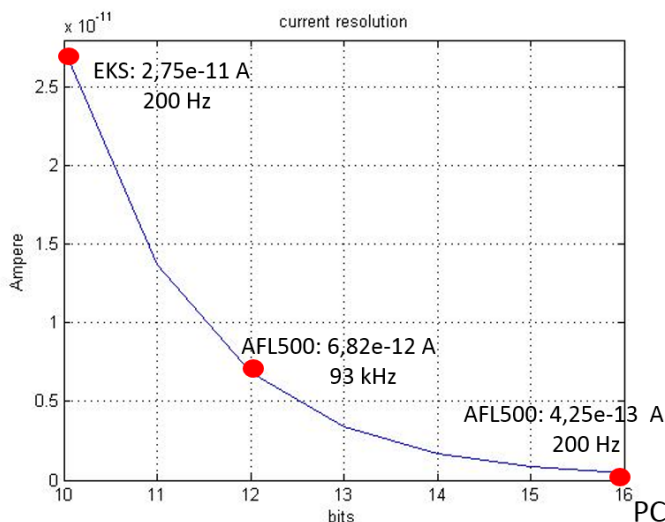


Fig. 6.6: Risoluzione convertitori in fibra ottica.

In Figura 6.6 viene rappresentata la risoluzione che si può ottenere dai convertitori in fibra ottica. In particolare per AFL 220 viene rappresentato anche con possibilità di sovracampionamento riuscendo così a portarsi ad una risoluzione di 16 bits pari a quella del PC industriale. Per il posizionamento della strumentazione all'interno del laboratorio, sarà necessario comprare un apposito rack che verrà posizionato in prossimità del canale protonico.

6.1.2 Soluzione proposta

La soluzione ottimale in funzione dell'incidenza del costo e della flessibilità del sistema, è la seconda, ovvero prendere un rack aggiuntivo ed inserirvi un PC industriale. In questo modo si potrebbero, a seconda delle necessità future, implementare ulteriori IOC o sistemi di controllo che richiedano una differenza di potenziale di +500 V lungo il canale protonico. A discapito di tale soluzione sono certamente lo spazio che verrà occupato ed il consumo di potenza.

In figura 6.7 viene rappresentato uno schema a blocchi della possibile disposizione dei componenti del rack posizionati in vicinanza al fascio protonico.

Configurazione del rack sul canale protonico

1. Parte esterna:

- Ricevitore FO: ricezione della comunicazione del PC tramite cavo in fibra ottica.
- Alimentazione 230 V: per alimentare i componenti interni del rack.

2. Parte interna al Rack:

- Trasformatore di isolamento: per alimentare le componenti all'interno della scatola isolata.

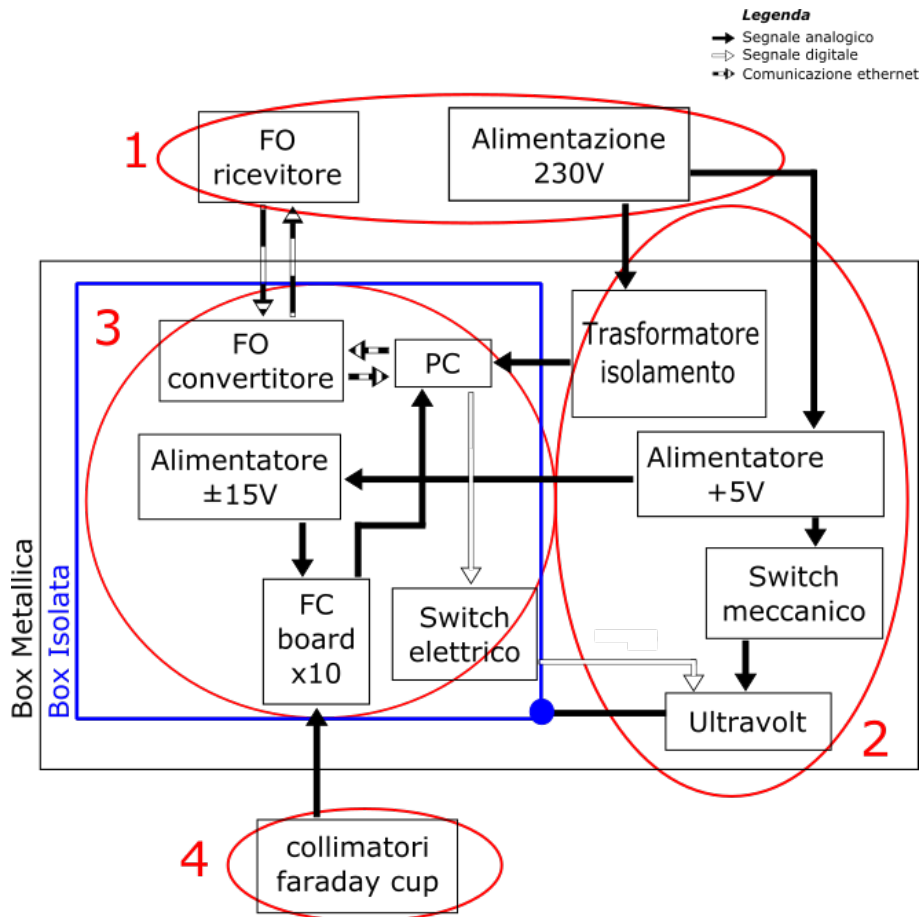


Fig. 6.7: Schema a blocchi della box di acquisizione ed elaborazione sul canale protonico.

- Alimentatore +5 V: alimentazione del componente ultravolt.
- Switch meccanico: utilizzato per verificare che la scatola metallica sia chiusa correttamente. In caso negativo il componente ultravolt non viene alimentato.
- Switch elettrico: utilizzato come precauzione, si abilita tramite interfaccia CSS (i database di EPICS sono posizionati sul PC all'interno del rack). in caso negativo il componente ultravolt non viene abilitato ad erogare tensione.
- Ultravolt: serve per creare una differenza di potenziale di +500 V tra la massa della scatola metallica e la massa della scatola isolata. Viene agganciato alla parte metallica della scatola isolata.

3. Parte interna, scatola isolata:

- Alimentazione ± 15 V: per alimentare la schede di acquisizione (fc acquisition board - v2).
- FC board x10: 10 schede (fc acquisition board - v2) utilizzate per l'acquisizione del segnale.
- PC: utilizzato per l'acquisizione dei segnali che arrivano dalle FC board e dell'invio della comunicazione tramite cavo ethernet fino al convertitore in fibra ottica.
- Convertitore FO: trasmissione della comunicazione del PC tramite cavo in fibra ottica.

4. Strumenti posizionati all'interno del canale protonico i quali necessitano della rilevazione di corrente:

- 3 connettori sui collimatori;
- 4 connettori sui petali dell'ultimo collimatore;
- 1 connettore prima della faraday cup per il controllo del collimatore;
- 1 connettore per la faraday cup;
- 1 connettore per il controllo della faraday cup.

In figura 6.8 si mostra la posizione considerata per il nuovo rack in cui si andranno ad inserire gli strumenti per la diagnostica del canale protonico. Sulla stesso rack, oltre al box protonico, verrà inserito un PC industriale per l'elaborazione dei segnali, un trasmettitore in fibra ottica e uno spazio lasciato appositamente libero per inserire all'occorrenza delle strumentazioni.

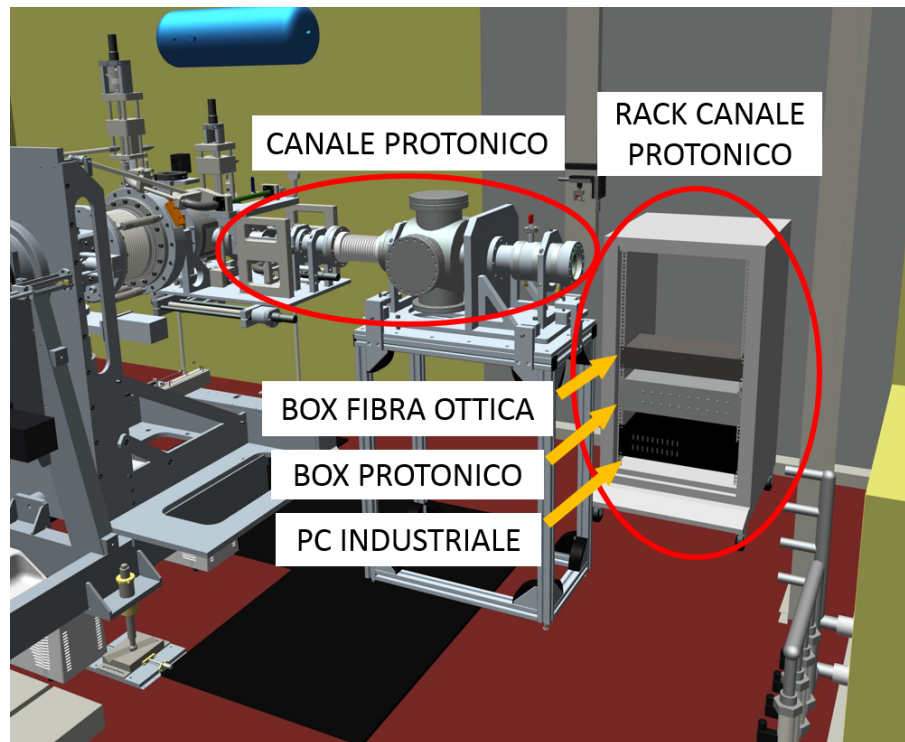


Fig. 6.8: Posizione del nuovo rack per il canale protonico all'interno del laboratorio off-line.

6.2 Progetto preliminare dei sistemi di controllo del dump di sicurezza della camera target

Si è valutata la progettazione preliminare del sistema di controllo del dump della camera target. In sostanza questo strumento permetterà di conoscere lo stato dei dischi in grafite del target rilevando un segnale in corrente. Nel caso in cui essi vengano danneggiati dal fascio protonico, si misurerebbe una corrente significativa.

Di seguito viene riportata la soluzione per noi ottimale, ovvero quella che ridurrebbe costi e spazio.

6.2.1 Possibile soluzione per il dump nella camera

In questo caso a noi non interessa avere una buona risoluzione dato che il sistema di controllo sarà usato come un interruttore per spegnere il generatore nel caso in cui la corrente di fascio protonico superi un threshold preimpostato di $0,5 \mu A$. Pertanto si è pensato di creare un circuito lungo il filo posizionato tra la scheda fc acquisition board ed il convertitore in fibra ottica. Questo perchè il convertitore già disponibile presso i laboratori (EKS IOL3000), è in grado di leggere tensioni comprese tra $0 \div 10 V$ e permette di acquisire un segnale con una differenza di potenziale di $500 V$ rispetto alla massa dello strumento. Dato che la scheda (fc acquisition board - v2) trasmette in uscita un segnale compreso tra $\pm 10 V$, si vuole condizionare la tensione misurata attraverso un circuito appositamente realizzato per tagliare le tensioni negative. E' utile allora considerare la conversione che viene effettuata dalla scheda di misura: la corrente misurata dalla scheda a $0 V$ è di $0,124 \mu A$. La corrente massima misurata in modo affidabile dal dispositivo logaritmico della scheda è di circa $0,6 mA$.

Schema box diagnostica per dump della camera target

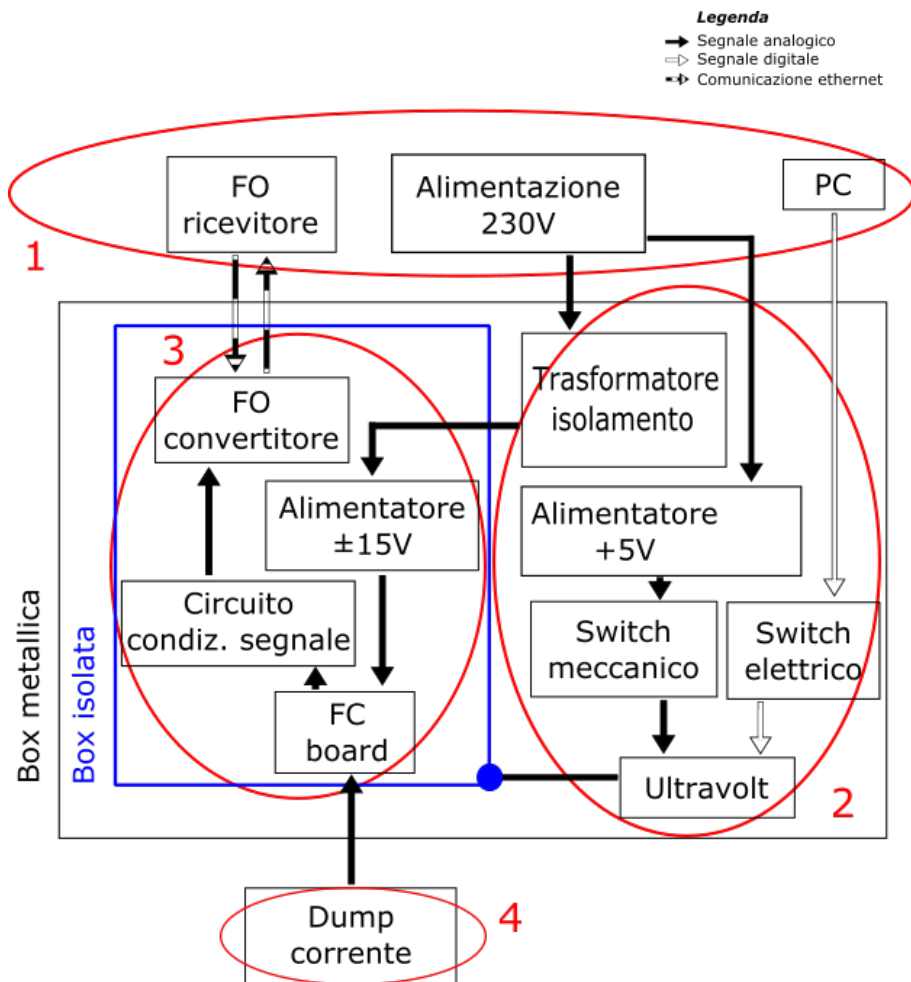


Fig. 6.9: Schema a blocchi della strumentazione di acquisizione del dump di corrente.

1. Parte esterna:

- FO ricevitore: ricezione del segnale in fibra ottica;

- Alimentazione 230 V: per alimentare i componenti interni del rack.
 - PC: per una disabilitazione software (tramite CSS) del componente ultravolt.
2. Parte interna alla scatola di metallo:
- Trasformatore di isolamento: per alimentare le componenti all'interno della scatola isolata.
 - Alimentatore +5 V: alimentazione del componente ultravolt.
 - Switch meccanico: utilizzato per verificare che la scatola metallica sia chiusa correttamente. In caso negativo il componente ultravolt non viene alimentato.
 - Switch elettrico: utilizzato come precauzione, si abilita tramite PC. In caso negativo il componente ultravolt non viene abilitato ad erogare tensione.
 - Ultravolt: Serve per creare una differenza di potenziale di +500 V tra la massa della scatola metallica e la massa della scatola isolata. Viene agganciato alla parte metallica della scatola isolata.
3. Parte interna, scatola isolata:
- Alimentazione ± 15 V: alimentazione della schede di acquisizione (fc acquisition board - v2).
 - FC board: (fc acquisition board - v2) utilizzate per l'acquisizione del segnale.
 - Circuito condizionamento segnale: consente il passaggio di un determinato range di tensione (0 – 10 V).
 - FO convertitore: trasmette il segnale analogico tramite la fibra ottica
4. Componente posizionato sulla camera:
- Dump corrente: Componente posizionato sulla camera per verificare la tenuta strutturale dei dischi in carburo di uranio all'interno del target. E' posizionato a una differenza di potenziale pari a +500 V.

Si è pensato di posizionare la strumentazione descritta all'interno del rack di alta tensione in quanto andrà in contatto con la camera target. Al momento questo progetto è ancora in fase di valutazione, in figura 6.10 si mostra la modellizzazione 3D della "current dump box" posizionata all'interno del rack di alta tensione.

