

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

—  
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

—  
RELAZIONE DI TIROCINIO

UTILIZZO DI SOFTWARE LABVIEW PER LA  
REALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI  
CONTROLLO DEI  
FORNI DI PRODUZIONE DEL PROGETTO  
SPES

Relatore: Prof. FRANCO BOMBI

Correlatori: Dott. ALBERTO ANDRIGHETTO  
P.I. MAURO GIACCHINI

Laureando: RUBENS RAFFAGNATO

ANNO ACCADEMICO 2009-2010



# Sommario

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici.....</b>	<b>5</b>
1.1 Il progetto SPES .....	9
1.1.1 L' acceleratore primario.....	10
1.1.2 Il target ed il sistema di estrazione-ionizzazione .....	11
1.1.3 Front-End .....	17
1.1.4 Separatori elettromagnetici e post-acceleratori.....	18
1.2 Applicazione dei fasci di ioni esotici.....	20
1.2.1 Applicazione in fisica nucleare [7] .....	20
1.2.2 Applicazioni in fisica dello stato solido.....	22
1.2.3 Applicazioni mediche: Tomografia ad Emissione Positronica [9] .....	23
1.2.4 La terapia per la Cattura Neutronica nel Boro (BNCT) [9] .....	26
1.2.5 Applicazione in astrofisica [10].....	27
<b>2. I forni di produzione del progetto SPES.....</b>	<b>29</b>
2.1 I forni di produzione.....	30
2.1.1 Evaporatore.....	32
2.1.2 Generatori di potenza.....	33
2.1.3 Gruppo di pompaggio a vuoto .....	34
2.1.4 Pirometri ottici .....	35
2.1.5 Switch di rete .....	35
2.1.6 Termoregolatori Eurotherm 2216e .....	36
2.1.7 Controller Fieldpoint National Instrument.....	36

---

2.1.8	Host PC.....	37
<b>3.</b>	<b>Il software LabVIEW .....</b>	<b>39</b>
3.1	Macchine a stati.....	42
3.2	Property node .....	42
3.3	Measurement & Automation Explorer .....	43
<b>4.</b>	<b>Il sistema di controllo dei forni di produzione .....</b>	<b>45</b>
4.1	Stati di inizializzazione.....	47
4.2	Stati del processo di carburizzazione.....	49
4.3	Stati del processo di ramp-down .....	51
4.4	Altri stati.....	52
<b>5.</b>	<b>Implementazione LabVIEW dei driver per i moduli alimentatore e aggiornamento dei driver per termoregolatori RS-485.....</b>	<b>54</b>
5.1	Alimentatore TDK-Lambda GEN10-330: descrizione e configurazione.....	54
5.2	Implementazione dei driver TCP/IP per il controllo remoto dei moduli alimentatore [15, 16] .....	58
5.2.1	GEN_Open_TCP.vi.....	58
5.2.2	GEN_Init_TCP.vi .....	58
5.2.3	GEN_Config_TCP.vi.....	58
5.2.4	GEN_Wait_TCP.vi.....	59
5.2.5	GEN_OnOff_TCP.vi .....	59
5.2.6	GEN_SetVI_TCP.vi .....	60
5.2.7	GEN_ReadVI_TCP.vi .....	60
5.2.8	GEN_Close_TCP.vi.....	60
5.2.9	Gestione di errore dei driver alimentatore .....	61
5.2.10	Gestione della perdita di comunicazione dei driver alimentatore.....	62
5.3	Termoregolatore Eurotherm RS-485 [14] .....	64
5.4	Aggiornamento dei driver per l'utilizzo dei termoregolatori Eurotherm RS-485 .....	64
5.4.1	ET24XX Utility MODBUS RTU Receive Message RS485.vi .....	65

---

<b>6. Il sistema di controllo dei forni di produzione: interfaccia grafica utente .....</b>	<b>68</b>
6.1 Schermate di avvio .....	69
6.2 Schermate di monitoraggio sistema.....	75
6.3 Segnalazioni errori e/o anomalie .....	80
6.4 I file di log e i file di report misure.....	83
6.4.1 Creazione e tabulazione file di log e file di misure .....	83
<b>Appendice .....</b>	<b>85</b>
A.1 Glossario dei termini .....	85
A.2 Configurazione IP address modulo Master .....	86
A.3 Schemi quadro elettrico del forno di produzione .....	89
<b>Bibliografia .....</b>	<b>93</b>



## Introduzione

La fisica nucleare è la branca della fisica che studia il nucleo atomico nei suoi costituenti protoni, neutroni e loro interazioni. Negli ultimi 30 anni è stata acquisita una vasta conoscenza sul mondo dei nuclei grazie a molteplici studi teorici e sperimentali. Le ricerche e le complesse tecnologie appositamente create, hanno portato alla nascita di un gran numero di applicazioni nel campo della medicina, dell'industria, della scienza dei materiali e della fisica applicata.

La maggior parte degli atomi che si trovano in natura possiedono nuclei stabili, cioè nuclei in cui protoni e neutroni sono presenti in numero uguale.

Attraverso determinati processi fisici è possibile destabilizzare i nuclei stabili, producendo così dei nuclei instabili detti *radioattivi* o denominati anche "esotici".

L'insieme degli impianti e delle necessarie attrezzature per la produzione e l'utilizzo di questi ioni radioattivi prende il nome di *facility*.

Nel corso degli anni l'Europa è diventata leader nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando, sotto la guida del CERN di Ginevra, 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.

A questo programma partecipa attivamente l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Legnaro, con il progetto *SPES (Study and Production of Exotic nuclear Species)* che prevede la costruzione di una *facility* per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni (n-rich) e di alta qualità, nell'intervallo di valori di massa compreso tra 80 e 160 uma.

Tale progetto porterà, nei prossimi anni, alla costruzione di un impianto di tipo ISOL per la produzione di ioni esotici.

La costruzione di un'unica grande *facility* di tipo ISOL a livello europeo (EURISOL) è una iniziativa che coinvolge i principali laboratori nucleari europei.

Il progetto SPES prevede il bombardamento di un bersaglio in carburo di uranio con un fascio di protoni in modo da generare, tramite reazione nucleare, specie radioattive all'interno del target.

Le particelle radioattive generate vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivo.

Il cuore della *facility* è il target in carburo di uranio, che solitamente si presenta come un unico blocco cilindrico racchiuso all'interno di una scatola in grafite. L'idea innovativa introdotta dal progetto SPES è la suddivisione del target in sette dischi opportunamente spazati che consente, a parità di volume, di aumentare la superficie di scambio termico radioattivo tra il target e il contenitore in grafite (come verrà descritto in dettaglio al capitolo 1).

Questa implementazione è di fondamentale importanza perchè permette di smaltire il calore del target con maggiore efficienza (la potenza termica prodotta dal fascio protonico che lo investe viene stimato in circa 8kW).

Gli isotopi prodotti vengono estratti dalla camera grazie alla linea di trasferimento che indirizza a sua volta le particelle verso la sorgente di ionizzazione dove avviene appunto il processo di ionizzazione (ioni +1).

A seconda del tipo di elemento che viene utilizzato, vengono impiegate sorgenti di ionizzazioni differenti. La scelta della sorgente di ionizzazione è di fondamentale importanza, in quanto il suo funzionamento influenza l'intensità e la qualità del fascio radioattivo.

Si possono distinguere sorgenti con ionizzazione superficiale, sorgenti laser (*RILIS*), sorgenti al plasma (*FEBIAD*) e le sorgenti ECR (*Electron Cyclotron Resonance*).

Gli ioni prodotti dalla sorgente di ionizzazione vengono accelerati da un elettrodo estrattore, realizzato in lega di titanio, che viene mantenuto ad una differenza di potenziale di 60 kV rispetto alla sorgente stessa.

La linea di trasferimento, la sorgente di ionizzazione, l'elettrodo estrattore sono componenti che costituiscono il *target* e lo studio della distribuzione di temperatura e delle deformazioni termiche che si verificano durante il processo è assai complesso.

I Laboratori Nazionali di Legnaro hanno avviato, per queste ragioni, delle strette collaborazioni con l'ENEA di Bologna, i Dipartimenti di Ingegneria dell'Informazione, i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova, il CERN di Ginevra ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

Il tirocinio oggetto di questa relazione si è svolto nell'ambito del progetto SPES che viene realizzato e in continua evoluzione presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

Obiettivo del tirocinio è stato quello di sviluppare una nuova versione del software di gestione dei forni di produzione del *target*, in seguito all'installazione nel sistema di 4 moduli di potenza TDK-Lambda GEN10-330 e di 2 controllori di temperatura Eurotherm 2216e. Si è cercato di implementare, attraverso il linguaggio di programmazione LabVIEW, un'interfaccia grafica di facile comprensione e di supporto efficace all'utente per le fasi di sperimentazione, diagnosi e studio del processo di trattamento dei materiali.

Questa relazione di tirocinio si suddivide in 6 capitoli:

- *Capitolo 1*

Descrive la metodologia per la produzione dei fasci di ioni radioattivi e le strutture degli apparati (si fa riferimento particolare alla tecnica di produzione ISOL).

Vengono descritte le principali caratteristiche del progetto SPES e le attuali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi nel campo della fisica nucleare, dell'astrofisica, della scienza dei materiali e della medicina.

- *Capitolo 2*

Descrive i forni di produzione del progetto SPES, con particolare attenzione alla struttura del forno di produzione del *target*. Vengono illustrati i dischi del *target* e la struttura del forno di produzione.

- *Capitolo 3*

Presenta il linguaggio di programmazione LabVIEW.

Offre una breve presentazione delle interfacce e degli strumenti che National Instrument fornisce a corredo del software. Strumenti che si sono rivelati utili e di fondamentale importanza durante l'attività di tirocinio.

- *Capitolo 4*

Presenta la configurazione del sistema di controllo del forno di produzione del *target*. Viene illustrata la macchina a stati che ne governa il funzionamento.

- *Capitolo 5*

Vengono presentati e descritti i driver realizzati per i moduli alimentatori TDK-Lambda GEN10-330 e viene spiegato l'aggiornamento driver per i controllori Eurotherm 2216e RS-485.

- *Capitolo 6*

Descrive l'interfaccia grafica utente con riferimento alle schermate di avvio e alle schermate di monitoraggio. Viene fornita una guida sulle segnalazioni d' errore e su come intervenire per risolvere le eventuali anomalie. Viene fatta inoltre una presentazione dei file di log e dei file di misure.