6.3 Progetto preliminare per il miglioramento dell'emittance meter

L'emittance meter è lo strumento in grado di misurare l'emittanza del fascio ed è posizionato immediatamente dopo la seconda crociera. Tale macchinario è composto da una coppia di collimatori a fessura e una griglia di filamenti in tungsteno dorato, uno per la direzione orizzontale (x), l'altro per quella verticale (y), permettendo la misura dell'emittanza del fascio in tali direzioni. I diversi componenti sono mossi da due motori passo-passo che permettono la movimentazione nelle due direzioni (figura 6.11).

L'emittanza è una proprietà caratterizzanti un fascio come quello accelerato nel Front End. Misura la dimensione di un fascio nello spazio delle fasi con coordinate in posizione e quantità di moto. Se ad esempio, l'emittanza è bassa, il fascio sarà confinato in un piccolo spazio e le particelle avranno all'incirca la stessa direzione. Appare chiaro allora, che è preferibile un fascio con emittanza minore, così da migliorarne il trasporto.

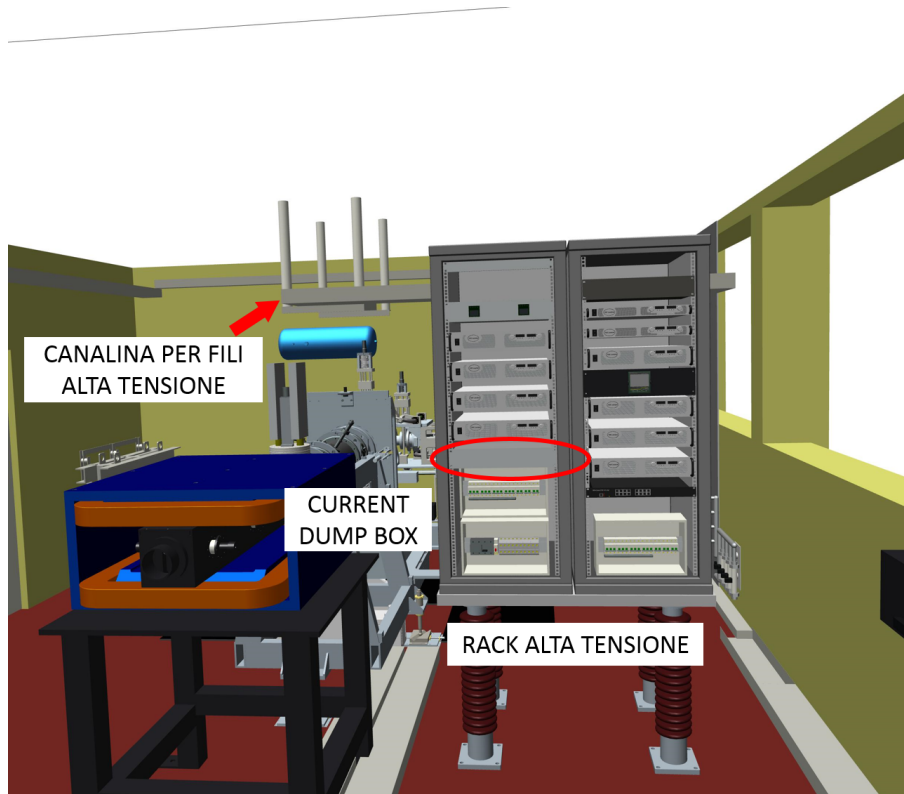


Fig. 6.10: Rappresentazione dell'installazione della box per misurare il dump di corrente della camera target all'interno del rack di alta tensione.

L'emittanza dipende dalla geometria dell'elettrodo estrattore, della sorgente, dalle condizioni del plasma, dalla particella ionizzata, dalle condizioni applicate alla sorgente (differenza di potenziale, temperatura, campo magnetico).

Il rivelatore (detector grid) permette di misurare la corrente che impatta sui fili della griglia in base alla posizione determinata dal sistema di movimentazione, determinando in questo modo l'inclinazione delle particelle che compongono il fascio.

In figura 6.12 viene rappresentato uno schema semplificato del metodo utilizzato per la misura dell'emittanza del fascio. I parametri mostrati vengono descritti nel seguito:

- x è la variabile di posizione acquisita tramite l'encoder posto sul motore passo-passo;
- $\Delta = 0.15 \text{ mm}$, è la fessura della piastra di ottone fissata al collimatore che viene attraversata dal fascio;
- L è la distanza presente tra collimatore e rivelatore; nella direzione verticale è pari a 294 mm , in quella orizzontale 288.5 mm ;
- $h = 0.5 \text{ mm}$ è la distanza tra due fili consecutivi;
- x' è l'angolo di inclinazione del fascio; si calcola tramite la formula 6.3.1, dove d rappresenta la distanza tra il centro del rivelatore ed il filo n-esimo su cui impatta il fascio.

$$x' = \text{atan} \left(\frac{d}{L} \right) \quad (6.3.1)$$

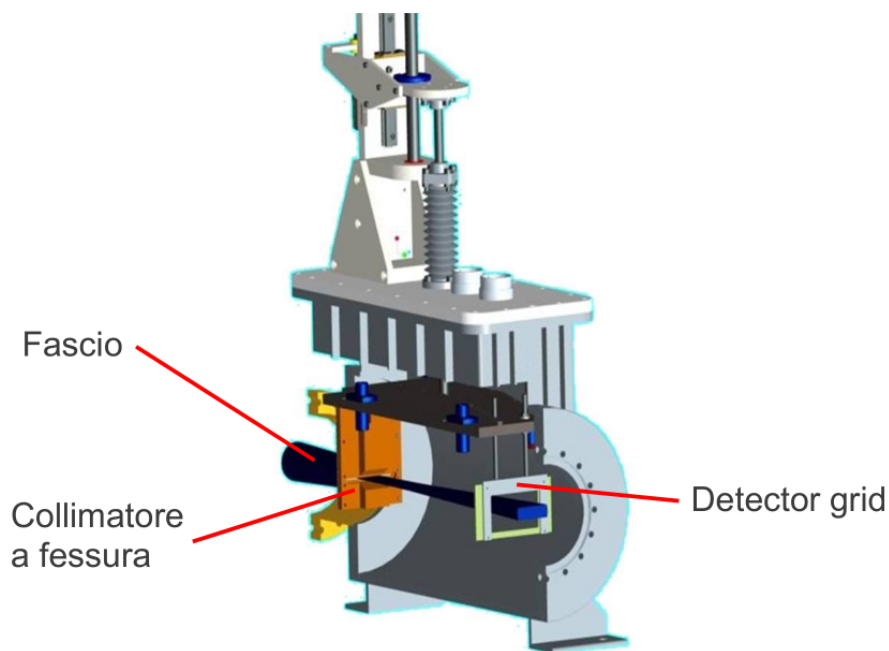


Fig. 6.11: Sezione dell'emittance meter utilizzato nel Front-End SPES offline; particolare del rivelatore per misurare l'emittanza verticale (asse y).

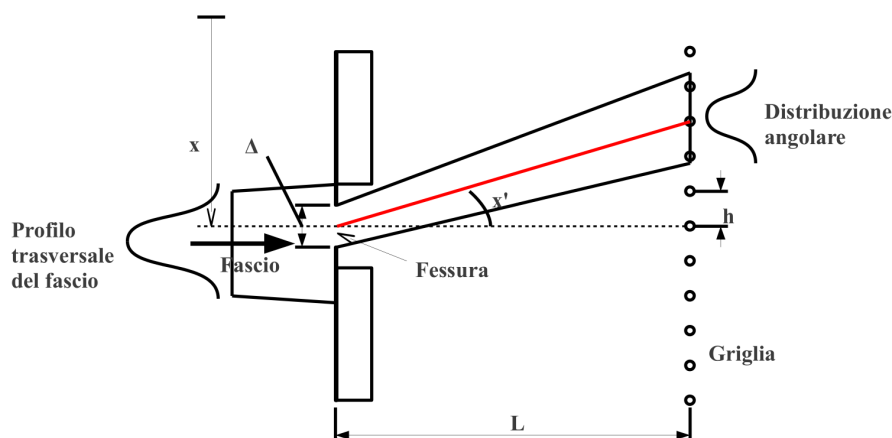


Fig. 6.12: Sistema di rilevazione dell'emittanza del fascio.

6.3.1 Soluzioni possibili per la disposizione dell'emittance meter

Le due soluzioni prese in considerazione per la nuova disposizione dell'emittance meter all'interno del laboratorio off-line del Front-End, vengono descritte in dettaglio nelle tabelle seguenti andando ad evidenziare benefici e criticità:

1. La prima soluzione richiede una riprogettazione della camera modificandone la lunghezza nella direzione del fascio mantenendo la geometria dei componenti interni e mantenendo invariata la movimentazione:

Pro	<ul style="list-style-type: none"> - Viene mantenuta la geometria della camera; - Non vengono modificate le strumentazioni di movimentazione e rilevazione (collimatore e rivelatore vengono movimentati solidalmente tramite un supporto);
Contro	<ul style="list-style-type: none"> - Lunghezza fissa della camera; - Lo spostamento del rivelatore richiede l'apertura della camera ed il riposizionamento dello strumento attraverso alcuni fori predisposti sul supporto; - Si richiede la costruzione di una nuova camera e di un nuovo supporto andando a scartare quelli già esistenti.

2. La seconda soluzione richiede l'affiancamento di una crociera, al cui interno vengono installati i collimatori, alla camera attualmente disponibile, al cui interno sono presenti solo i rivelatori.

Pro	<ul style="list-style-type: none"> - Crociere disponibili di grandezza standard; - Lunghezza variabile della distanza tra collimatore e rivelatore tramite un tubo con estremità flangiate; - Disponibilità di una camera col proprio sistema di movimentazione;
Contro	<ul style="list-style-type: none"> - Necessità di disporre di due motori che riescano a muoversi in modo sincrono; - Modificare due movimentazioni precedentemente utilizzate per la movimentazione di beam profiler e faraday cup per installare i due collimatori; - Necessità di acquistare del materiale anche costoso.

6.3.2 Soluzione proposta

La soluzione considerata più adeguata è la numero quattro. Si è svolta dunque una trattazione più approfondita per verificare sperimentalmente l'efficacia.

Per determinare la distanza tra collimatore e rivelatore è stato necessario calcolare l'ampiezza della finestra con la quale il rivelatore acquisisce il fascio. Essa è pari a:

$$F = L_0 \cdot \left[\tan \left(\frac{x_0}{1000} \right) - \tan \left(\frac{x_f}{1000} \right) \right] \quad [mm]$$

Dove per L_0 si intende la distanza rilevata nella configurazione attuale tra il collimatore e il rivelatore lungo il piano scelto, mentre per x_0 e x_f si intendono rispettivamente l'angolo espresso in $mrad$ creato dal fascio che va ad impattare sul rivelatore nell'estremo superiore ed in quello inferiore.

Si è allora calcolata distanza fra i due strumenti tramite l'equazione seguente, considerando l'angolo voluto pari a $x' = 30 [mrad]$.

$$L = \frac{F}{\tan \left(\frac{x'}{1000} \right) \cdot 2} \quad [mm]$$

La quale ha fornito come soluzione per la direzione orizzontale e verticale una distanza pari a $642.5 [mm]$.

Si è così realizzato il modello 3D della disposizione proposta riguardante l'emittance meter (figura 6.13). Essa è comprensiva della vecchia camera, al cui interno sono installati i rivelatori sul supporto movimentato dal motore passo-passo. La crociera con la movimentazione per i collimatori è invece la parte aggiuntiva, da realizzare per questa soluzione. Essa consta di due motori passo-passo, come quelli utilizzati per la movimentazione dei rivelatori, dotati di potenziometro in grado di misurare lo spostamento lungo

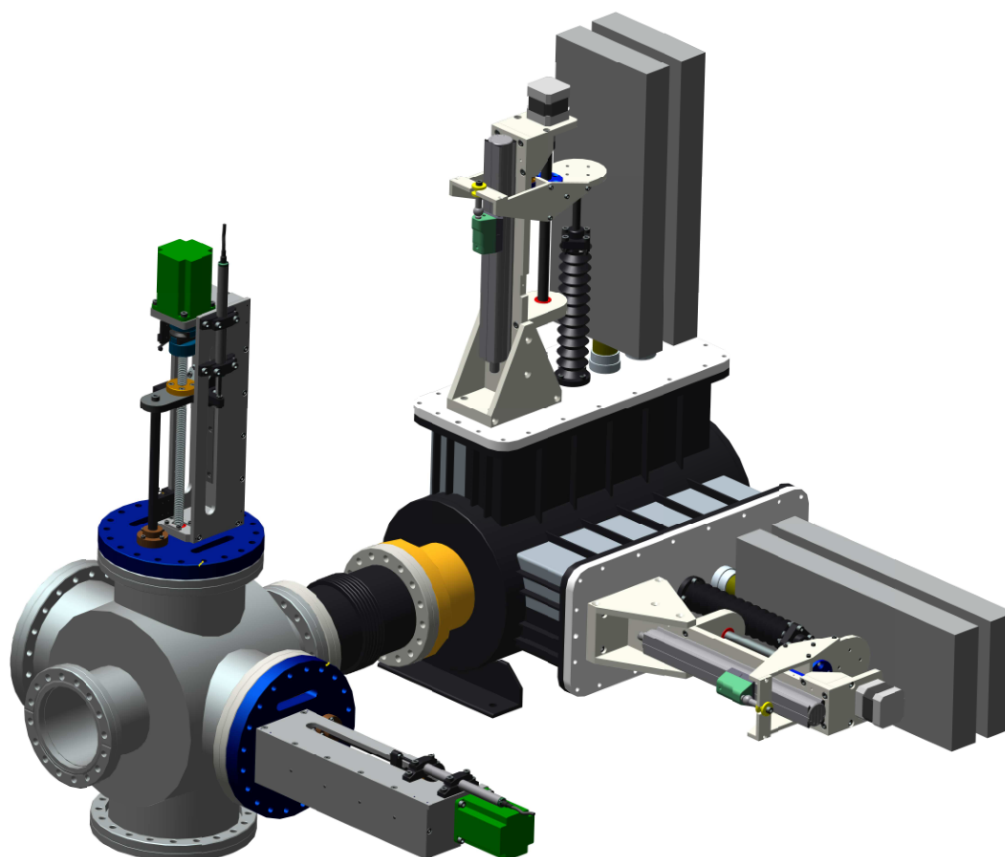


Fig. 6.13: Rappresentazione 3D della nuova configurazione dell'emittance meter

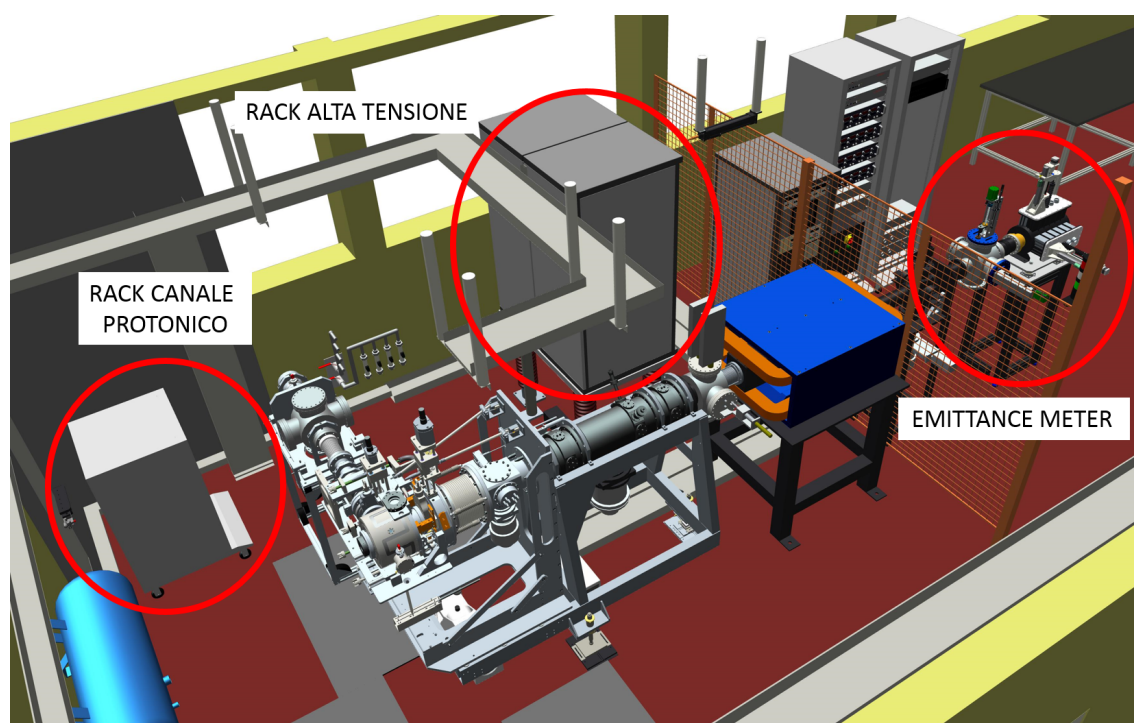


Fig. 6.14: Rappresentazione della planimetria del laboratorio front-end successivo alla proposta di aggiornamento.

l'asse di moto. Gli attuatori della crociera e della vecchia camera dovranno dunque essere sincronizzati attraverso una logica di controllo (master - slave) per permettere il corretto posizionamento di collimatore e rivelatore. Per la trasmissione del moto al collimatore si è preferito utilizzare un giunto da vuoto al cui interno scorre l'albero su cui è installato lo strumento. Questo permette di ridurre i costi riguardanti i soffietti dal prezzo indicativo di 1000 € cadauno.

6.4 Conclusioni

In questo capitolo sono stati presentati dei possibili sviluppi riguardanti il sistema di controllo del laboratorio off-line del progetto SPES, i quali porterebbero ad una modifica della planimetria che viene rappresentata in figura 6.14. In tale figura si evidenziano i componenti analizzati per un futuro upgrade: il rack del canale protonico, la box inserita nel rack di alta tensione e l'emittance meter.

Si sono presentati i componenti principali per la diagnostica del fascio che verrà installata nel canale protonico, analizzando diverse possibilità riguardanti la sistemazione e la composizione del rack.

Si è inoltre considerata l'introduzione di una box all'interno del rack di alta tensione che verrà utilizzata per la misura della corrente che impatta sul dump posizionato all'interno della camera target.

Infine è stato analizzato il problema per uno sviluppo dell'attuale emittance meter, vagliando diverse soluzioni e sviluppando la meccanica di quella più consona.

Conclusioni

Il progetto SPES è, al momento, uno dei più importanti dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e punta alla produzione di fasci RIB e radioisotopi per applicazioni in ambito nucleare e medico. Lo stabile è in fase di allestimento all'interno dei Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) in Italia. Questo particolare tipo di infrastruttura ha spinto i gruppi di ricerca dei Laboratori ad una sfida tecnologica su diversi fronti. In questa tesi sono state presentate alcune soluzioni utilizzate per il sistema di controllo riguardante il trasporto del fascio. Il progetto SPES viene descritto nel primo capitolo.

Il software EPICS è stato scelto come struttura generale per il sistema di controllo. La diagnostica del fascio prevede delle strumentazioni basate su IOC nativi in EPICS. Il Channel Access viene sfruttato come un tronco principale di comunicazione fra i diversi dispositivi, in cui sono impiegati i servizi essenziali come l'archiviazione dei dati, la registrazione e l'interfaccia operatore in grado di controllare i dispositivi da remoto.

Con l'arrivo del progetto ai LNL è stato necessario revisionare ed aggiornare molti sistemi di controllo precedentemente esistenti nei laboratori. Questa standardizzazione è il fattore chiave su cui si sta sviluppando il sistema di controllo, portando ad una personalizzazione degli IOC nativi in EPICS. L'argomento principale di questa tesi è stato quello di realizzare delle strumentazioni in grado di interfacciarsi a tali IOC. La nuova tipologia di elaboratori viene presentata nel secondo capitolo.

Il registratore nanodac, utilizzato per la lettura di termocoppie installate nella camera target, è stato configurato per la comunicazione in EPICS tramite il protocollo modbus. Questo ha permesso, tramite un'opportuna interfaccia operatore, di controllare la temperatura delle termocoppie posizionate sul target, sul dump di sicurezza e sull'O-Ring della camera attraverso un'interfaccia operatore opportunamente creata in grado comunicare con lo strumento attraverso la rete ethernet.

La realizzazione di un IOC personalizzato ha reso necessario il cambiamento delle schede di amplificazione dei segnali riguardanti il beam profiler e la faraday cup. Nel quarto capitolo viene presentata tale modifica, andando ad evidenziare gli integrati presenti nella scheda, gli aspetti salienti della progettazione e l'implementazione dell'IOC in EPICS.

Tramite la movimentazione pneumatica è stato possibile aggiungere all'interno del bunker, in cui i livelli di radiazioni sono tali da danneggiare in poco tempo gli apparati elettrici, diversi motori in grado di posizionare correttamente gli strumenti per la diagnostica del fascio. Nel quinto capitolo viene descritta la scheda elettronica in grado di interfacciare i solenoidi delle elettrovalvole all'IOC, si sono presentate le specifiche utilizzate per progettare tale scheda, i componenti utilizzati per realizzarla ed i test per verificare la precisione della movimentazione.

Gli sviluppi futuri considerati per il sistema di controllo nel laboratorio off-line del progetto SPES, descritti nel sesto capitolo, sono: l'aggiunta di un nuovo rack per il controllo della diagnostica del fascio protonico, l'inserimento di una box di diagnostica per il dump di corrente all'interno della camera target ed il miglioramento dello strumento emittance meter.

La standardizzazione di tutti i sistemi di controllo ai LNL porterà a diminuire considerevolmente i costi legati alla strumentazione e alla manutenzione degli stessi, non solamente durante il periodo di implementazione ma anche per tutta la vita del progetto, uniformando l'intero sistema.

Bibliografia

- [1] M. Manzolaro, *Analisi termica e strutturale del bersaglio diretto per la produzione di fasci radioattivi per il progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica A.A. 2006-2007, Università degli Studi di Padova.
- [2] G. Diavola, *Fasci di ioni radioattivi ai laboratori nazionali del sud dell'INFN: il progetto EXCYT*, Il Saggiatore, 1999.
- [3] F. Borgna, *Potenzialità della tecnologia Isotope Separation On-Line (ISOL) per la realizzazione di un radiofarmaco a base di ^{89}Sr e preliminare sviluppo tecnologico della forma farmaceutica*, Tesi di Laurea A.A. 2013-2014, Università degli Studi di Padova.
- [4] M. Lindroos, *Review of ISOL-type radioactive beam facilities*, EPAC, 2004.
- [5] <http://www.ganil.fr/euroisol/EURISOLlinks.html> [Ultimo accesso 04/08/2015]
- [6] A. Andrichetto et al., *The SPES Project At LNL*, AIP (American Institute of Physics), 2009.
- [7] G. Meneghetti, M. Manzolaro, A. Andrichetto, *Design of the SPES Target Heating System: theoretical analyses and comparison with experimental data*, TCN CAE, 2008.
- [8] M. Deicher, *Radioactive isotopes in solid state physics*, Vol. 33 No 3, Europhysics News, 2002.
- [9] M. Ballan, *Progettazione e test di componenti e sistemi per l'operazione e la sicurezza del sistema target-sorgete del progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica A.A. 2013-2014, Università degli Studi di Padova.
- [10] G. Boschello, *Progettazione e sviluppo del sistema di movimentazione dell'elettrodo di estrazione dell'acceleratore SPES*, Tesi di Laurea Specialistica A.A. 2014-2015, Università degli Studi di Padova.
- [11] J. Vasquez, *Study, Design, Development and Implementation of Distributed Control Systems using EPICS for the SPES Project*, Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Padova.
- [12] N. Conforto, *Studio del sistema di controllo di un rivelatore di ioni, realizzato in ambiente EPICS, per il progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica A.A. 2009-2010, Università degli Studi di Padova.
- [13] EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/> [Ultimo accesso 07/10/2015]
- [14] Nanodac, <http://www.eurotherm.it/products/controllers/nanodac/> [Ultimo accesso 04/07/2015]
- [15] M. Giacchini, A. Andrichetto, G. Bassato, L. Costa, R. Izsak, G. Prete and J. Vasquez, *The Control System of SPES Target: Current Status and Perspectives*, in ICALEPCS, Kobe (Japan), 2009.

- [16] M. Giacchini, A. Andrighetto, G. Bassato, N. Conforto, L. Costa, L. Giovannini, C. Scudellaro and J. Vasquez, *EPICS Applications in the Control of SPES Target Laboratory*, LNL Annual report, Legnaro (Italy), 2010.
- [17] ADLINK COM Express, <http://www.adlinktech.com/Computer-on-Module/Com-Express/index.php> [Ultimo accesso 04/08/2015]
- [18] ADLINK Express-IB COM Express, http://www.adlinktech.com/PD/web/PD_detail.php?cKind=&pid=1122&seq=&id=&sid=&source=&utm_source=&category=Computer-on-Modules_COM-Express-Type-6-Basic [Ultimo accesso 21/09/2015]
- [19] Adlink Computer-on-Module, <http://www.adlinktech.com/Computer-on-Module> [Ultimo accesso 21/09/2015]
- [20] M. Rivers, *asynDriver: Asynchronous Driver Support* <http://www.aps.anl.gov/epics/modules/soft/asyn/> [Ultimo accesso 21/09/2015]
- [21] Wikipedia, <https://it.wikipedia.org> [Ultimo accesso 12/10/2015]
- [22] B. Wolf, *Handbook of Ion Sources*, CRC Press, 1995.
- [23] E. Boratto, *Progettazione ed ingegnerizzazione del front-end protonico del progetto SPES*, Tesi di Laurea A.A. 2014-2015, Università degli Studi di Padova.
- [24] J. Vasquez, M. Poggi and D. Carlucci, *Beam Diagnostics for the SPES Project*, LNL Annual Report, Legnaro, Italy, 2013.
- [25] A. Mozzi, *Sviluppo di sistemi di movimentazione e rimozione del bersaglio di produzione dell'acceleratore SPES*, Tesi di Laurea Specialistica A.A. 20013-2014, Università degli Studi di Padova.

Specifiche tecniche delle schede Adlink

[17] [18] [19]

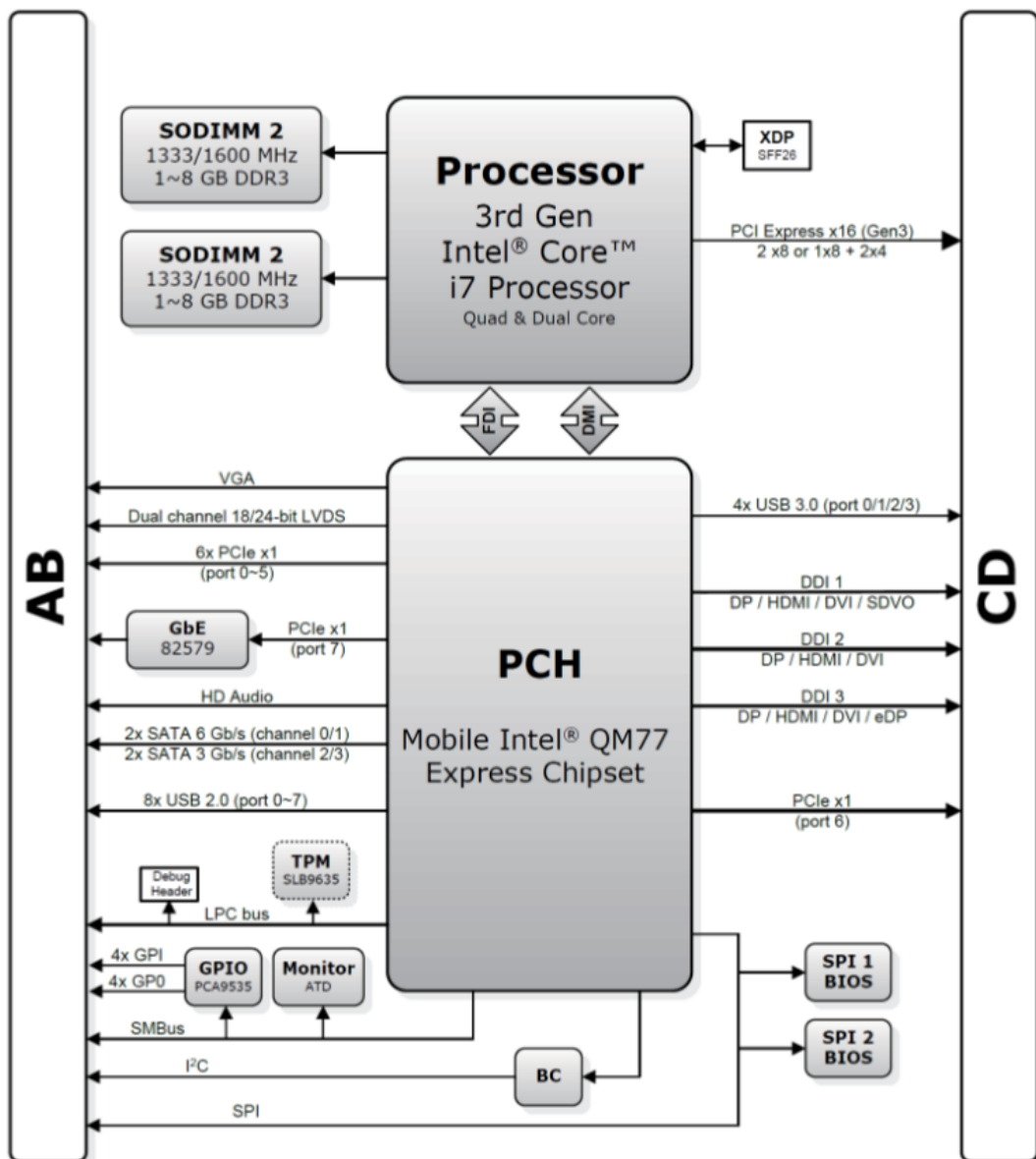
A.1 COM Express-IB-i3-3120ME

Core System	
CPU	3rd Generation Intel [®] Core [™] i7/i5/i3, 22nm process, BGA type Intel [®] Core [™] i3-3120ME 2.4GHz, 3MB L3 cache, 35W (2C)
Memory	Dual channel 1333/1600 MHz DDR3 non-ECC memory up to 16GB in dual stacked SODIMM socket
Chipset	Mobile Intel [®] QM77 Express Chipset
L3 Cache	6MB (i7-3615QE and i7-3612QE), 4MB (i7-3555LE and i7-3517UE), 3MB (i5-3610ME, i3-3120ME and i3-3217UE)
Hardware Monitor	Supply voltages and CPU temperature
Debug Interface	XDP SFF-26 extension for ICE debug
Watchdog Timer	Programmable timer range to generate RESET
Expansion Busses	PCI Express x16 (Gen3) bus for discrete graphics solution or general purpose PCI Express (2 x8 or 1 x8 with 2 x4) 8 PCI Express x1: Lanes 0/1/2/3/4/5/6 are free, lane 7 is occupied by GbE LPC bus, SMBus (system) , I2 C (user)
Video	
Integrated in Processor	Intel [®] HD Graphics 4000 at 6501200 MHz (depending on processor)
Integrated Video	DirectX 11, OpenGL 3.1, OpenCL 1.1
Feature Support	Intel [®] Clear Video HD Technology Advanced Scheduler 2.0, 1.0, XPDM support DirectX Video Acceleration (DXVA) support for full AVC/VC1/MPEG2 hardware decode
VGA Interface	Analog VGA support with 300 MHz DAC Analog monitor support up to QXGA (2048 x 1536) and VGA hot plug