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

La materia ha una struttura discontinua, cioè costituita da piccole particelle, detti atomi, che sono tutte della stessa specie nelle sostanze dette semplici (elementi); mentre sono diverse e presenti in un determinato rapporto, nelle sostanze composte (composti). Quindi l'atomo si può considerare come la più piccola parte di un elemento, mentre la molecola, formata da più atomi, è la più piccola parte di una sostanza - elemento o composto - che mantiene le caratteristiche fisiche e chimiche della sostanza stessa, e che può esistere allo stato libero. L'atomo è costituito da un nucleo centrale in cui, in un volume ridotto, è concentrata tutta la massa formata da protoni (particelle a carica positiva) e da neutroni (particelle elettricamente neutre), chiamati entrambi "nucleoni"; attorno al nucleo, carico positivamente, si muovono gli elettroni, di massa trascurabile ed aventi carica uguale a quella dei protoni ma di segno opposto (particelle a carica negativa).

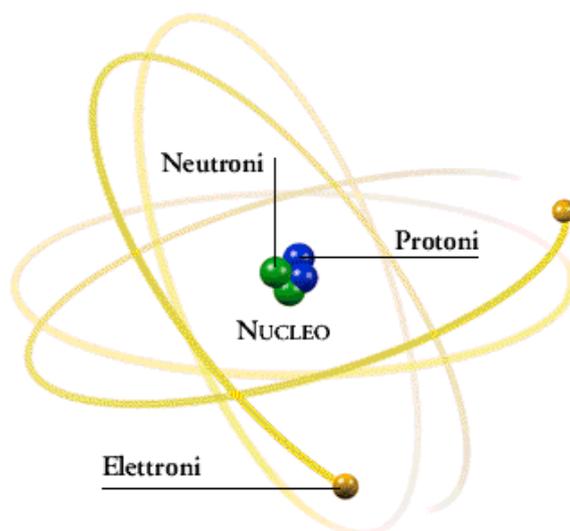


Figura 1-1: Configurazione di atomo stabile

La stabilità del nucleo è garantita dalla presenza di una forza di attrazione tra i nucleoni molto intensa definita "interazione forte"; tale forza si manifesta con efficacia a distanze inferiori alle dimensioni nucleari e bilancia la repulsione elettrostatica tra i protoni carichi positivamente. L'interazione forte vincola il moto dei nucleoni attorno alla massa nucleare centrale ed a causa della sua notevole intensità, la rottura del nucleo atomico richiede moltissima energia. La fisica nucleare si occupa del comportamento e della stabilità dei nuclei, che in natura non si trovano come semplici agglomerati di protoni e neutroni, bensì come ordinate e bilanciate combinazioni di questi due tipi di nucleoni.

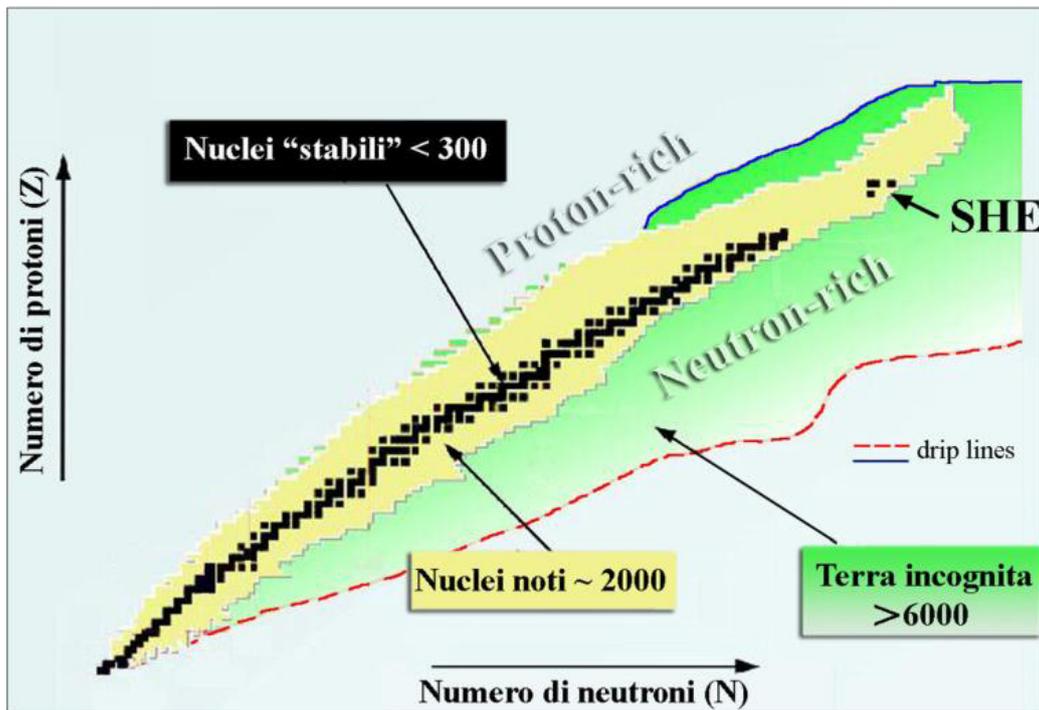


Figura 1-2: Carta dei nuclidi (SHE indica nuclei pesanti)

I nuclei stabili possiedono generalmente ugual numero di neutroni e protoni [1] e costituiscono la cosiddetta “valle di stabilità” nella carta dei nuclidi (Figura 1.2); il motivo fondamentale della maggiore stabilità dei nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni è da ricercarsi nel fatto che l’interazione neutrone-protone è leggermente più intensa rispetto alle interazioni protone-protone e neutrone-neutrone.

Per i nuclei con numero di massa  $A \geq 40$  (si ricorda che  $A = Z + N$ , con  $Z = \text{numero di protoni}$  ed  $N = \text{numero di neutroni}$ ), la forza coulombiana sposta la linea di stabilità lontano dalla retta in cui giacciono i nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni, verso nuclei ricchi di neutroni (che essendo privi di carica, non alimentano la forza repulsiva elettrostatica); come se non bastasse, la forza coulombiana limita pure l’esistenza di elementi superpesanti (SHE, *Super Heavy Elements*), dato che il corto raggio di azione della forza nucleare forte non permette un’ efficace opposizione della forza elettrostatica, agente invece a più lungo raggio.

I nuclei con eccesso o difetto di neutroni, e quindi lontani dalla valle di stabilità, sono radioattivi e decadono con emissione di particelle (alfa, beta, neutrini, etc.) e raggi  $\gamma$ .

Tali nuclei instabili vengono comunemente chiamati “esotici” ed al momento circa 2000 di essi sono stati prodotti e caratterizzati in laboratori di ricerca di tutto il mondo.

Calcoli teorici prevedono tuttavia l’esistenza di un numero di nuclei esotici molto più elevato (più di 6000), cosicché è possibile che un gran numero di essi sia presente nella cosiddetta “terra incognita”, tuttora inesplorata e che comprende la regione ricca di neutroni (*neutron-rich*) e quella dei nuclei superpesanti.

La carta dei nuclidi (figura 1-2) individua e classifica i nuclei in base al numero di protoni ( $Z$ ) ed al numero di neutroni ( $N$ ). I nuclei definiti “stabili” (quadrantini neri) sono quelli non radioattivi oppure aventi tempo di decadimento comparabile all’età della terra (o perfino superiore).

La regione di colore giallo è quella dei nuclei artificiali, che possono avere vita più o meno breve a seconda dei casi; aggiungendo neutroni o protoni ad un nucleo ci si allontana dalla valle di stabilità

fino a raggiungere i limiti, detti *drip lines*, caratterizzati da una diminuzione della forza di attrazione tra neutroni e protoni tale da non garantire più la stabilità del nucleo: calcoli teorici hanno dimostrato che al di fuori delle *drip lines* i nuclei emettono nucleoni molto rapidamente per formare nuovi nuclei, con combinazioni di protoni e neutroni tali da poter rientrare nell'area di potenziale stabilità, nella quale l'interazione forte è nuovamente capace di garantire il grado di coesione necessario.

La regione indicata in verde, ancora inesplorata, è definita "terra incognita" ed è caratterizzata dalla presenza di nuclei radioattivi con rapporti  $N/Z$  molto piccoli (*proton-rich*) o molto grandi (*neutron-rich*).

La Figura 1.2 mostra che l'area *proton-rich* è relativamente ben definita teoricamente, mentre quella *neutron-rich* è molto più vasta ed indefinita.

Come si vedrà nei paragrafi successivi lo studio dei nuclei instabili, ed in particolare dei fasci di ioni esotici, hanno suscitato 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.

Per l'utilizzo pratico e la produzione di ioni radioattivi di questo tipo è necessaria la costruzione di sistemi acceleratori ed attrezzature capaci di garantire fasci ionici (RIB, *Radioactive Ion Beams*) di elevata purezza, intensità ed energia.

Le *facilities* già operanti e quelle in via di costruzione, prevedono due tecniche differenti per la produzione del RIB.

Il metodo IN-FLIGHT o FSR (*Fragment Recoil Separator*) ed il metodo ISOL (*Isotope Separation On-line*).

I due metodi si distinguono in base alla dimensione del *target* di produzione e richiedono ognuno una differente tecnologia di estrazione degli isotopi radioattivi prodotti.

La maggior parte delle *facilities* operanti in Europa ed in altre parti del mondo sono basate sul metodo ISOL.

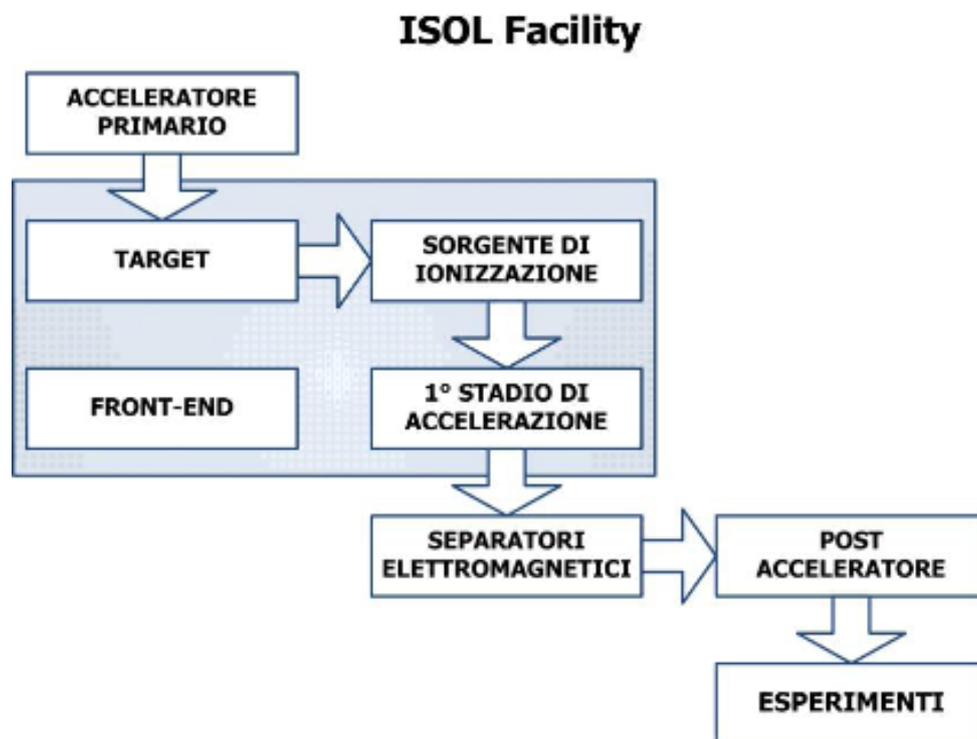


Figura 1-3: Schema di una facility di tipo ISOL

La tecnica ISOL, schematizzata in Figura 1.3, utilizza la separazione degli isotopi in linea [2]. I principali costituenti di tale tipologia di *facility* sono:

- l'acceleratore primario
- il front-end
- i separatori di massa ed isobari
- il post-acceleratore

L'acceleratore primario è costituito da una sorgente ionica che inietta protoni o atomi ionizzati a bassa energia (alcune decine di *keV*) nell'acceleratore che li accelera fino all'energia di un *1 GeV* e qualche *mA* di corrente.

La tecnica ISOL viene di solito associata all'utilizzo di bersagli spessi all'interno dei quali si producono gli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari (fissione, spallazione, frammentazione, etc.).

Il fascio primario di particelle della voluta energia, proveniente dall'acceleratore primario, viene fatto collidere con un bersaglio (*target*) di materiale fissile.

I prodotti di reazione sono portati a temperatura molto elevata ed attraverso un opportuno sistema, vengono estratti e ionizzati. In questa maniera possono essere accelerati una prima volta per mezzo di un campo elettrico.

Il primo stadio di accelerazione avviene nel *front-end* che attira gli ioni e li invia verso dei separatori elettromagnetici nei quali il fascio viene opportunamente selezionato e purificato.

Gli ioni successivamente vengono post-accelerati al livello di energia richiesto dal particolare esperimento.

L'intensità del fascio radioattivo prodotto è descritta dalla seguente equazione:

$$I = \sigma \cdot \Phi \cdot N \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3$$

dove  $\sigma$  è la sezione d'urto per le reazioni nucleari,  $\Phi$  è l'intensità del fascio primario,  $N$  è lo spessore del target,  $\varepsilon_1$  l'efficienza di rilascio del *target*,  $\varepsilon_2$  è l'efficienza di ionizzazione e  $\varepsilon_3$  è l'efficienza del processo di estrazione.

Una corretta configurazione del complesso target-sistema di estrazione ed 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 (dovuto alla relativa lentezza dei processi di diffusione, effusione ed estrazione dei nuclidi);
- l'incremento della produzione senza deterioramento della purezza del fascio.

La separazione dei prodotti radioattivi dal substrato del *target* e l'estrazione dei nuclei esotici, seguono le leggi del *moto browniano*, quindi sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura, in particolare, all'aumentare del livello termico, la diffusione delle particelle risulta accelerata. Chiaramente, più breve è la vita media degli atomi radioattivi, più rapido deve essere il tempo di rilascio, e di conseguenza, per quanto appena affermato, il sistema deve essere mantenuto alla più alta 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 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 [3].

Questo progetto rappresenta un'iniziativa che vede coinvolti i principali laboratori nucleari europei, ed è dedicato allo studio ed alla progettazione di una struttura per la produzione di fasci radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile.

In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), nei quali è prevista la costruzione di una *facility* ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES.

## 1.1 *Il progetto SPES*

Il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*) nasce con l'ambizione di fornire un acceleratore di particelle (*RIB facility*) che permetta di svolgere ricerche all'avanguardia in fisica nucleare, attraverso lo studio di nuclei lontani dalla valle di stabilità.

Il progetto si basa sulla produzione di nuclei radioattivi *neutron-rich* attraverso la fissione nucleare (con una resa massima di  $10^{13}$  fissioni/s) indotta bombardando un *target*, realizzato in carburo di uranio ( $UC_x$ ), con un fascio di protoni di  $40\text{ MeV}$  a  $200\ \mu\text{A}$  di corrente (cioè per una potenza totale di  $8\text{ kW}$ ) [4]. Essendo il livello di radioattività stimato nel *target* di produzione molto elevato, è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture e sistemi in modo da garantire la sicurezza in termini di radioprotezione.

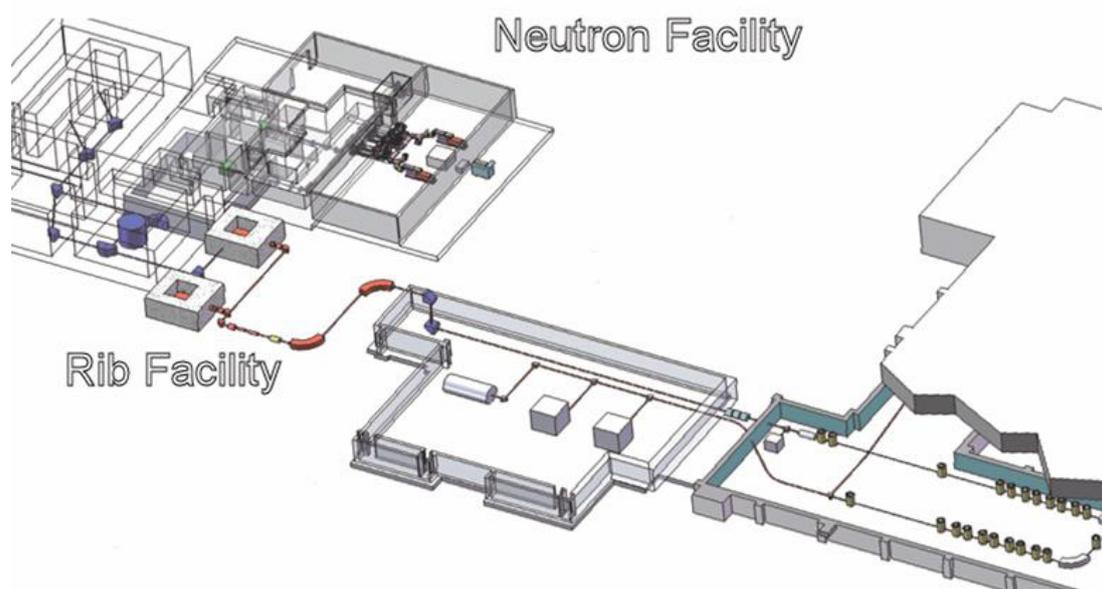


Figura 1-4: Layout del progetto SPES (RIB e Neutron Facility)

La *facility* SPES prevede inoltre la realizzazione di un acceleratore di neutroni (*Neutron Facility*) attraverso l'impiego di un secondo fascio di protoni ad alta energia ( $50\text{ MeV}$  a  $30\text{ mA}$  di corrente). La *Neutron Facility* è un obiettivo secondario del progetto SPES, ma permette comunque importanti applicazioni nell'ambito della medicina, dell'astrofisica e della scienza dei materiali. La Figura 1-4 mette in evidenza il layout del progetto SPES, nel quale sono visibile le due *facility* descritte in precedenza.

Nei successivi paragrafi vengono descritti i componenti principali che costituiscono la *RIB Facility* di tipo ISOL attualmente in fase di costruzione ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

### 1.1.1 L' acceleratore primario

L'acceleratore primario ha la funzione di produrre il fascio primario di particelle (in questo caso si tratta di un raggio protonico), che deve essere direzionato verso il target dove ha luogo la reazione nucleare [4].

Il gruppo di ricerca per la *facility* SPES ha scelto di utilizzare un Ciclotrone come acceleratore primario. Tale dispositivo è in grado di garantire per la produzione di fasci di ioni esotici le energie e l'intensità richieste dal progetto SPES ed offre inoltre la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio indipendente per alimentare la *Neutron Facility*.

Attualmente, un ciclotrone commerciale con specifiche adatte ai requisiti del progetto SPES è il *Cyclone® 70*, sviluppato dalla IBA (Figura 1-5); il quale è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a  $70\text{ MeV}$  di energia ad una corrente massima di  $750\text{ }\mu\text{A}$ .