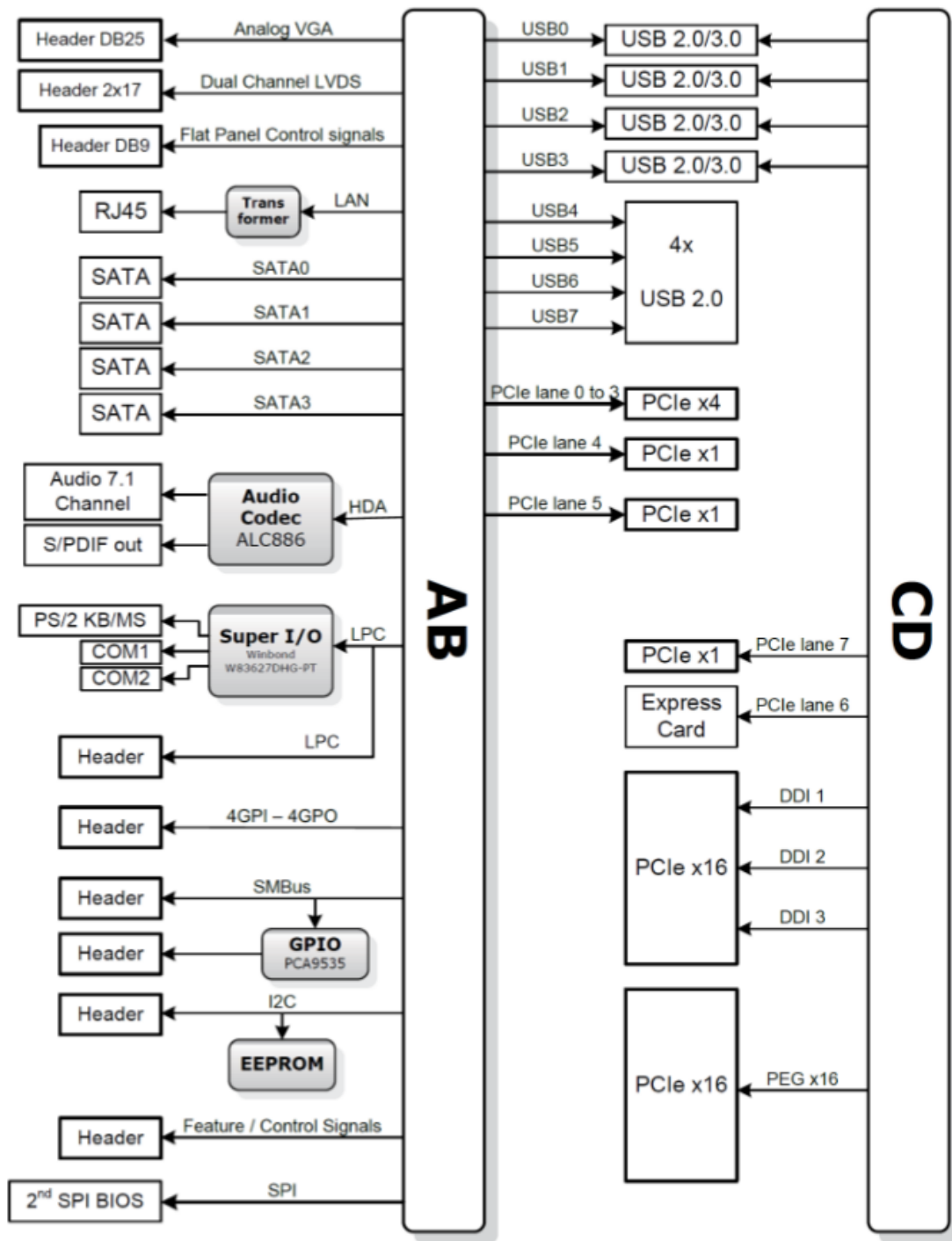
LVDS Interface	Dual channel 18/24-bit LVDS
Digital Display Interface	Three DDI ports supporting HDMI/DVI/DisplayPort or SDVO
Audio	
Chipset	Integrated in Mobile Intel [®] QM77 PCH
Audio Codec	On Express-BASE6 carrier (ALC886)
Ethernet	
Chipset	Intel [®] Gigabit Ethernet PHY WG82579LM
Interface	10/100/1000 Mbps Ethernet
I/O Interfaces	
Chipset	Integrated in Mobile Intel [®] QM77 PCH
USB	4 ports USB 3.0 (USB03) and 4 ports USB 2.0 (USB47)
SATA	Supports two SATA ports at 6 Gb/s and two ports at 3 Gb/s with support for RAID 0,1,5,10
Super I/O	
	Connected to LPC bus on carrier if needed
Power	
Input Power	8.5~20V only (AT), 8.5~20V and 5Vsb (ATX)
Power States	Supports S0, S1, S3, S4, S5
Smart Battery Support	Yes
Power Consumption	40W with i7-3612QE and 4GB memory typical
Mechanical and Environmental	
Form Factor	PICMG COM.0: Rev 2.1 Type 6
Dimension Basic	size: 125 mm x 95 mm
Operating Temperature	Standard: 0°C to +60°C
Storage Temperature	-20°C to +80°C
Humidity	90% at +60°C
Shock	15G peak-to-peak, 11ms duration, non-operating
Vibration	Non-operating: 1.88Grms, 5-500Hz, each axis
	Operating: 0.5Grms, 5-500Hz, each axis

Compatibility	COM Express Type 6, Basic form factor 125mm x 95mm
Certification	CE, FCC, HALT

Functional Diagram



Functional Diagram



A.2 DAQe-2214

Analog Input	
Resolution	16 bits, no missing codes
Number of channels	16 single-ended or 8 differential (software selectable per channel)
Channel gain queue size	512
Maximum update rate	250 <i>kS/s</i>
Programmable gain	1, 2, 4, 8
Bipolar input ranges	$\pm 10V, \pm 5V, \pm 2.5V, \pm 1.25V$
Unipolar input ranges	0-10 V, 0-5 V, 0-2.5 V, 0-1.25 V
Offset error	$\pm 1mV$
Gain error	$\pm 0.06\%$ of FSR
Input coupling	DC
Overvoltage protection	Power on: Continuous $\pm 30V$, Power off: Continuous $\pm 15V$
Input impedance	1G Ω /100pF
CMRR (gain = 1)	83 dB
Settling time	4 μs to 0.01% error
-3 dB small signal bandwidth	600 kHz (Bipolar $\pm 10V$ Gain=1)
Trigger sources	Software, external digital/analog trigger, SSI bus
Trigger modes	Pre-trigger, post-trigger, middle-trigger, delay-trigger, and repeated trigger
FIFO buffer size	1 k samples
Data transfers	Polling, scatter-gather DMA
Analog Output	
Number of channels	2 voltage outputs
Resolution	12 bits
Output ranges	0 – 10V, $\pm 10V, 0 - AOEXTREF, \pm AOEXTREF$

Maximum update rate	$1\mu s$
Slew rate	$20V/\mu s$
Settling time	$3\mu s$ to ± 0.5 LSB accuracy
Offset error	$\pm 2mV$
Gain error	$\pm 0.04\%$ of max. output
Driving capacity	$\pm 5mA$
Stability	Any passive load, up to 1500 pF
Trigger sources	Software, external digital/analog trigger, SSI bus
Trigger modes	Post-trigger, delay-trigger, and repeated trigger
FIFO buffer size	1 k samples
Data transfers	Programmed I/O, scatter-gather DMA
Digital I/O	
Number of channels	24-CH 8255 programmable input/output
Compatibility	5 V/TTL
Data transfers	Programmed I/O
General-Purpose Timer/Counter	
Number of channels	2
Compatibility	16 bits
Data transfers	5 V/TTL
Number of channels	40 MHz, external clock up to 10 MHz
Auto Calibration	
Onboard reference	+5V
Temperature drift	$\pm 2 ppm/^\circ C$
Stability	$\pm 6 ppm/1000Hrs$
General Specifications	
Dimensions	175 mm x 107 mm (not including connectors) (DAQ-2213/2214) 168 mm x 107 mm (not including connectors) (DAQe-2213/2214)
Connector	68-pin VHDCI female x 2
Operating temperature	0 to $55^\circ C$
Storage temperature	-20 to $70^\circ C$
Humidity	5 to 95%, non-condensing
Power requirements	+5V 1.2A typical

A.3 PCIe-6216

Voltage Output	
Number of channels	16
Resolution	16 Bit
Monotonicity	15 Bit typical
Output ranges	$\pm 10V$
Slew rate	$26V/\mu s$ typical
Settling time	$130\mu s$ typical (20 V step)
Gain Error	$\pm 0.2\%$ maximum
DNL	± 1 LSB typical
Output driving capacity	$\pm 5mA$ maximum
Output initial status	0 V
Data transfer	programmed I/O
Digital I/O	
Number of channels	4 inputs and 4 outputs
Compatibility	5 V/TTL
Data transfers	programmed I/O
General Specifications	
I/O connector	One 37-pin D-sub female
Operating temperature	$0^{\circ}C$ to $50^{\circ}C$ ($32^{\circ}F$ to $122^{\circ}F$)
Storage temperature	$-20^{\circ}C$ to $80^{\circ}C$ ($-4^{\circ}F$ to $176^{\circ}F$)
Relative humidity	5% to 95%, non-condensing
Power requirements	+5V (1.2 A typical) +12V (280 mA typical)

Installazione del software EPICS

B.1 Installazione EPICS base

1. Scaricare il file sorgente. In questo esempio si è utilizzato il `base-3.14.12.4.tar.gz`¹

2. Passare a ROOT

```
sudo su
```

3. In questo esempio è necessario creare la cartella che conterrà il file base

```
/usr/local/epics
```

4. copiare ed estrarre il file dentro la cartella epics

```
cp base-3.14.12.4.tar.gz usr/local/epics
```

5. Scompattare

```
tar zxvf base-3.14.12.4.tar.gz
```

6. Andare nella cartella **base-3.14.12.4**

7. Controllare l'architettura del sistema eseguendo

```
./startup/EpicsHostArch
```

In questo esempio è trattata la versione **linux-x86_64**

8. Creare la variabile d'ambiente **EPICS_HOST_ARCH** con l'architettura del sistema operativo utilizzato. In questo esempio è stato messo

```
export EPICS_HOST_ARCH="linux-x86_64"
```

all'interno del file

```
/etc/profile
```

successivamente eseguirlo

```
source /etc/profile
```

9. E' necessario installare *g++* e *libreadline-dev* prima della compilazione

```
apt-get install g++ libreadline-dev
```

10. Compilare eseguendo il comando

```
make clean uninstall
```

e

```
make
```

11. Aggiungere la cartella dove è stato installato epics. In questo caso si è aggiunto

```
PATH=$PATH:/usr/local/epics/base-3.14.12.4/bin/linux-x86_64
```

¹Il software è scaricabile dall'indirizzo: <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-15/2.php>

all'interno del file

```
[ /etc/profile ]
successivamente eseguirlo
```

```
[ source /etc/profile ]
```

12. E' stata creata la variabile d'ambiente **EPICS_CA_AUTO_ADDR_LIST** con valore **Yes**. In questo esempio si è usato

```
[ export EPICS_CA_AUTO_ADDR_LIST=Yes ]
```

all'interno del file

```
[ /etc/profile ]
successivamente eseguirlo
```

```
[ source /etc/profile ]
```

Il materiale utilizzato è visionabile dal sito:
http://pc1754/mediawiki/index.php/Base_install

B.2 Installazione del Sequencer

1. Scaricare il file sorgente. In questo esempio si è utilizzata la versione seq-2.1.16²

2. Passare a ROOT

```
[ sudo su ]
```

3. Se non presente è necessario creare la cartella

```
[ /usr/local/epics/support ]
```

4. copiare ed estrarre il file dentro la nuova cartella

```
[ cp seq-2.1.16.tar.gz usr/local/epics/support ]
```

5. Scompattare

```
[ tar zxvf seq-2.1.16.tar.gz ]
```

6. Andare nella cartella **seq-2.1.16**

7. Modificare il file

```
[ configure/RELEASE ]
```

e correggerlo inserendo

```
[ EPICS_BASE=/usr/local/epics/base-3.14.12.4 ]
```

8. Prima della compilazione è necessario installare **re2c**

```
[ apt-get install re2c ]
```

9. Compilare eseguendo il comando

```
[ make clean uninstall ]
```

²Il software è scaricabile dall'indirizzo:
<http://www-csr.bessy.de/control/SoftDist/sequencer/Installation.html#download>

e

```
[ make ]
```

Il materiale utilizzato è visionabile dal sito:
http://pc1754/mediawiki/index.php/Seq_install

B.3 Installazione Asyn driver

1. Scaricare il file sorgente. In questo esempio si è utilizzato il `asyn4-22.tar.gz`³

2. Passare a ROOT

```
[ sudo su ]
```

3. Se non presente è necessario creare la cartella

```
[ /usr/local/epics/support ]
```

4. copiare ed estrarre il file dentro la nuova cartella

```
[ cp asyn4-22.tar.gz usr/local/epics/support ]
```

5. Scompattare

```
[ tar zxvf asyn4-22.tar.gz ]
```

6. Andare nella cartella **asyn4-22**

7. Modificare il file

```
[ configure/RELEASE ]
```

e correggerlo inserendo

```
[ EPICS_BASE=/usr/local/epics/base-3.14.12.4 ]
```

```
[ SUPPORT=/usr/local/epics/support ]
```

```
[ SNCSEQ=$(SUPPORT)/seq-2.1.16 ]
```

commentare la riga di codice **IPAC**

8. Compilare eseguendo il comando

```
[ make clean uninstall ]
```

e

```
[ make ]
```

Il materiale utilizzato è visionabile dal sito:
http://pc1754/mediawiki/index.php/Asyn_install

B.4 Installazione protocollo Modbus

Per riuscire a comunicare con il dispositivo “nanodac” è essenziale installare sull’IOC il protocollo di comunicazione adeguato. Per questo si è scelto di utilizzare il software prodotto dall’*University of Chicago* il cui proprietario è Mark Rivers. La versione utilizzata è la `modbusR2-7` e per installare correttamente il software è necessario seguire i passaggi descritti in seguito:

³Il software è scaricabile dall’indirizzo: <http://www.aps.anl.gov/epics/modules/soft/asyn/>

1. Scaricare il file `modbusR2-7.tar.gz`⁴

2. Passare a ROOT

```
sudo su
```

3. In questo esempio è necessario creare la cartella che conterrà tutte le applicazioni che utilizzano il protocollo modbus

```
.../epics/support/modbusR2-7
```

4. copiare ed estrarre il file dentro la cartella `modbusR2-7`

```
cp modbusR2-7.tar.gz .../epics/support/modbusR2-7
```

5. Scompattare

```
tar zxvf modbusR2-7.tar.gz
```

6. Andare nella cartella

```
modbusR2-7
```

7. Modificare il file

```
configure/RELEASE
```

8. e correggerlo con

```
SUPPORT=.../epics/support
```

```
ASYN=$(SUPPORT)/asyn4-22
```

```
EPICS_BASE=.../epics/base-3.15.1
```

9. Compilare eseguendo

```
make clean uninstall
```

e

```
make
```

B.5 Installazione *sysv-rc-softioc*

1. Installare **procServ**

```
sudo apt-get install procserv
```

2. Installare **telnet**

```
sudo apt-get install telnet
```

3. Scaricare l'ultima versione del pacchetto DEB. Nel nostro caso è stata usata la versione 1.9⁵.

```
sudo dpkg -i sysv-rc-softioc_1.9_all.deb
```

4. È stata creata una cartella contenente tutte le applicazioni dei diversi IOC. Nel nostro caso sono stati messi in

```
/home/epics/epics/iocs/
```

⁴Il software è scaricabile dall'indirizzo: <http://cars.uchicago.edu/software/epics/modbus.html>

⁵Il software è scaricabile dall'indirizzo: <http://epics.nsls2.bnl.gov/debian/pool/main/s/sysv-rc-softioc/>

All'interno di questa cartella sono state create tutte le directory delle applicazioni degli IOC.