Figura 1-5: Il ciclotrone commerciale IBA Cyclone® 70

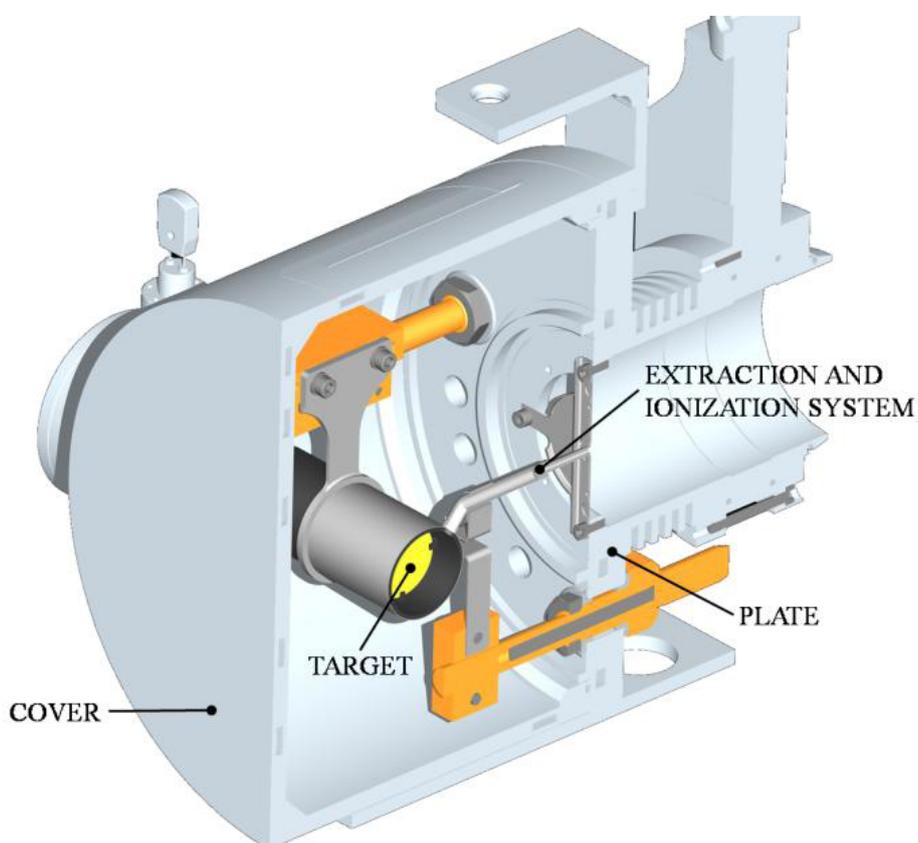
### 1.1.2 Il target ed il sistema di estrazione-ionizzazione

Il *target* di produzione dei radioisotopi ed il sistema di estrazione-ionizzazione degli stessi sono i componenti maggiormente interessati dalle reazioni nucleari. Essi sono contenuti all'interno di una camera di forma cilindrica (*camera target*), e viste le elevate temperature in gioco, viene raffreddata ad acqua mediante un opportuno circuito interno (Figura 1-6).

Sempre a causa delle alte temperature, per evitare l'ossidazione dei componenti per contatto con l'ossigeno dell'ambiente esterno, l'interno della camera viene mantenuto in condizioni di alto vuoto, con pressioni dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar (la mancanza di atmosfera è inoltre necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte).

Il volume della camera è delimitato da una flangia (*plate*) e da un coperchio (*cover*) realizzati rispettivamente in lega di alluminio *Al5083 (Peraluman)* e *Al6082 (Anticorodal)*.

Quest'ultimi sono muniti di circuiti di raffreddamento indipendenti e la loro tenuta a vuoto è garantita da un guarnizione O-ring.



**Figura 1-6: Configurazione della camera target**

Il *target* è composto da 7 dischi coassiali in  $UC_x$ , aventi 40 mm di diametro e circa 1 mm di spessore opportunamente distanziati in direzione assiale, al fine di dissipare attraverso radiazione termica la potenza sviluppata dal fascio di protoni che investe il target (circa 8 kW).

Essi sono contenuti in una scatola (*box*), un tubo cavo di grafite, avente un diametro esterno ed una lunghezza di 49 e 200 mm rispettivamente (Figura 1-7). All'interno della scatola i dischi sono

alloggiati in piccole sedi ricavate sulla superficie interna della scatola attraverso un processo tecnologico di elettro-erosione. In questa maniera, la scatola mantiene a distanza fissa i dischi e consente, in virtù della bassa conducibilità della grafite, di minimizzare il calore perso per conduzione dal *target*.

Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa due finestre in grafite (*windows*), molto sottili ( $0.2\text{ mm}$  di spessore) per non attenuare l'intensità del fascio, ma di fondamentale importanza in quanto consentono di schermare la zona attiva e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio.

Dopo aver investito le due finestre di grafite e i dischi in carburo di uranio, il fascio primario va ad impattare su tre ulteriori dischi (*dumpers*) e sul fondo scatola (*box base*), entrambi in grafite; questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio, sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del *target* e quindi l'attivazione della camera esterna [5].

All'interno della scatola in grafite deve essere mantenuta la temperatura media di  $2000^{\circ}\text{C}$ , in modo da migliorare l'estrazione dei prodotti della fissione.

Essendo la potenza del fascio di protoni non sufficiente a portare il *target* al livello di temperatura richiesto, è necessario introdurre un ulteriore elemento riscaldante, il riscaldatore (*heater*), avente anche la funzione di schermare il *target*.

Tale dispositivo, inoltre, deve essere in grado di sostenere il *target* durante i transitori, evitando improvvisi sbalzi termici molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi. Infatti il carburo di uranio è un materiale termicamente poco conduttore e ha una tensione di rottura molto bassa; perciò la sua scarsa conduttività causa gradienti di temperatura in direzione radiale ed assiale provocando la formazione di tensioni nelle medesime direzioni che possono portare a rottura il disco.

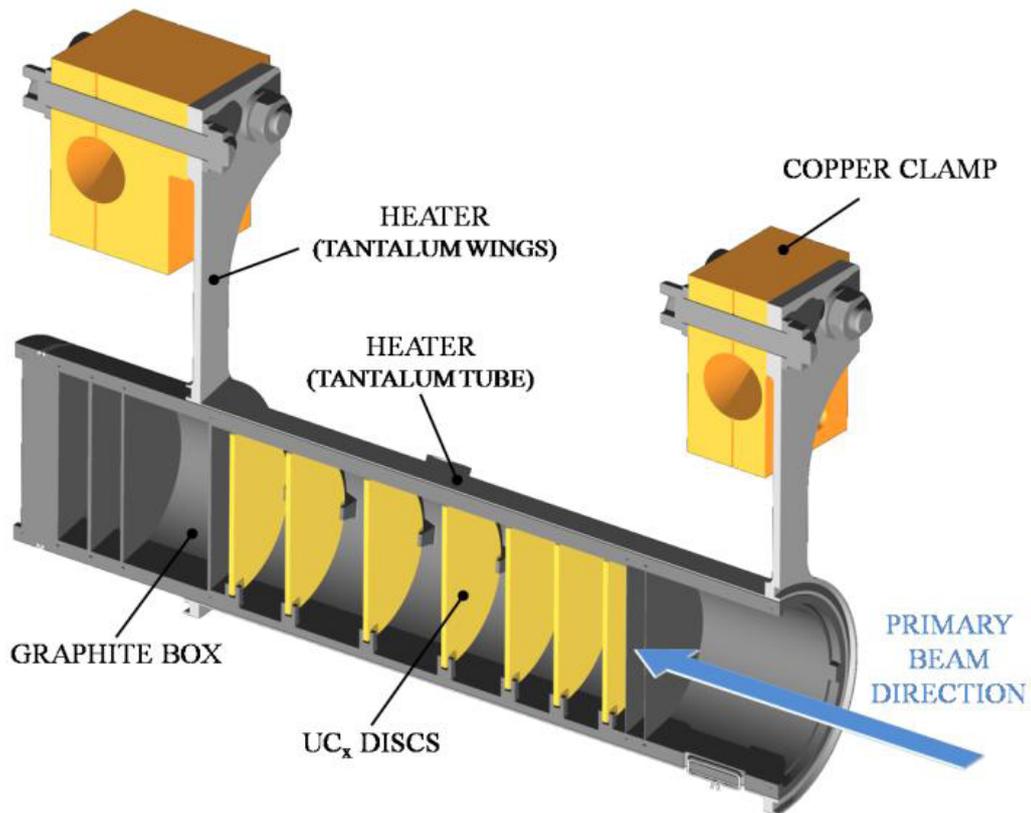


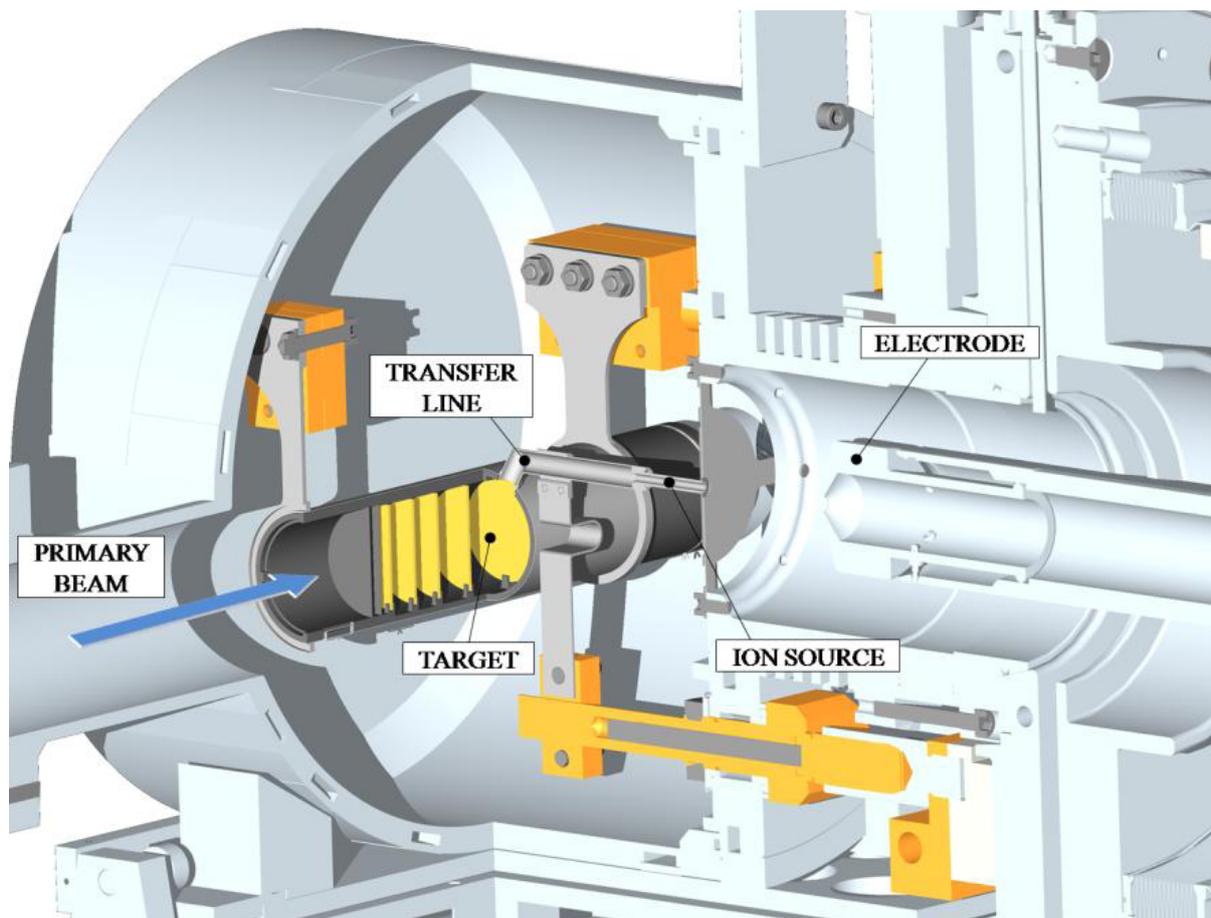
Figura 1-7: Blocco target del progetto SPES



Figura 1-8: Blocco target del forno di produzione (usato per trattamenti termici materiali) a) – Blocco target del forno HT alte temperature (usato per lo studio delle deformazioni meccanico-strutturali) b)

Il riscaldatore è composto da un sottile tubo (*tube*), 2÷3 mm di spessore, saldato ai bordi a due ali (*wings*) direttamente collegate ai morsetti in rame (*clamps*) attraverso i quali scorre la corrente elettrica e si porta a dissipare, per effetto Joule, il desiderato quantitativo di potenza al riscaldatore (stimata in circa 2 kW). La dissipazione di potenza (dovuta all'effetto Joule) in aggiunta al calore sviluppato dalla fissione nucleare (in totale 8+2=10 kW), fanno sì che la temperatura del sistema contenitore-dischi sia mantenuta ad un valore ottimale.

Il materiale di cui è costituito il riscaldatore è il tantalio, metallo altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre facilmente energia elettrica e termica e consente di raggiungere temperature molto elevate (2400°C in alto vuoto). Inoltre alle alte temperature è dotato di elevata plasticità, perciò può subire deformazioni termiche anche importanti senza rischio di rottura in caso di improvvisi sbalzi termici.



**Figura 1-9: Rappresentazione del sistema di estrazione ed ionizzazione**

Il processo di fissione nucleare, che si manifesta quando il fascio di protoni investe i 7 dischi in  $UC_x$ , 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* ed ionizzata. Questo processo richiede tempo e non può essere applicato ad isotopi aventi una vita media inferiore a poche decine di millisecondi.

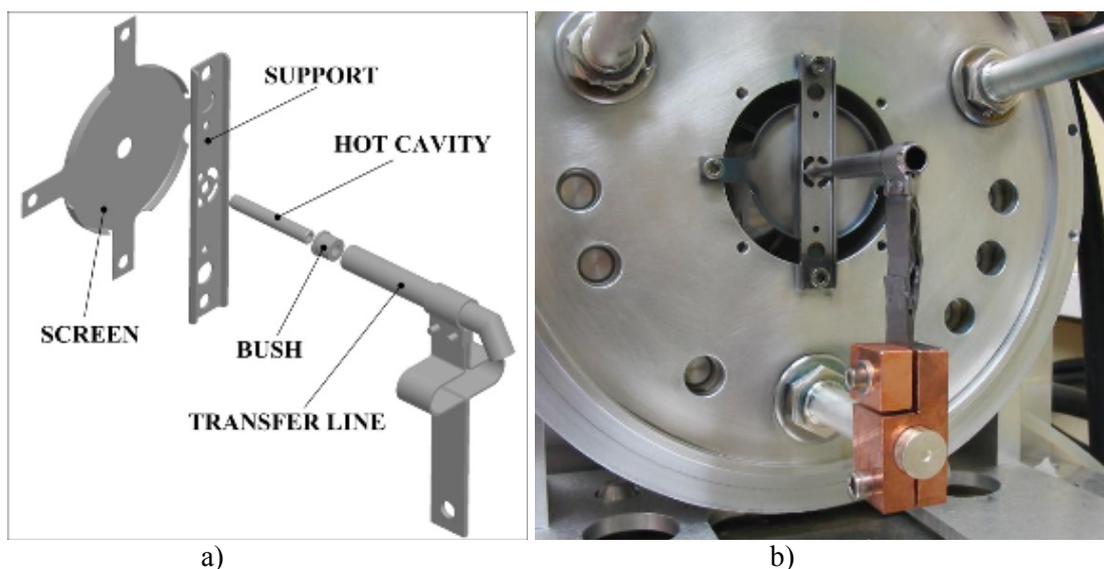
Il processo di estrazione avviene mediante la linea di trasferimento (*transfer line*), attraverso la quale gli isotopi in uscita dal *target* vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove sono ionizzati positivamente (ioni  $+I$ ).

La configurazione attuale della linea di trasferimento prevede un tubo sottile in tantalio saldato al riscaldatore ad un'estremità e connesso meccanicamente alla sorgente di ionizzazione all'estremità opposta (Figura 1-9).

Come accade per il riscaldatore, anche il sistema che comprende la linea di trasferimento e la sorgente di ionizzazione viene riscaldato mediante dissipazione di potenza per effetto Joule mediante il collegamento con un ulteriore morsetto elettrico ( la temperatura della sorgente arriva a sfiorare i  $2400^{\circ}C$  ).

Esistono differenti tipologie di sorgenti di ionizzazione: sorgenti con ionizzazione superficiale, sorgenti laser (RILIS), sorgenti al plasma (FEBIAD) o sorgenti ECR (*Electron Cyclotron Resonance*); la scelta delle quali è legata al tipo di elemento di cui si vuole produrre il fascio radioattivo ed all'intensità e qualità del fascio. La *facility* SPES viene inizialmente progettata in riferimento a due diverse tipologie di sorgente: una sorgente con ionizzazione di tipo superficiale (*Surface Ion Source*) ed una sorgente con ionizzazione laser (RILIS, *Resonant Ionization Laser Ion Source*) [6].

Per entrambe le tipologie di ionizzazione elencate in precedenza si fa riferimento alla medesima architettura (Figura 1-10).



**Figura 1-10: a) Sorgente di ionizzazione del progetto SPES - b) Prototipo della sorgente del progetto SPES**

Il componente principale della sorgente è la *hot cavity*, si tratta di un tubicino in tungsteno all'interno del quale avviene la ionizzazione. Il collegamento con la linea di trasferimento è realizzato attraverso un tappo (*bush*) in tantalio, sul quale vanno in battuta sia la linea di trasferimento sia la *hot cavity*.

Tra supporto e flangia principale viene interposto uno schermo (*screen*) in tantalio.

Nella tecnica di ionizzazione in linea (*Surface Ion Source*) gli isotopi radioattivi provenienti dal *target* strisciano sulla superficie interna della *hot cavity* e vengono ionizzati positivamente (ioni  $+I$ ) a causa della cessione degli elettroni.

Questo particolare fenomeno si manifesta solo se la minima energia necessaria per rimuovere un elettrone da una superficie (funzione di lavoro) è maggiore del potenziale di ionizzazione dell'isotopo (ad esempio, la funzione di lavoro del tungsteno è pari a circa  $5\text{ eV}$ ).

Per mezzo della sorgente di ionizzazione sopra descritta è quindi possibile produrre un fascio di ioni utilizzando gli elementi caratterizzati da bassa energia di ionizzazione, come gli elementi alcalini ed alcalini terrosi. Inoltre con tale tipologia di sorgente è possibile ottenere anche fasci di atomi esotici ionizzati negativamente; la produzione di questi è comunque molto complicata.

La difficoltà risiede nel fatto che per accelerare un fascio di ioni negativi è necessario invertire la differenza di potenziale tra la linea di trasporto del fascio ed i sistemi di post-accelerazione, ciò è possibile soltanto utilizzando speciali dispositivi denominati *exchange devices*.

Il metodo RILIS [17], che utilizza la stessa architettura della tecnica di ionizzazione superficiale, è un

potentissimo strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per le *facilities* di tipo ISOL. Esso fornisce un processo di ionizzazione selettiva e garantisce l'eliminazione di contaminazioni indesiderate a livello di sorgente di ionizzazione.

La formazione dello ione  $+I$  avviene utilizzando un laser caratterizzato dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento chimico da ionizzare) aventi lunghezze d'onda differenti, corrispondenti a diversi valori energetici ( $E = h \cdot f$ , dove  $h$  è la costante di Plank ed  $f$  è la frequenza d'onda), che vengono proiettati all'interno della *hot cavity*.

Il laser irradia gli isotopi e fornisce loro l'energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali esterni fino sino alla separazione dall'atomo.

La tecnica di ionizzazione al plasma (*Plasma Ion Source*) utilizza un'architettura completamente diversa dalle sorgenti descritte in precedenza. Permette di ionizzare anche elementi riportati nelle ultime due colonne della tavola periodica e caratterizzati da un alto potenziale di ionizzazione.

Il principale problema di questa metodologia è la pessima selettività.

Infatti l'energia media fornita è tale da ionizzare tutti gli elementi presenti nel target.

Ne consegue che il fascio di ioni prodotto non risulta sufficientemente puro, si ottengono efficienze minori rispetto alle tecniche al laser e superficiale.

### 1.1.3 Front-End

Il sistema target-camera viene collegato ad un impianto più complesso detto *front-end*.