5. Modificare il file

```
[ /etc/default/epics-sofioc ]
```

scrivendo il percorso principale

```
[ SOFTBASE=/home/epics/epics/iocs ]
```

Il materiale utilizzato è visionabile dal sito:
http://pc1754/mediawiki/index.php/Create_SofIOC

Source Code dell'IOC per lo strumento “nanodac”

In questo appendice vengono inseriti i codice sorgente usati per configurare l'IOC dello strumento “nanodac”.

C.1 configure/RELEASE

```
# RELEASE - Location of external support modules
#
# IF YOU MAKE ANY CHANGES to this file you must subsequently
# do a "gnumake rebuild" in this application's top level
# directory.
#
# The build process does not check dependencies against files
# that are outside this application, thus you should do a
# "gnumake rebuild" in the top level directory after EPICS_BASE
# or any other external module pointed to below is rebuilt.
#
# Host- or target-specific settings can be given in files named
# RELEASE.$(EPICS_HOST_ARCH).Common
# RELEASE.Common.$(T_A)
# RELEASE.$(EPICS_HOST_ARCH).$(T_A)
#
# This file should ONLY define paths to other support modules,
# or include statements that pull in similar RELEASE files.
# Build settings that are NOT module paths should appear in a
# CONFIG_SITE file.

TEMPLATE_TOP=$(EPICS_BASE)/templates/makeBaseApp/top

# If using the sequencer, point SNCSEQ at its top directory:
#SNCSEQ=$(EPICS_BASE)/../modules/soft/seq
SNCSEQ=/usr/local/epics/support/seq-2.1.16

# EPICS_BASE usually appears last so other apps can override stuff:
EPICS_BASE=/usr/local/epics/base-3.14.12.4

# Set RULES here if you want to take build rules from somewhere
# other than EPICS_BASE:
#RULES=/path/to/epics/support/module/rules/x-y

ASYN=/usr/local/epics/support/asyn4-22
MODBUS=/usr/local/epics/support/modbusR2-7
```

C.2 iocBoot/iocTaIoni_Tmcp/st.cmd

```

#!../bin/linux-x86/TaIoni_Tmcp

## You may have to change TaIoni_Tmcp to something else
## everywhere it appears in this file

< envPaths

cd ${TOP}

## Register all support components
dbLoadDatabase "dbd/TaIoni_Tmcp.dbd"
TaIoni_Tmcp_registerRecordDeviceDriver pdbname

### + Added by Nicola Sattin 2016-05-19 ###
### set AsynPort ###
drvAsynIPPortConfigure("Euro","10.5.0.171:502",0,0,1)

modbusInterposeConfig("Euro",0,1000)

### set read port ###
#read temp
drvModbusAsynConfigure("EuroRd250","Euro",255,3,250,32,5,1000,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroRd260","Euro",255,3,260,32,5,1000,"nanodac")
#read sensor status and offset
drvModbusAsynConfigure("EuroRd6160","Euro",255,3,6160,32,5,1000,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroRd6280","Euro",255,3,6280,32,5,1000,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroRd6410","Euro",255,3,6410,32,5,1000,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroRd6540","Euro",255,3,6540,32,5,1000,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroRd6290","Euro",255,3,6290,32,5,1000,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroRd6420","Euro",255,3,6420,32,5,1000,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroRd6550","Euro",255,3,6550,32,5,1000,"nanodac")

### set write port ###
#write sensor offset
drvModbusAsynConfigure("EuroWr6167","Euro",255,6,6167,32,5,0,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroWr6290","Euro",255,6,6290,32,5,0,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroWr6420","Euro",255,6,6420,32,5,0,"nanodac")
drvModbusAsynConfigure("EuroWr6550","Euro",255,6,6550,32,5,0,"nanodac")
#write sensor type
drvModbusAsynConfigure("EuroWr6150","Euro",255,6,6150,8,4,0,"nanodac")
#drvModbusAsynConfigure("EuroWr6270","Euro",255,6,6270,8,4,0,"nanodac")
#drvModbusAsynConfigure("EuroWr6400","Euro",255,6,6400,8,4,0,"nanodac")
#drvModbusAsynConfigure("EuroWr6530","Euro",255,6,6530,8,4,0,"nanodac")

### - Added by Nicola Sattin 2016-05-19 ###

## Load record instances
#dbLoadRecords("db/xxx.db","user=epicsHost")
dbLoadTemplate("db/eurotherm.substitutions","user=epics")

cd ${TOP}/iocBoot/${IOC}
iocInit

## Start any sequence programs
#seq sncxxx,"user=epicsHost"

```

C.3 TaIoni_TmcpApp/src/Makefile

TOP=../..


```

include $(TOP)/configure/CONFIG
#-----
#  ADD MACRO DEFINITIONS AFTER THIS LINE
#=====

#=====
# Build the IOC application

PROD_IOC = TaIoni_Tmcp
# TaIoni_Tmcp.dbd will be created and installed
DBD += TaIoni_Tmcp.dbd

# TaIoni_Tmcp.dbd will be made up from these files:
TaIoni_Tmcp_DBD += Include.dbd

# Include dbd files from all support applications:
#TaIoni_Tmcp_DBD += xxx.dbd

# Add all the support libraries needed by this IOC
#TaIoni_Tmcp_LIBS += xxx
TaIoni_Tmcp_LIBS += asyn
TaIoni_Tmcp_LIBS += modbus

# TaIoni_Tmcp_registerRecordDeviceDriver.cpp derives from TaIoni_Tmcp.dbd
TaIoni_Tmcp_SRCS += TaIoni_Tmcp_registerRecordDeviceDriver.cpp

# Build the main IOC entry point on workstation OSs.
TaIoni_Tmcp_SRCS_DEFAULT += TaIoni_TmcpMain.cpp
TaIoni_Tmcp_SRCS_vxWorks += -nil-

# Add support from base/src/vxWorks if needed
#TaIoni_Tmcp_OBJS_vxWorks += $(EPICS_BASE_BIN)/vxComLibrary

# Finally link to the EPICS Base libraries
TaIoni_Tmcp_LIBS += $(EPICS_BASE_IOC_LIBS)

#=====

include $(TOP)/configure/RULES
#-----
#  ADD RULES AFTER THIS LINE

```

C.4 TaIoni_TmcpApp/src/include.dbd

```

include "base.dbd"
include "asyn.dbd"
include "drvAsynIPPort.dbd"
include "modbusSupport.dbd"

```

C.5 TaIoni_TmcpApp/Db/read_nanodac.db

```
#! Generated by VisualDCT v2.6
#! DBDSTART
#! DBDEND

### Nicola Sattin 19/05/2016 ###
### detected broken sensor ###
record(ai, "$(CH)Tmcp01_SensRd") {
    field(DESC, "read first diagnostic sensor")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6160),1,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp02_SensRd") {
    field(DESC, "read second diagnostic sensor")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6280),9,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp03_SensRd") {
    field(DESC, "read third diagnostic sensor")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6410),7,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp04_SensRd") {
    field(DESC, "read fourth diagnostic sensor")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6540),5,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

### read offset from analog input ###
record(ai, "$(CH)Tmcp01-OffsRd") {
    field(DESC, "read first analog input offset from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6160),7,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp02-OffsRd") {
    field(DESC, "read second analog input offset from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6290),5,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp03-OffsRd") {
    field(DESC, "read third analog input offset from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6420),3,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp04-OffsRd") {
    field(DESC, "read fourth analog input offset from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P6550),1,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}
```

```
### divide raw offset by thousand ###
record(calc, "$(CH)Tmcp01_OffsRd") {
    field(DESC, "divide by thousand from first offset")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp01-OffsRd")
    field(CALC, "A/1000")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "3")
}

record(calc, "$(CH)Tmcp02_OffsRd") {
    field(DESC, "divide by thousand from second offset")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp02-OffsRd")
    field(CALC, "A/1000")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "3")
}

record(calc, "$(CH)Tmcp03_OffsRd") {
    field(DESC, "divide by thousand from third offset")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp03-OffsRd")
    field(CALC, "A/1000")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "3")
}

record(calc, "$(CH)Tmcp04_OffsRd") {
    field(DESC, "divide by thousand from fourth offset")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp04-OffsRd")
    field(CALC, "A/1000")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "3")
}

record(calc, "$(CH)Tmcp04_TempRd") {
    field(DESC, "divide by ten from fourth analog input")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp04-TempRd.VAL")
    field(CALC, "A/10")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "1")
}

record(calc, "$(CH)Tmcp03_TempRd") {
    field(DESC, "divide by ten from third analog input")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp03-TempRd.VAL")
    field(CALC, "A/10")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "1")
}

record(calc, "$(CH)Tmcp02_TempRd") {
    field(DESC, "divide by ten from second analog input")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp02-TempRd.VAL")
    field(CALC, "A/10")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "1")
}
```

```

### divide raw temperature by ten ###
record(calc, "$(CH)Tmcp01-TempRd") {
    field(DESC, "divide by ten from first analog input")
    field(INPA, "$(CH)Tmcp01-TempRd.VAL")
    field(CALC, "A/10")
    field(SCAN, "1 second")
    field(EGU, "C")
    field(PREC, "1")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp04-TempRd") {
    field(DESC, "read second analog input from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P260),8,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp03-TempRd") {
    field(DESC, "read third analog input from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P260),4,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

record(ai, "$(CH)Tmcp02-TempRd") {
    field(DESC, "read second analog input from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P260),0,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

#### read temperature from device nanodac ####
record(ai, "$(CH)Tmcp01-TempRd") {
    field(DESC, "read first analog input from device")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(INP, "@asynMask$(P250),6,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "1 second")
}

```

C.6 TaIoni_TmcpApp/Db/configure_nanodac.db

```

#! Generated by VisualDCT v2.6
#! DBDSTART
#! DBDEND

### Nicola Sattin 19/05/2016 ###
### set offset from analog input ###
record(ao, "$(CH)Tmcp01_OffsSt") {
    field(DESC, "set offset for input one")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6167),0,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "Passive")
}

record(ao, "$(CH)Tmcp02_OffsSt") {
    field(DESC, "set offset for input two")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6290),5,-16)MODBUS_DATA")
}

```

```

    field(SCAN, "Passive")
}

record(ao, "$(CH)Tmcp03_OffsSt") {
    field(DESC, "set offset for input tree")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6420),3,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "Passive")
}

record(ao, "$(CH)Tmcp04_OffsSt") {
    field(DESC, "set offset for input fourth")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6550),1,-16)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "Passive")
}

### set thermocouple tipe ###
record(ao, "$(CH)Tmcp01_TypeSt") {
    field(DESC, "set thermoc type for input three")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6150),0,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "Passive")
}

record(ao, "$(CH)Tmcp02_TypeSt") {
    field(DESC, "set thermoc type for input two")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6150),0,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "Passive")
}

record(ao, "$(CH)Tmcp03_TypeSt") {
    field(DESC, "set thermoc type for input one")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6150),0,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "Passive")
}

record(ao, "$(CH)Tmcp04_TypeSt") {
    field(DESC, "set thermoc type fot input four")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asynMask$(P6150),0,8)MODBUS_DATA")
    field(SCAN, "Passive")
}

```

C.7 TaIoni_TmcpApp/Db/eurotherm.substitution

```
### Nicola Sattin 19/05/2016 ###
```

```

file db/read_nanodac.db
{
pattern
{P250,P260,P6160,P6280,P6410,P6540,P6290,P6420,P6550,CH}
{"EuroRd250","EuroRd260","EuroRd6160","EuroRd6280","EuroRd6410","EuroRd6540","EuroRd6290",
"EuroRd6420","EuroRd6550","TaIoni_"}
}

```

```
file db/configure_nanodac.db
{
pattern
{P6167,P6290,P6420,P6550,P6150,CH}
{"EuroWr6167","EuroWr6290","EuroWr6420","EuroWr6550","EuroWr6150","TaIoni_"}
}
```

C.8 TaIoni_TmcpApp/Db/Makefile

```
TOP=../..
include $(TOP)/configure/CONFIG
#-----
# ADD MACRO DEFINITIONS AFTER THIS LINE

#-----
# Optimization of db files using dbst (DEFAULT: NO)
#DB_OPT = YES

#-----
# Create and install (or just install) into <top>/db
# databases, templates, substitutions like this
#DB += xxx.db
DB += configure_nanodac.db
DB += read_nanodac.db
DB += eurotherm.substitutions

#-----
# If <anyname>.db template is not named <anyname>*.template add
# <anyname>_template = <templatename>

include $(TOP)/configure/RULES
#-----
# ADD RULES AFTER THIS LINE
```

C.9 config

```
# softIoc name and port must be unique on the
# server where it runs. It is required that
# the name be unique.
#
# The port is the one used by procServ for its
# telnet server.
#
NAME=TaIoni_Tmcp
PORT=7106

# User name to run the IOC
# This must be created manually for each
# softioc instance
#
# Defaults to $NAME
```

```
#
USER=epics

# Name of the server on which this softIoc
# will run. This is used for error checking
# to prevent the instance from being run on
# the wrong server.
#
# If not set then the check is disabled
#
#HOST=myserver.domain.com
HOST=taioni_tmcp

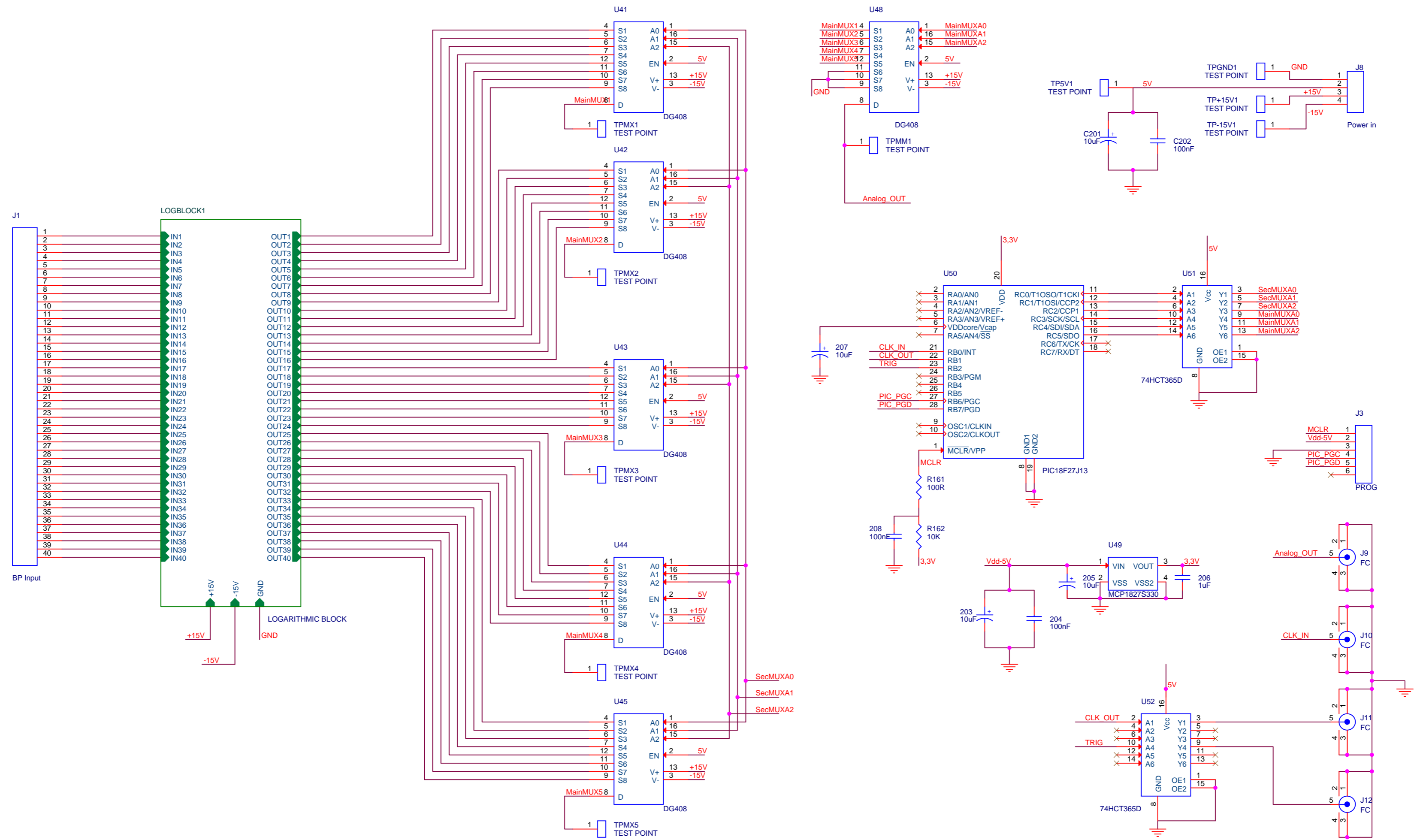
# IOC executable name. This is the command
# given to procServ to start the IOC.
#
# Defaults to $CHDIR/st.cmd
#
#EXEC="$CHDIR/st.cmd"

# IOC run directory. The directory in which
# procServ will start the IOC. It is permissible
# to modify or replace the value.
# eg. CHDIR="$CHDIR/iocBoot/iocexample"
#
# Defaults to '/youriocbasedir/$NAME'
# (the directory containing this file)
#
#CHDIR="$CHDIR"
CHDIR="$CHDIR"/iocBoot/iocTaIoni_Tmcp
```