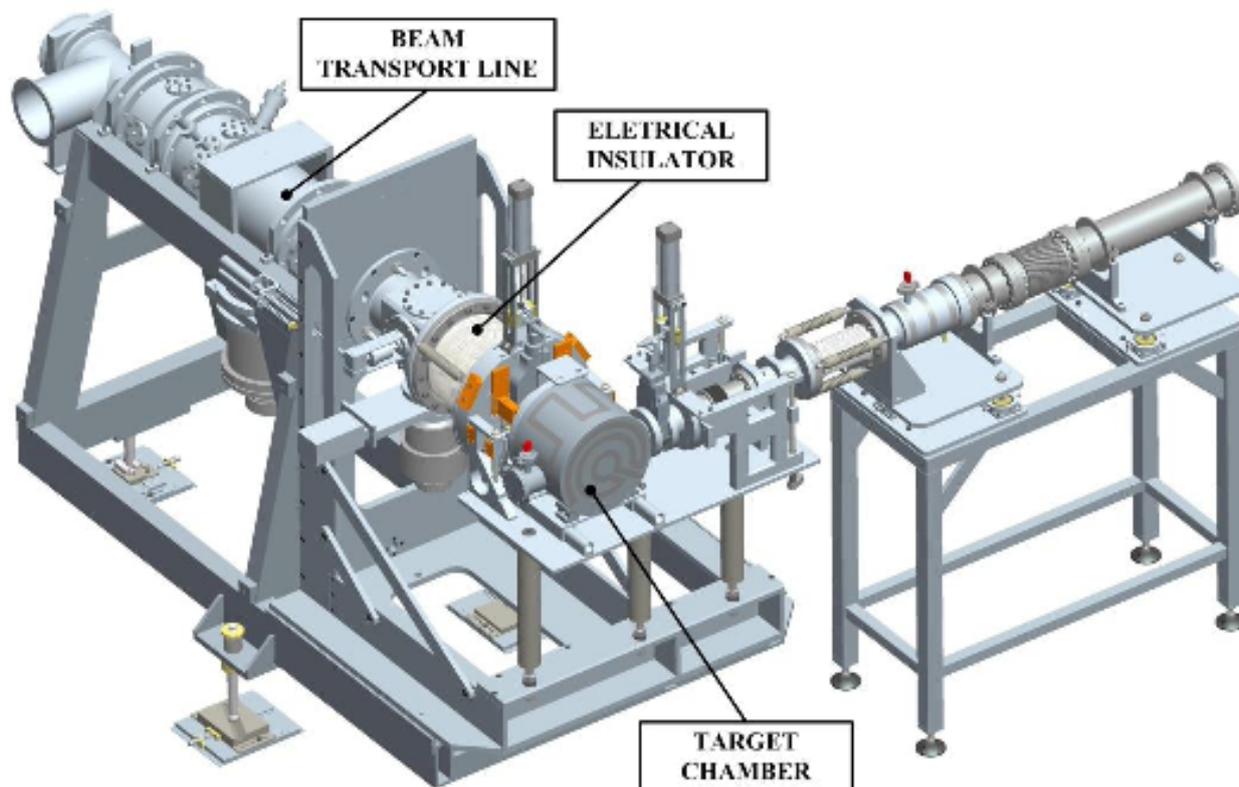


Figura 1-11: Rappresentazione del front-end del progetto SPES

La camera target viene collegata al sistema di trasporto del fascio (*beam transport*). Tra i due componenti è presente una differenza di potenziale pari a  $60\text{ kV}$  ed è quindi necessario, al fine di evitare il contatto diretto, interporre un isolatore elettrico (*electrical insulator*) come rappresentato in Figura 1-11.

Il materiale scelto per l'isolatore è l'allumina che rappresenta un materiale dotato di eccellente capacità di isolamento elettrico e di un'ottima tenuta del vuoto. A svantaggio, però, di un'elevata fragilità strutturale e di un'elevato costo di acquisto e d'installazione.

La differenza di potenziale presente attira gli ioni radioattivi verso il sistema di trasporto del fascio. Il dispositivo che accoglie gli ioni in uscita dalla sorgente di ionizzazione è l'elettrodo (*electrode*) realizzato in lega di titanio *Ti6Al4V* e visibile in Figura 1-9.

In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che, in seguito al passaggio attraverso i separatori elettromagnetici ed il post-acceleratore, viene inviato alle sale sperimentali.

#### 1.1.4 Separatori elettromagnetici e post-acceleratori

Il fascio di ioni radioattivi estratto dalla sorgente di ionizzazione viene sottoposto ad una prima fase di purificazione mediante un separatore di massa noto come "filtro di Wien", che consente di selezionare i vari elementi in base alle loro masse atomiche.

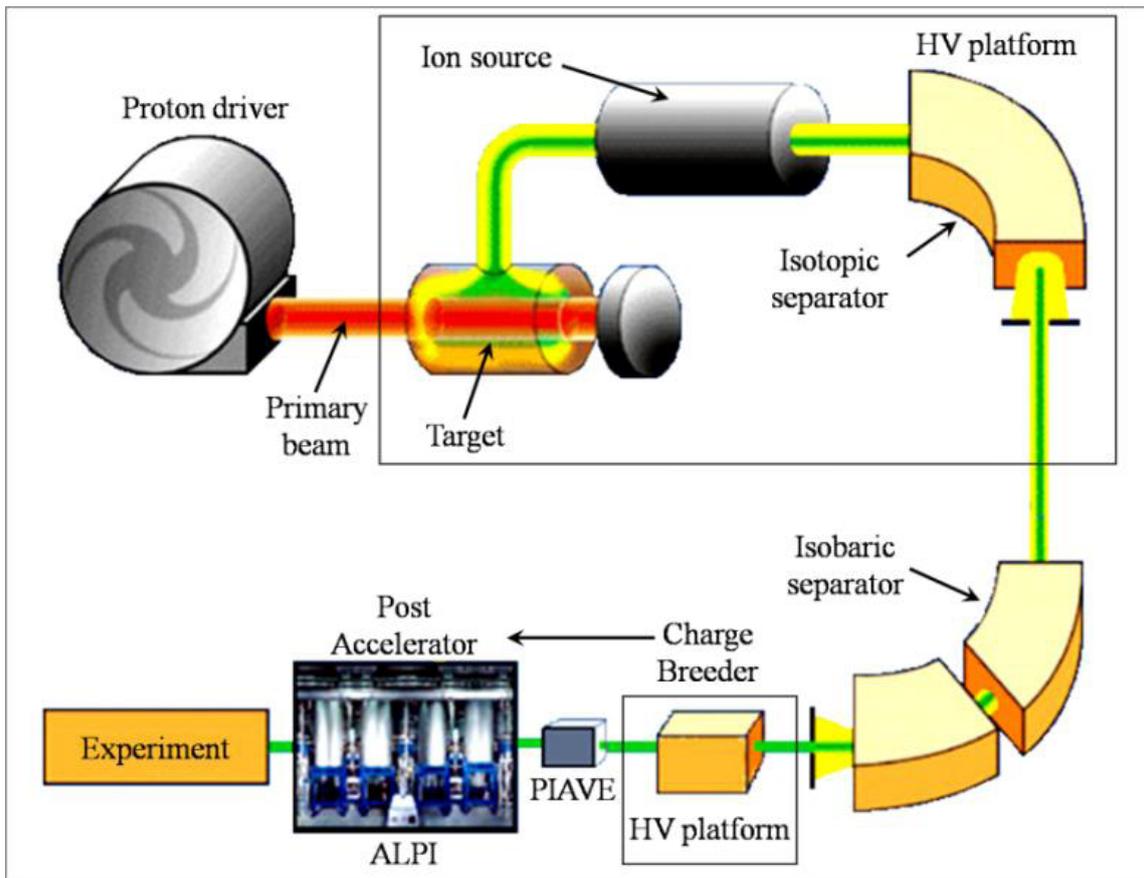
Così facendo il separatore allontanata la maggior parte dei contaminati.

La risoluzione del dispositivo ( $M/\Delta M$ , dove  $M$  rappresenta la massa dell'isotopo) è pari a circa 300.

La seconda fase di purificazione viene effettuata da un separatore isobaro (o spettrometro ad alta risoluzione), avente risoluzione pari a  $1/15000$ , che permette quindi di separare gli isotopi tra loro isobari, cioè aventi lo stesso numero atomico (Ad esempio il  $^{132}\text{Cs}$  e il  $^{132}\text{Sn}$ ).

Per migliorare la capacità del separatore isobaro è necessario operare con un'energia in ingresso dell'ordine dei  $200\text{ keV}$ , valore di energia raggiungibile se il target ed il primo separatore vengono entrambi installati su una piattaforma di alto voltaggio a  $250\text{ keV}$  (piattaforma HV).

A questo punto il fascio radioattivo può essere direttamente convogliato alle sale sperimentali che richiedono fasci a bassissima energia, oppure essere post-accelerato. La post-accelerazione viene ottimizzata mediante l'impiego di un *Charge Breeder* che rappresenta un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni prima dell'iniezione del fascio esotico attraverso PIAVE, che rappresenta il primo stadio di post-accelerazione prima dell'ingresso nell'acceleratore ALPI (acceleratore LINAC superconduttore).



**Figura 1-12: Rappresentazione schematica della facility SPES**

Il complesso PIAVE-ALPI è già presente da molti anni ai LNL e di recente il suo funzionamento è stato notevolmente migliorato. Infatti, oltre a consentire la produzione di fasci di ioni stabili, è anche in grado di essere impiegato come un acceleratore di RIB. In Figura 1-12 viene rappresentata lo schema della facility SPES per la produzione di fasci di ioni esotici e vengono evidenziati i principali blocchi descritti in precedenza.

## 1.2 *Applicazione dei fasci di ioni esotici*

### 1.2.1 Applicazione in fisica nucleare [7]

#### *Miglioramento e verifica del Modello Standard*

Il modello standard della fisica delle particelle è una teoria che descrive insieme tre delle quattro forze fondamentali, cioè l'interazione nucleare forte, l'elettromagnetismo e l'interazione nucleare debole (queste ultime due unificate nell'interazione elettro-debole), nonché la funzione e le proprietà di tutte le particelle che costituiscono la materia.

Nonostante il suo successo, tale modello non è del tutto soddisfacente, poiché dipende in modo sostanziale da alcune assunzioni fatte *ad-hoc*.

Elaborati esperimenti di fisica nucleare, suggeriti da convincenti basi teoriche, sono stati ideati allo scopo di chiarire l'origine di queste assunzioni e pervenire così all'unificazione delle interazioni fondamentali. Tali esperimenti prevedono precise misure delle proprietà di decadimento di alcuni nuclei, che possono essere effettuate proprio utilizzando come sorgente pura di ioni, i fasci di ioni radioattivi prodotti dalle *facilities*.

#### *Studio della struttura di nuclei complessi*

I nucleoni (protoni e neutroni) sono costituiti da sub-particelle chiamate *quark*, esse esercitano un effetto fisico anche oltre i nucleoni nei quali sono confinati: in particolare le interazioni tra i nucleoni all'interno del nucleo sono diverse da quelle esistenti tra due nucleoni liberi, in quanto esse dipendono anche dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Al momento, non esiste una formula generale che consenta di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i nuclei rappresentati nella Figura 1-1, in quanto i calcoli quantomeccanici sono applicabili unicamente ai nuclei più leggeri; ciò nonostante i fasci di ioni radioattivi possono fornire un prezioso contributo all'obiettivo della fisica nucleare di ottenere una trattazione unitaria che:

- a) permetta di derivare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari;
- b) elimini le incongruenze dei modelli correnti;
- c) sia applicabile anche ai nuclei aventi rapporto protoni/neutroni estremo (nuclei esotici).

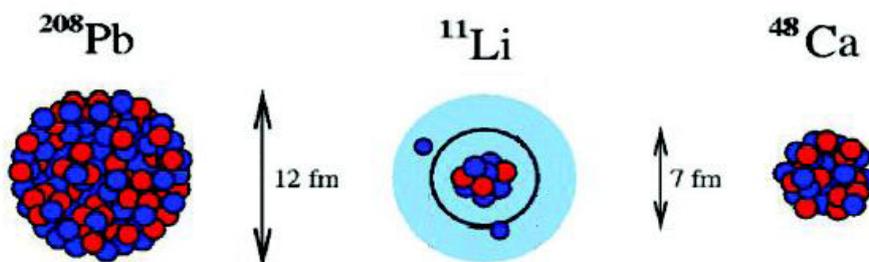
A questo proposito i fasci di ioni radioattivi possono fornire un prezioso contributo.

#### *Misura della dimensione del nucleo: i nuclei "Halo"*

La dimensione del nucleo è legata al numero totale di nucleoni che lo costituiscono dalla semplice relazione  $R = R_0 A^{1/3}$ , dove  $R$  è il raggio nucleare ed  $R_0$  una costante pari a  $1.2 \text{ fermi}$  (dove  $1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$ ). Tuttavia, allontanandosi dalla valle di stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni da tale legge, in quanto le energie di legame tra le particelle di uno stesso nucleo possono diventare così piccole da causare la formazione di nuclei particolari, chiamati "ad anello" (nuclei *Halo*).

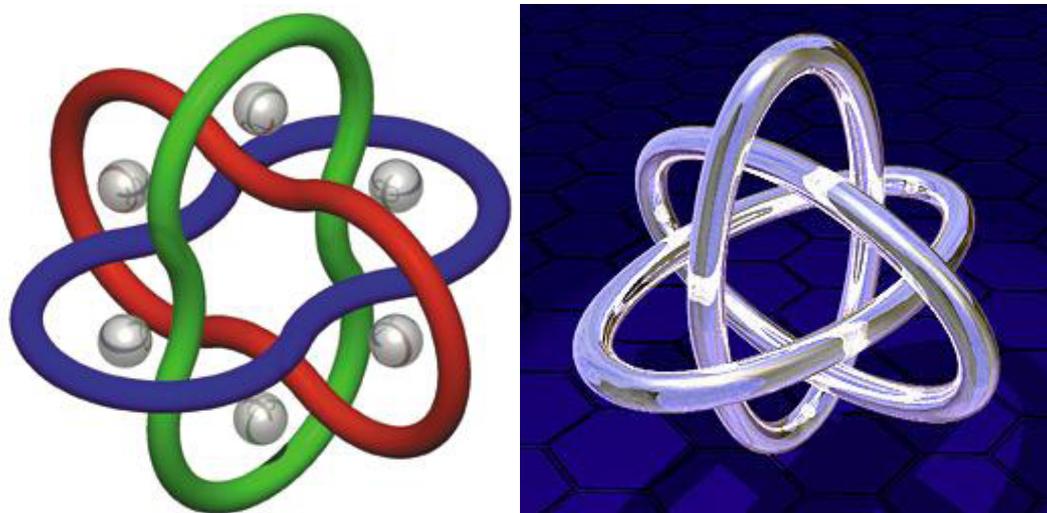
I nuclei *Halo* sono caratterizzati da una diversa collocazione dei neutroni; tali nuclei possiedono molti più neutroni dei rispettivi isotopi stabili, inoltre uno o due neutroni, essendo debolmente legati al nucleo, orbitano attorno ad esso (neutroni di valenza).

Un esempio di nucleo *Halo* è il  $^{11}\text{Li}$ ; esso ha una dimensione media del nucleo paragonabile a quella del  $^{48}\text{Ca}$ , se però si considera l'alone, racchiuso dalle orbite dei due elettroni di valenza presenti, il nucleo assume dimensioni paragonabili a quelle del  $^{208}\text{Pb}$  (Figura 1-12).



**Figura 1-13: Paragone tra la dimensione del nucleo di  $^{11}\text{Li}$  e quella di altri nuclei più massivi**

Il nucleo  $^{11}\text{Li}$  è un sistema a tre corpi (i due neutroni esterni ed il *core*) e rappresenta un esempio naturale di sistema “Borromeico” (Figura 1-13); in topologia, i tre anelli borromeici sono legati l’un l’altro in modo tale che la rottura di uno permetta la separazione degli altri due. I nuclei ad anello sono anche chiamati “nuclei borromeici” proprio perché se uno dei loro costituenti viene a mancare, gli altri divengono immediatamente instabili e si possono a loro volta allontanare facilmente.



**Figura 1-14: Rappresentazione degli anelli Borromeici**

Attualmente, per la misura della distribuzione di protoni, sulla base di esperimenti di spettroscopia atomica, si usano fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collimata; per la determinazione della distribuzione di tutti i nucleoni, vengono invece impiegati fasci radioattivi ad alta energia.

### *Produzione di elementi superpesanti (SHE)*

Gli elementi naturali dall'Idrogeno all'Uranio sono circa 90, ma negli ultimi anni l'utilizzo di reazioni di fusione nucleare ha permesso la sintesi di nuovi elementi di elevato peso atomico, estendendo il numero dei costituenti della tavola periodica sino all'elemento avente numero atomico 112 e prospettando un'ulteriore estensione a 116.

In particolare questi elementi, chiamati superpesanti (nei quali si ha una fortissima repulsione colombiana) sembra riescano a formarsi attorno alla cosiddetta "Isola di Stabilità" (una combinazione di 114 protoni e 184 neutroni che sembra garantire la stabilità del nucleo).

La recente disponibilità di fasci intensi, costituiti da nuclei instabili ricchi di neutroni (*neutron-rich*), accoppiati a *target* stabili, anch'essi ricchi di neutroni, potrebbe sbarrare definitivamente la strada ad uno studio e ad una indagine accurata di tale fenomeno.

### 1.2.2 Applicazioni in fisica dello stato solido

La tecnica *Radio Tracer Diffusion*, nata nel 1920, consiste nell'impiantare all'interno di un sistema solido dei nuclei radioattivi e di studiarne il decadimento, rilevando le particelle o la radiazione gamma da essi emessa. Tale tecnica permette di captare segnali anche da pochissimi atomi e rappresenta uno dei metodi più comuni per studiare i processi di diffusione atomica nei solidi [8]. Il sistema ospitante può essere drogato con i radioisotopi "sonda" per diffusione, tramite reazione nucleare, oppure per impianto ionico; la scelta dell'atomo radioattivo da utilizzare per un determinato esperimento viene fatta in base alla natura chimica e alle proprietà nucleari di quest'ultimo.

L'uso della tecnica *Radio Tracer Diffusion* consente di:

- 1) osservare, tramite i prodotti di decadimento, l'interazione tra l'atomo sonda e l'intorno reticolare che lo circonda;
- 2) ottenere informazioni riguardanti il campo elettrico e magnetico all'interno del cristallo;
- 3) studiare i processi diffusivi e le interazioni tra gli atomi sonda;
- 4) indagare i tipi di difetti presenti nel cristallo.

### *Drogaggio dei semiconduttori*

Lo sviluppo di semiconduttori di piccole dimensioni aventi caratteristiche ottiche ed elettriche ottimali richiede un controllo completo dei difetti che governano tali proprietà, sia intrinseci (come le vacanze interstiziali) che estrinseci (come i droganti e le impurità atomiche). Per tale motivo sia la ricerca di base che quella applicata stanno concentrando notevoli sforzi nello studio dei difetti e dell'attivazione elettrica dei droganti in diversi semiconduttori.

Analogamente agli isotopi stabili, gli isotopi radioattivi influenzano le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori in base alla loro natura chimica ed alla loro posizione all'interno del

reticolo cristallino. In particolare, poiché le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori dipendono oltre che dal tipo di semiconduttore anche dalle sue dimensioni, si è dimostrato che in semiconduttori molto piccoli tali proprietà possono essere sensibilmente alterate da un difetto presente con concentrazione minore di  $10^{12}$  atomi/cm<sup>3</sup>.

Per controllare in maniera affidabile le prestazioni dei semiconduttori sono quindi necessarie tecniche sperimentali che combinino un'alta sensibilità chimica con un'alta sensibilità per la determinazione di basse concentrazioni di difetti. Per decenni la principale tecnica di rilevazione delle impurezze all'interno di un cristallo è stata il channeling: in tale tecnica un fascio di ioni viene guidato lungo le righe atomiche o lungo i piani del cristallo (canali), tuttavia non è possibile determinare concentrazioni di difetti inferiori a  $10^{18}$  atomi/cm<sup>3</sup>.

La sensibilità di tale tecnica può essere profondamente aumentata impiantando all'interno del cristallo impurezze radioattive che emettono particelle cariche (emission channeling).

La misura dell'emissione lungo differenti direzioni cristalline permette la determinazione del sito cristallografico dell'atomo emittente con un'accuratezza di pochi decimi di Å.

### 1.2.3 Applicazioni mediche: Tomografia ad Emissione Positronica [9]

Prima di procedere si forniscono alcune fondamentali definizioni:

- *L'antimateria* è la materia composta da antiparticelle, cioè particelle aventi la stessa massa e caratteristiche opposte a quelle che costituiscono la materia ordinaria.
- *Il positrone* (detto anche antielettrone) è l'equivalente di antimateria dell'elettrone ed ha carica elettrica pari a  $+1$ . Quando un positrone si annichila con un elettrone, la loro massa viene convertita in energia, sotto forma di due fotoni ad altissima energia nella banda dei raggi gamma. Un positrone può essere generato dal decadimento radioattivo con emissione di positroni, o dall'interazione con la materia di fotoni con energia superiore a  $1,022$  MeV.

Sebbene utilizzata principalmente per studiare le interazioni tra particelle elementari, l'antimateria ha anche un'applicazione tecnologica: la Tomografia ad Emissione Positronica (PET, *Positron Emission Tomography*) una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che utilizza l'emissione di positroni per realizzare immagini tridimensionali o mappe ad alta risoluzione degli organi interni dei pazienti.

La procedura PET inizia con l'iniezione (generalmente per via endovenosa) nel soggetto da esaminare, di un isotopo tracciante di breve vita media, legato chimicamente ad una molecola attiva a livello metabolico. Dopo un tempo di attesa durante il quale la molecola metabolicamente attiva (spesso uno zucchero), raggiunge una determinata concentrazione all'interno dei tessuti organici da analizzare, il soggetto viene posizionato nello scanner (Figura 1-15).