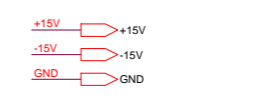
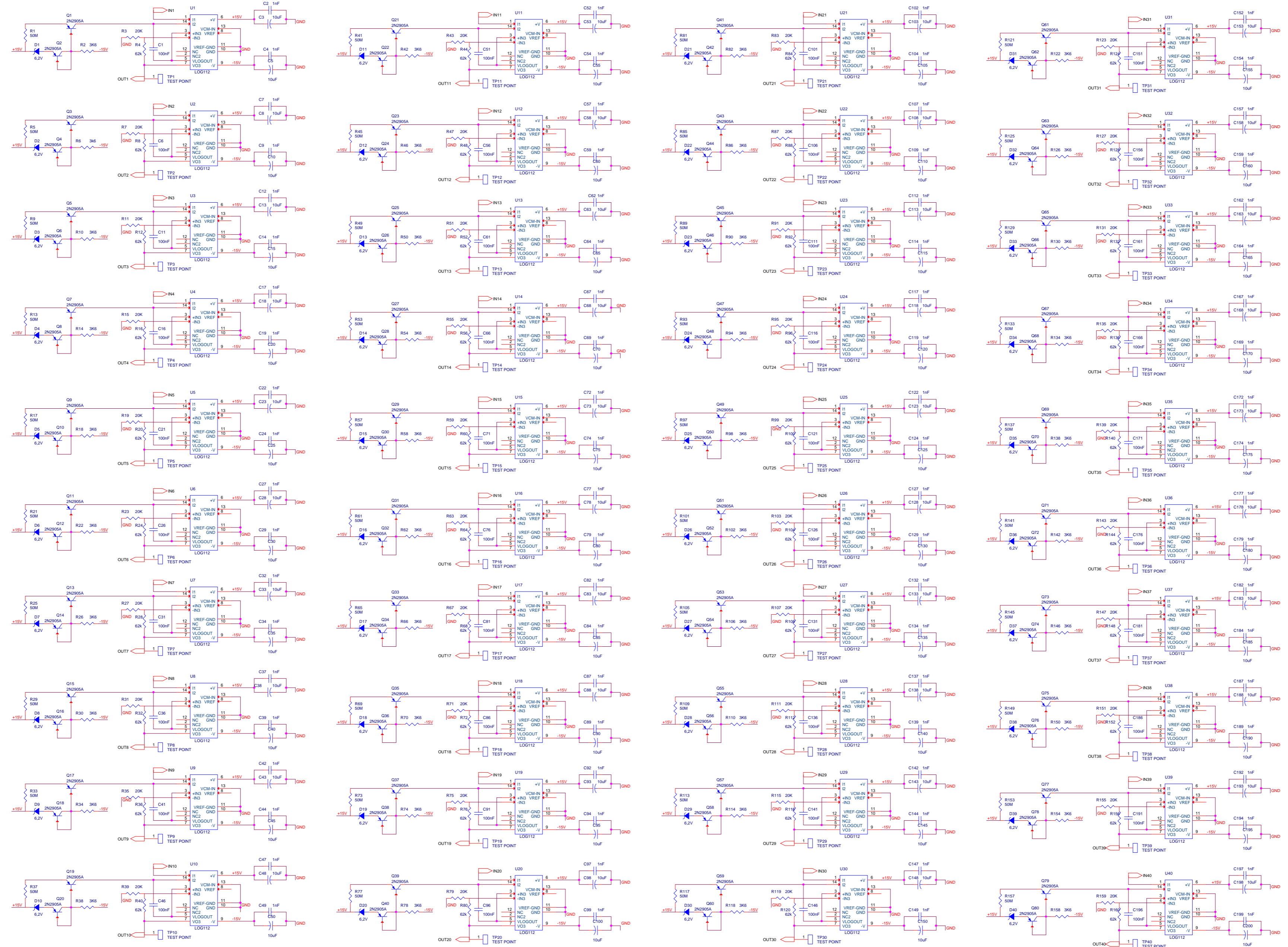
Appendice D

Disegni delle schede elettroniche di beam profiler e farady cup

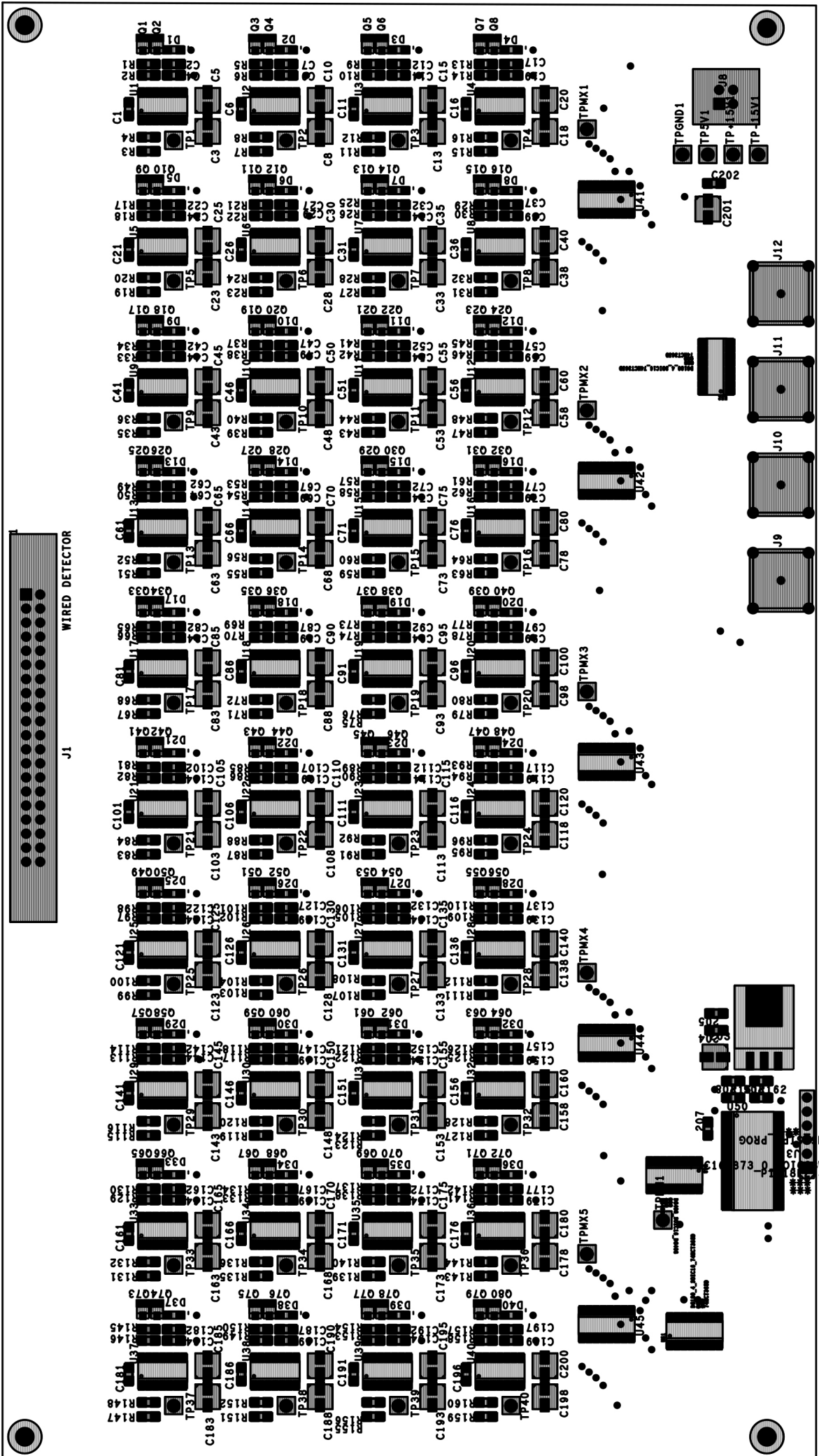
In questa appendice sono riportate le tavole che riguardano lo schematico ed il layout del pcb delle schede elettroniche di beam profiler e farady cup descritte opportunamente nel [Capitolo 4](#).



Logarithmic circuit for acquisition of a large current range (Block I)



Texas Instruments LOG112



WIRED DETECTOR
J1

TPGND1
TP3V1
TP-1.5V1

C201

J12
J11
J10
J9

TPMX2

J42
J43

TPMX3

J44
J45

TPMX4

J46
J47
J48
J49
J50

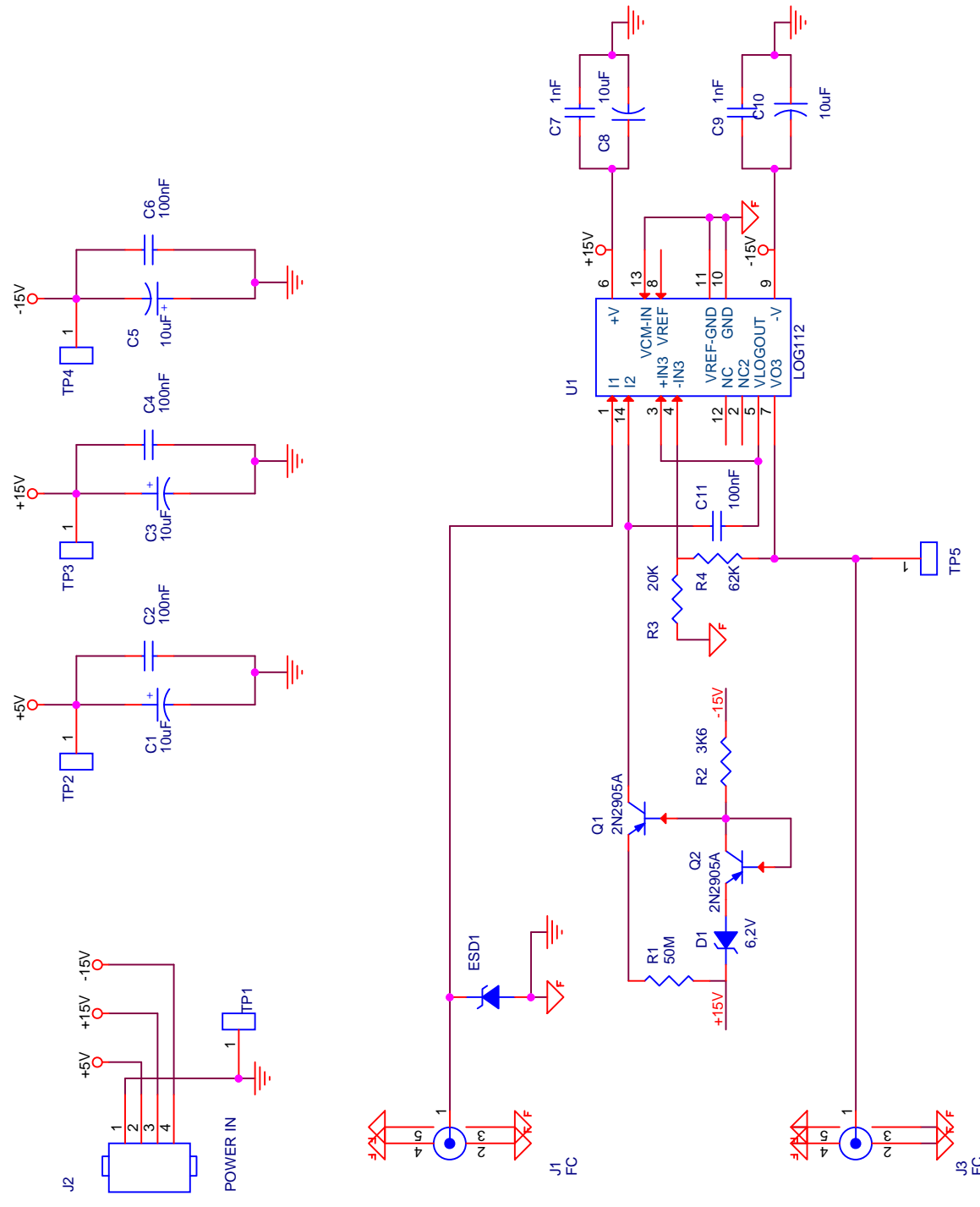
J51
J52
J53
J54
J55
J56
J57
J58
J59
J60

J61
J62
J63
J64
J65
J66
J67
J68
J69
J70

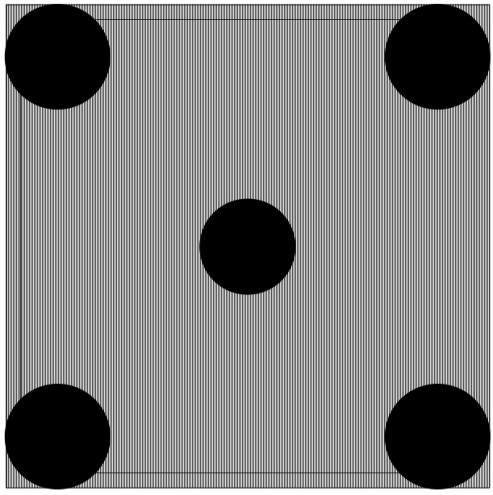
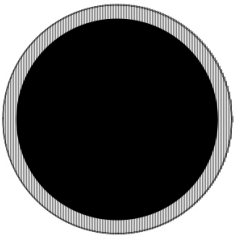
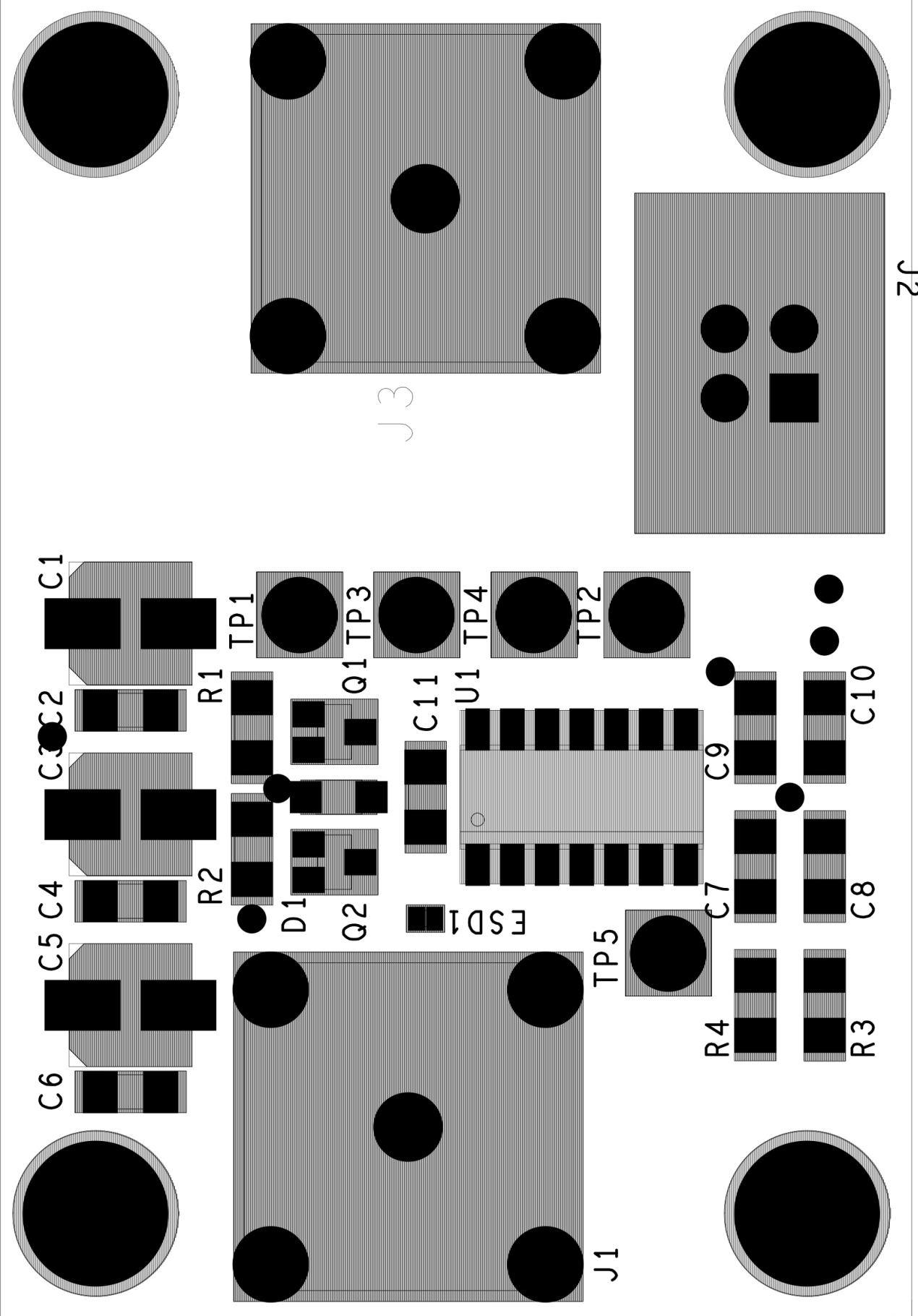
J71
J72
J73
J74
J75
J76
J77
J78
J79
J80

J81
J82
J83
J84
J85
J86
J87
J88
J89
J90

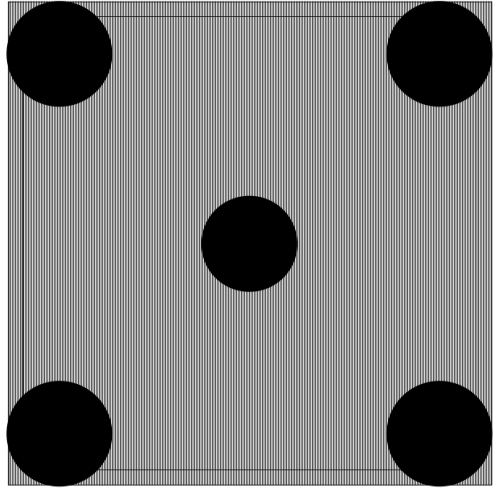
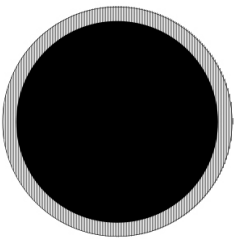
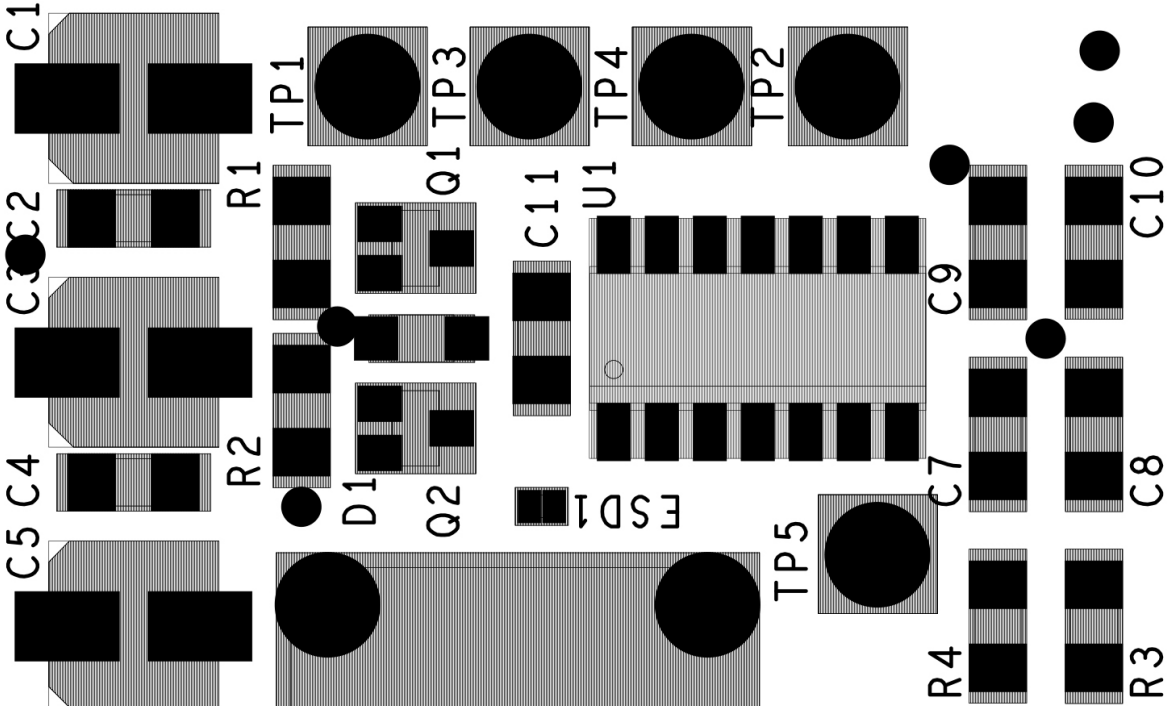
CON
J18
J19
J20
J21
J22
J23
J24
J25
J26
J27
J28
J29
J30
J31
J32
J33
J34
J35
J36
J37
J38
J39
J40
J41
J42
J43
J44
J45
J46
J47
J48
J49
J50
J51
J52
J53
J54
J55
J56
J57
J58
J59
J60
J61
J62
J63
J64
J65
J66
J67
J68
J69
J70
J71
J72
J73
J74
J75
J76
J77
J78
J79
J80
J81
J82
J83
J84
J85
J86
J87
J88
J89
J90
J91
J92
J93
J94
J95
J96
J97
J98
J99
J100
J101
J102
J103
J104
J105
J106
J107
J108
J109
J110
J111
J112
J113
J114
J115
J116
J117
J118
J119
J120
J121
J122
J123
J124
J125
J126
J127
J128
J129
J130
J131
J132
J133
J134
J135
J136
J137
J138
J139
J140
J141
J142
J143
J144
J145
J146
J147
J148
J149
J150
J151
J152
J153
J154
J155
J156
J157
J158
J159
J160
J161
J162
J163
J164
J165
J166
J167
J168
J169
J170
J171
J172
J173
J174
J175
J176
J177
J178
J179
J180
J181
J182
J183
J184
J185
J186
J187
J188
J189
J190
J191
J192
J193
J194
J195
J196
J197
J198
J199
J200
J201
J202
J203
J204
J205
J206
J207
J208
J209
J210
J211
J212
J213
J214
J215
J216
J217
J218
J219
J220
J221
J222
J223
J224
J225
J226
J227
J228
J229
J230
J231
J232
J233
J234
J235
J236
J237
J238
J239
J240
J241
J242
J243
J244
J245
J246
J247
J248
J249
J250
J251
J252
J253
J254
J255
J256
J257
J258
J259
J260
J261
J262
J263
J264
J265
J266
J267
J268
J269
J270
J271
J272
J273
J274
J275
J276
J277
J278
J279
J280
J281
J282
J283
J284
J285
J286
J287
J288
J289
J290
J291
J292
J293
J294
J295
J296
J297
J298
J299
J300
J301
J302
J303
J304
J305
J306
J307
J308
J309
J310
J311
J312
J313
J314
J315
J316
J317
J318
J319
J320
J321
J322
J323
J324
J325
J326
J327
J328
J329
J330
J331
J332
J333
J334
J335
J336
J337
J338
J339
J340
J341
J342
J343
J344
J345
J346
J347
J348
J349
J350
J351
J352
J353
J354
J355
J356
J357
J358
J359
J360
J361
J362
J363
J364
J365
J366
J367
J368
J369
J370
J371
J372
J373
J374
J375
J376
J377
J378
J379
J380
J381
J382
J383
J384
J385
J386
J387
J388
J389
J390
J391
J392
J393
J394
J395
J396
J397
J398
J399
J400
J401
J402
J403
J404
J405
J406
J407
J408
J409
J410
J411
J412
J413
J414
J415
J416
J417
J418
J419
J420
J421
J422
J423
J424
J425
J426
J427
J428
J429
J430
J431
J432
J433
J434
J435
J436
J437
J438
J439
J440
J441
J442
J443
J444
J445
J446
J447
J448
J449
J450
J451
J452
J453
J454
J455
J456
J457
J458
J459
J460
J461
J462
J463
J464
J465
J466
J467
J468
J469
J470
J471
J472
J473
J474
J475
J476
J477
J478
J479
J480
J481
J482
J483
J484
J485
J486
J487
J488
J489
J490
J491
J492
J493
J494
J495
J496
J497
J498
J499
J500
J501
J502
J503
J504
J505
J506
J507
J508
J509
J510
J511
J512
J513
J514
J515
J516
J517
J518
J519
J520
J521
J522
J523
J524
J525
J526
J527
J528
J529
J530
J531
J532
J533
J534
J535
J536
J537
J538
J539
J540
J541
J542
J543
J544
J545
J546
J547
J548
J549
J550
J551
J552
J553
J554
J555
J556
J557
J558
J559
J560
J561
J562
J563
J564
J565
J566
J567
J568
J569
J570
J571
J572
J573
J574
J575
J576
J577
J578
J579
J580
J581
J582
J583
J584
J585
J586
J587
J588
J589
J590
J591
J592
J593
J594
J595
J596
J597
J598
J599
J600
J601
J602
J603
J604
J605
J606
J607
J608
J609
J610
J611
J612
J613
J614
J615
J616
J617
J618
J619
J620
J621
J622
J623
J624
J625
J626
J627
J628
J629
J630
J631
J632
J633
J634
J635
J636
J637
J638
J639
J640
J641
J642
J643
J644
J645
J646
J647
J648
J649
J650
J651
J652
J653
J654
J655
J656
J657
J658
J659
J660
J661
J662
J663
J664
J665
J666
J667
J668
J669
J670
J671
J672
J673
J674
J675
J676
J677
J678
J679
J680
J681
J682
J683
J684
J685
J686
J687
J688
J689
J690
J691
J692
J693
J694
J695
J696
J697
J698
J699
J700
J701
J702
J703
J704
J705
J706
J707
J708
J709
J710
J711
J712
J713
J714
J715
J716
J717
J718
J719
J720
J721
J722
J723
J724
J725
J726
J727
J728
J729
J730
J731
J732
J733
J734
J735
J736
J737
J738
J739
J740
J741
J742
J743
J744
J745
J746
J747
J748
J749
J750
J751
J752
J753
J754
J755
J756
J757
J758
J759
J760
J761
J762
J763
J764
J765
J766
J767
J768
J769
J770
J771
J772
J773
J774
J775
J776
J777
J778
J779
J780
J781
J782
J783
J784
J785
J786
J787
J788
J789
J790
J791
J792
J793
J794
J795
J796
J797
J798
J799
J800
J801
J802
J803
J804
J805
J806
J807
J808
J809
J810
J811
J812
J813
J814
J815
J816
J817
J818
J819
J820
J821
J822
J823
J824
J825
J826
J827
J828
J829
J830
J831
J832
J833
J834
J835
J836
J837
J838
J839
J840
J841
J842
J843
J844
J845
J846
J847
J848
J849
J850
J851
J852
J853
J854
J855
J856
J857
J858
J859
J860
J861
J862
J863
J864
J865
J866
J867
J868
J869
J870
J871
J872
J873
J874
J875
J876
J877
J878
J879
J880
J881
J882
J883
J884
J885
J886
J887
J888
J889
J890
J891
J892
J893
J894
J895
J896
J897
J898
J899
J900
J901
J902
J903
J904
J905
J906
J907
J908
J909
J910
J911
J912
J913
J914
J915
J916
J917
J918
J919
J920
J921
J922
J923
J924
J925
J926
J927
J928
J929
J930
J931
J932
J933
J934
J935
J936
J937
J938
J939
J940
J941
J942
J943
J944
J945
J946
J947
J948
J949
J950
J951
J952
J953
J954
J955
J956
J957
J958
J959
J960
J961
J962
J963
J964
J965
J966
J967
J968
J969
J970
J971
J972
J973
J974
J975
J976
J977
J978
J979
J980
J981
J982
J983
J984
J985
J986
J987
J988
J989
J990
J991
J992
J993
J994
J995
J996
J997
J998
J999
J1000



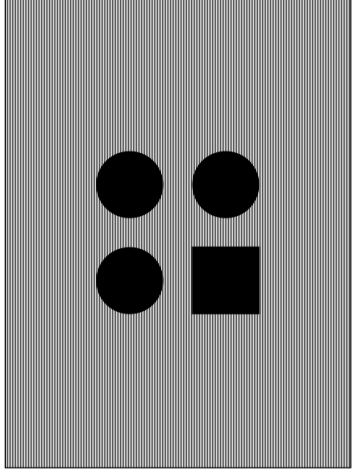
Title		FC Acquisition Board	
Size	A4	Document Number	fc_acquisition_board
Date:	Monday, October 12, 2015	Sheet	1 of 1
Rev	1		



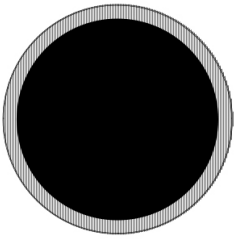
J1



J3



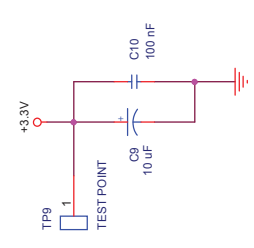
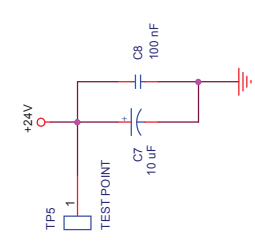
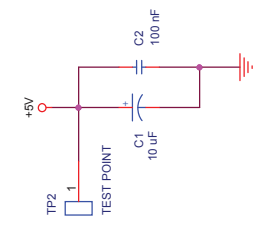
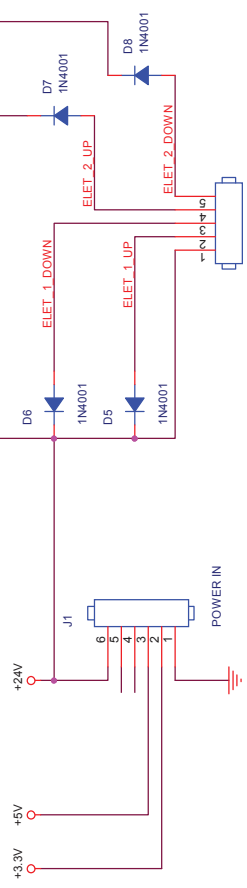
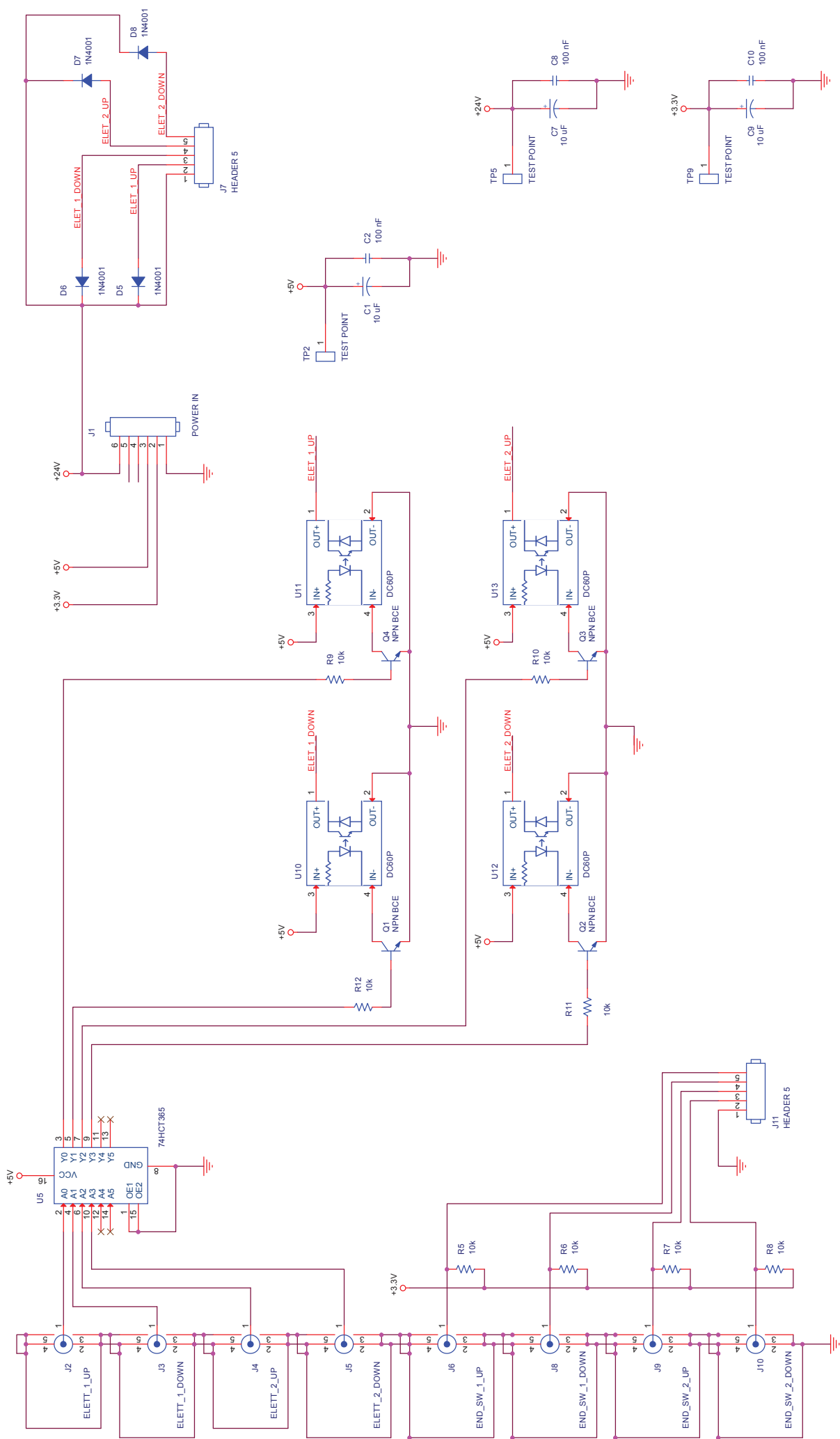
J2



Appendice E

Disegni della scheda elettronica della pneumatic board

In questa appendice sono riportate le tavole che riguardano lo schematico della scheda elettronica pneumatic board descritta opportunamente nel [Capitolo 5](#).



File		Electrolytic Board for FC and BP	
Size	A3	Document Number	fc_up_innovation
Rev	1	Date:	Monday, June 29, 2015
		Sheet	1 of 1

Appendice F

Source Code dell'IOC per la scheda pneumatica

In questo appendice vengono inseriti i codice sorgente usati per configurare l'IOC della scheda pneumatica.

F.1 iocBoot/iocpneumatic_board/st.cmd

```
#!../bin/linux-x86/pneumatic_moto

## You may have to change pneumatic_moto to something else
## everywhere it appears in this file

< envPaths

cd ${TOP}

## Register all support components
dbLoadDatabase "dbd/pneumatic_moto.dbd"
pneumatic_moto_registerRecordDeviceDriver pdbname

## Load record instances
#dbLoadRecords("db/xxx.db","user=rootHost")
dbLoadTemplate("db/pneumatic_moto.substitutions","user=rootHost")

## Configure port driver
# DAQE2214Config(
#   portName,      # the name to give to this asyn port driver
#   boardNum,      # the number of DAQE2214 board defined on the system
#   AI poll time,  # delay time between polls on AI (ms)
#   DI poll time,  # delay time between polls on AI (ms)
#   Ch0_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 0
#   Ch1_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 1
#   Ch2_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 2
#   Ch3_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 3
#   Ch4_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 4
#   Ch5_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 5
#   Ch6_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 6
#   Ch7_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 7
#   Ch8_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 8
#   Ch9_size,      # Number of sample to be acquired on AI channel 9
#   Ch10_size,     # Number of sample to be acquired on AI channel 10
#   Ch11_size,     # Number of sample to be acquired on AI channel 11
#   Ch12_size,     # Number of sample to be acquired on AI channel 12
#   Ch13_size,     # Number of sample to be acquired on AI channel 13
#   Ch14_size,     # Number of sample to be acquired on AI channel 14
#   Ch15_size)     # Number of sample to be acquired on AI channel 15

DAQE2214Config("DAQE2214_0",0,10,10,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)
DAQE2214Config("DAQE2214_1",1,10,10,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)

#asynSetTraceMask(DAQ2214_0, -1, 9)

## Configure port driver
# PCIE6216Config(
```

```

#   portName,      # the name to give to this asyn port driver
#   boardNum)     # the number of DAQe2214 board defined on the system
#PCIE6216Config("PCIE6216_0",1)
#asynSetTraceMask(DAQ2214_0, -1, 9)

cd ${TOP}/iocBoot/${IOC}
iocInit

## Start any sequence programs
#seq sncxxx,"user=rootHost"

```

F.2 pneumatic_motoApp/src/Makefile

```

TOP=../..

include $(TOP)/configure/CONFIG
#-----
# ADD MACRO DEFINITIONS AFTER THIS LINE
#=====

#=====
# Build the IOC application

PROD_IOC = pneumatic_moto
# pneumatic_moto.dbd will be created and installed
DBD += pneumatic_moto.dbd

# pneumatic_moto.dbd will be made up from these files:
#pneumatic_moto_DBD += base.dbd
pneumatic_moto_DBD += include.dbd

# Include dbd files from all support applications:
#pneumatic_moto_DBD += xxx.dbd

# Add all the support libraries needed by this IOC
#pneumatic_moto_LIBS += xxx
#pneumatic_moto_LIBS += seq pv
pneumatic_moto_LIBS += asyn

# pneumatic_moto_registerRecordDeviceDriver.cpp derives from pneumatic_moto.dbd
pneumatic_moto_SRCS += pneumatic_moto_registerRecordDeviceDriver.cpp
pneumatic_moto_SRCS += drvDAQE2214_v5.cpp
#pneumatic_moto_SRCS += drvPCIE6216_v1.cpp
#pneumatic_moto_SRCS += pid.c

# Build the main IOC entry point on workstation OSs.
pneumatic_moto_SRCS_DEFAULT += pneumatic_motoMain.cpp
pneumatic_moto_SRCS_vxWorks += -nil-

# Add support from base/src/vxWorks if needed
#pneumatic_moto_OBJS_vxWorks += $(EPICS_BASE_BIN)/vxComLibrary

# Finally link to the EPICS Base libraries
pneumatic_moto_LIBS += $(EPICS_BASE_IOC_LIBS)

#=====

include $(TOP)/configure/RULES
#-----

```

```
# ADD RULES AFTER THIS LINE

LDFLAGS = -lpci_dask2k -lpci_dask
```

F.3 pneumatic_motoApp/src/include.dbd

```
include "base.dbd"

include "asyn.dbd"

#include "aSubRecord.dbd"

registrar("drvDAQE2214Register")

#registrar("drvPCIE6216Register")

#function(pid)
```

F.4 pneumatic_motoApp/Db/pneumatic_moto.substitutions

```
### Nicola Sattin 04/09/2016 ###

#####
## DIGITAL CHANNELS ##
#####
# Digital port direction
file "db/d_dir.template" { pattern
{P,R,DESC,PORT,CH,DIRECTION }
{TaDaqe,EIIOC-DI0D01,"Port 1",DAQE2214_0,0,0 }
{TaDaqe,EIIOC-DI0D02,"Port 2",DAQE2214_1,1,1 }
}

# Output channels
file "db/do.template" { pattern
{P,R,K,DESC,PORT,CH,MASK,ZNAM,ONAM }
{TaMotr01,PowrSt,01,"Move PnueMotr01 inside",DAQE2214_0,0,0x01 OFF ON }
{TaMotr01,PowrSt,02,"Move PnueMotr01 outside",DAQE2214_0,0,0x02 OFF ON }
}

# Input channels
file "db/di.template" { pattern
{P,R,K,S,DESC,PORT,CH,MASK,ZNAM,ONAM }
{TaMotr01,SwitRd,01,IntrSt,"Switch motor 01 inside",DAQE2214_1,1,0x01 ON OFF }
{TaMotr01,SwitRd,02,IntrSt,"Switch motor 01 outside",DAQE2214_1,1,0x02 ON OFF }
}

# Input channels
file "db/calcout.template" { pattern
{P,          C,S,R,          K,          DESC01,DESC02 }
{TaMotr01,   Cond,St,Rs,01,   "Set condition for motor",   "Reset request for motor"
}
{TaMotr01,   Cond,St,Rs,02,   "Set condition for motor",   "Reset request for motor"
}
}
```

F.5 pneumatic_motoApp/Db/d_dir.template

```
record(mbbo, "$(P)_$(R)St") {
    field(DESC, "DAQE2214 $(DESC) direction")
    field(PINI, "YES")
    field(DTYP, "asynInt32")
    field(OUT, "@asyn$(PORT),$(CH))DIGITAL_DIRECTION")
    field(ZRST, "Output")
    field(ZRVL, "2")
    field(ONST, "Input")
    field(ONVL, "1")
    field(VAL, "$(DIRECTION)")
}
```

F.6 pneumatic_motoApp/Db/do.template

```
record(bo, "$(P)_$(R)$(K)") {
    field(DESC, "$(DESC)")
    field(PINI, "YES")
    field(DTYP, "asynUInt32Digital")
    field(OUT, "@asynMask$(PORT),$(CH),$(MASK))DIGITAL_OUT_VALUE")
    field(ZNAM, "$(ZNAM)")
    field(ONAM, "$(ONAM)")
    field(VAL, 0)
    field(FLNK, "TaMotr01_CondRs$(K)")
}
```

F.7 pneumatic_motoApp/Db/di.template

```
record(bi, "$(P)_$(R)$(K)") {
    field(SCAN, "I/O Intr")
    field(DESC, "$(DESC)")
    field(DTYP, "asynUInt32Digital")
    field(INP, "@asynMask$(PORT),$(CH),$(MASK))DIGITAL_IN_VALUE")
    field(ZNAM, "$(ZNAM)")
    field(ONAM, "$(ONAM)")
    field(FLNK, "TaMotr01_CondSt$(K)")
}

record(bi, "$(P)-$(S)$(K)") {
    field(DESC, "Request motor $(K) on")
    field(PINI, "YES")
    field(VAL, 0)
    field(ZNAM, "OFF")
    field(ONAM, "ON")
    field(FLNK, "TaMotr01_CondSt$(K)")
}
```

F.8 pneumatic_motoApp/Db/calcout.template

```
record(calcout, $(P)_$(C)$$(S)$$(K)) {  
  field(DESC, "$(DESC01) $(K)")  
  field(PINI, "YES")  
  field(INPA, "TaMotr01_SwitRd$(K)")  
  field(INPB, "TaMotr01-IntrSt$(K)")  
  field(CALC, "A*B")  
  field(OUT, "TaMotr01_PowrSt$(K)")  
  field(FLNK, "TaMotr01_PowrSt$(K)")  
}
```

```
record(calcout, $(P)_$(C)$$(R)$$(K)) {  
  field(DESC, "$(DESC02) $(K)")  
  field(PINI, "YES")  
  field(INPA, "TaMotr01_SwitRd$(K)")  
  field(INPB, "TaMotr01_PowrSt$(K)")  
  field(CALC, "A*B")  
  field(OUT, "TaMotr01-IntrSt$(K)")  
  field(FLNK, "TaMotr01-IntrSt$(K)")  
  field(DOPT, "Use 0CAL")  
}
```

Ringraziamenti

Alla conclusione di questo importante traguardo trovo fondamentale ringraziare tutte quelle poche persone che mi hanno permesso di raggiungerlo; aiutandomi, incoraggiandomi e motivandomi durante il lungo percorso.

Per primo trovo doveroso ringraziare il mio relatore, il prof. Roberto Oboe, che mi ha dato la possibilità di crescere insegnandomi nuove discipline e ha reso possibile la mia partecipazione all'interno del progetto SPES. Ringrazio il mio responsabile e correlatore presso i LNL, il dott. Alberto Andrighetto, che ha saputo spronarmi facendomi crescere professionalmente e mi ha inserito all'interno di un team affiatato e unito.

Un doveroso ringraziamento va all'ing. Alberto Monetti, mio correlatore, che mi ha sostenuto, sopportato e corretto durante questa esperienza. Ringrazio l'ing. Daniele Scarpa e l'ing. Jesus Vasquez che mi hanno guidato durante questo periodo condividendo la loro esperienza con me. Ringrazio il mio collega, nonché compagno d'ufficio, Luca Martin che è riuscito a sopravvivere tra "due fuochi" per sei lunghi mesi. Ringrazio l'Ortolano, ormai è da un mese che l'ufficio D102 è suo cliente quotidiano. Un doveroso ringraziamento anche a tutti i miei amici e colleghi ai LNL che hanno contribuito a creare un clima di leggerezza e familiarità in cui è stato un vero piacere aver avuto l'opportunità di lavorare.

Ringrazio tutti i miei compagni d'università con i quali ho condiviso i banchi di scuola, la pressione degli esami, le giornate sui libri e i piccoli momenti di relax. Ringrazio i miei amici con i quali ho condiviso tante belle esperienze. Ringrazio Meme, che ha saputo occupare il mio tempo libero. Ringrazio Daniel e Fabio per aver condiviso anche l'escursione sul sentiero dei cippi. Ringrazio i miei compagni di squadra per avermi sopportato durante i miei sfoghi settimanali.

Ringrazio dal profondo del cuore la mia famiglia per avermi dato l'opportunità di vivere delle belle esperienze e non avermi mai fatto mancare nulla. Ringrazio mia mamma perché mi ha insegnato il valore dello studio e del sacrificio, un insegnamento che non dimenticherò mai. Ringrazio mio papà perché mi ha insegnato la pazienza e l'umiltà, facoltà che possono aprire molte porte.

Ringrazio quattro fra i miei più cari amici, con i quali sono cresciuto e ho passato dei momenti indimenticabili, condividendo con loro la spensieratezza della giovinezza.

Un ringraziamento speciale alla mia futura moglie Fede, che ha saputo amarmi ed è sempre rimasta al mio fianco aiutandomi a prendere importanti decisioni. Ringrazio Kazuko, che mi ha obbligato a lunghe e rilassanti passeggiate.

Ringrazio infine tutte le persone che ho conosciuto e che non sono riuscito a citare, se sono arrivato fino a qua, una piccola o una grande parte di merito è anche vostra.

Nicola