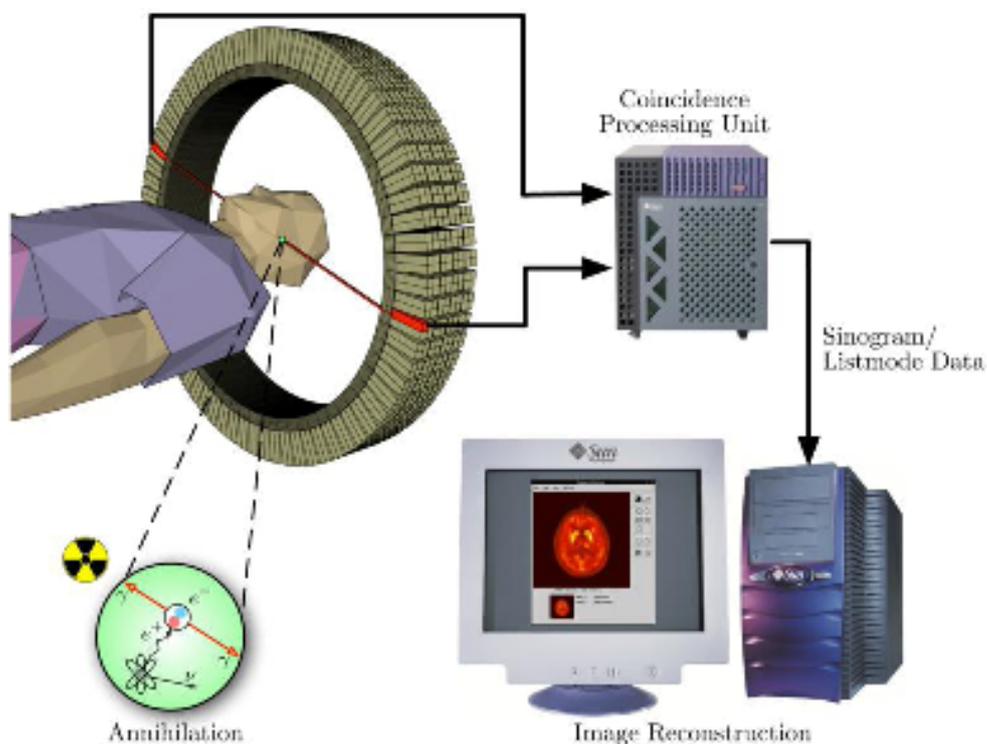


**Figura 1-15: Scanner impiegato nella tecnica di rilevazione PET**

L'isotopo di breve vita media decade, emettendo un positrone.

Dopo un percorso che può raggiungere al massimo pochi millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di fotoni (di energia paragonabile a quella dei raggi  $\gamma$ ) emessi in direzioni opposte fra loro (sfasate di  $180^\circ$  lungo una stessa retta); questi fotoni sono successivamente rilevati dal dispositivo di scansione grazie anche all'impiego di speciali tubi fotomoltiplicatori.

Punto cruciale della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni: i fotoni che non raggiungono il rilevatore in coppia, cioè entro un intervallo di tempo di pochi nanosecondi, non sono presi in considerazione; dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il rilevatore (ogni coppia di fotoni individua una retta), si può ricostruire la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente con due coppie di fotoni, e dunque con due rette, è possibile individuare il punto di emissione dei fotoni), permettendo la determinazione dell'attività o dell'utilizzo chimico all'interno delle parti del corpo investigate.



**Figura 1-16: Schema riassuntivo della tecnica di analisi PET**

Lo scanner utilizza la rilevazione delle coppie di fotoni per mappare la densità dell'isotopo nel corpo; la mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola campione si è maggiormente concentrata e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di determinare una diagnosi ed il conseguente trattamento. Spesso, e sempre più frequentemente, le scansioni della Tomografia a Emissione di Positroni sono raffrontate con le scansioni a Risonanza Magnetica Nucleare, fornendo informazioni sia anatomiche e morfologiche, sia metaboliche (in sostanza, su come il tessuto o l'organo siano conformati e su cosa stiano facendo).

La PET è usata estensivamente in oncologia clinica (per avere rappresentazioni dei tumori e per la ricerca di metastasi) e nelle ricerche cardiologiche e neurologiche. Ad ogni modo, mentre gli altri metodi di scansione, come la TAC e la RMN permettono di identificare alterazioni organiche e anatomiche nel corpo umano, le scansioni PET sono in grado di rilevare alterazioni a livello biologico molecolare che spesso precedono l'alterazione anatomica, attraverso l'uso di marcatori molecolari che presentano un diverso ritmo di assorbimento a seconda del tessuto interessato. Con una scansione PET è possibile visualizzare e quantificare con discreta precisione il cambio di afflusso sanguigno nelle varie strutture anatomiche (attraverso la misurazione della concentrazione dell'emettitore di positroni iniettato). I radionuclidi utilizzati nella scansione PET sono generalmente isotopi con breve tempo di dimezzamento, come  $^{11}\text{C}$  (~20min),  $^{13}\text{N}$  (~10min),  $^{15}\text{O}$  (~2min) e  $^{18}\text{F}$  (~110min).

Per via del loro basso tempo di dimezzamento, i radioisotopi devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scanner PET. La PET gioca un ruolo sempre maggiore nella verifica della risposta alla terapia, specialmente in particolari terapie anti-cancro; si prospettano dunque per essa sempre maggiori applicazioni e sviluppi.

### 1.2.4 La terapia per la Cattura Neutronica nel Boro (BNCT) [9]

La terapia per cattura neutronica nel boro (BNCT) è un trattamento binario che sfrutta la reazione  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  che si verifica in seguito all'assorbimento di neutroni termici ( $E < 1\text{eV}$ ) da parte di nuclei di  $^{10}\text{B}$  trasportati con un opportuno carrier nelle cellule neoplastiche.

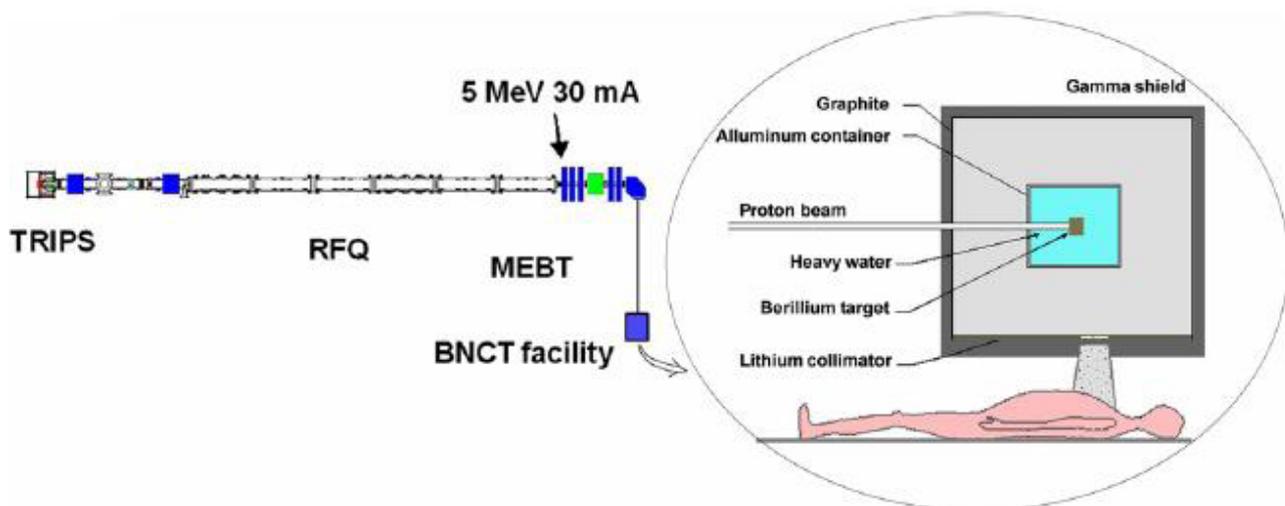
Per tumori superficiali (melanoma maligno) e tumori in organi espuntiabili si utilizzano sorgenti di neutroni termici; per tumori profondi (gliomacerebrale) si utilizzano sorgenti di neutroni epidermici. Si stanno studiando nuovi composti del boro e del gadolinio in grado di ottimizzare il rapporto dose al tumore /dose al tessuto sano.

L'applicazione SPES-BNCT sarà la principale utilizzatrice interdisciplinare della facility SPES.

Tale struttura utilizza l'intenso raggio protonico fornito dalla prima fase di accelerazione SPES, l'RFQ, attraverso una reazione (p,n) in un target di Berillio. La fonte di neutroni fornita viene quindi rallentata fino ad un livello energetico termico, mediante un opportuno dispositivo per la traslazione dello spettro. Questo per fornire, nel punto di irraggiamento del raggio, un flusso termico di neutroni di almeno  $10^9\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , richiesto per il trattamento del paziente.

Attraverso tale facility, si preveder di analizzare il trattamento del melanoma cutaneo pigmentato. (12)

I punti focali a cui è volto il programma di ricerca sono principalmente il progetto dell'impianto d'irradiazione dei neutroni, lo sviluppo di un nuovo trasportatore al Boro, ed un nuovo sistema di monitoraggio della dose biologica on-line su tessuti tumorali e sani.



**Figura 1-17: schema della facility di irradiazione SPES**

Nel frattempo è stato testato su di un fascio di elettroni un prototipo di convertitore ad alta potenza fatto in berillio. È stato testato anche un impianto di dimostrazione a bassa potenza è stato testato sull'acceleratore CN (INFN-LNL). È stato costruito un prototipo micro dosimetrico e testato con neutroni termici al reattore TAPIRO(ENEA Acacia). Inoltre, al reattore TAPIRO un gruppo interdisciplinare sta portando avanti un intenso programma di ricerca che comprende test "in vitro" ed "in vivo" di nuove molecole di carrier sotto irradiazione di neutroni termici.

### 1.2.5 Applicazione in astrofisica [10]

L'astrofisica nucleare gioca un ruolo fondamentale nella comprensione della struttura, evoluzione e composizione dell'Universo e dei suoi costituenti.

Le stelle generano energia attraverso reazioni nucleari coinvolgenti sia nuclei stabili che radioattivi. A volte, il consumo del carburante nucleare procede stabilmente e dura bilioni di anni, altre volte è esplosivo e dura pochi minuti o pochi secondi. Nelle differenti fasi della consunzione delle stelle vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia tramite processi di nucleo-sintesi che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi che si svolgono in un territorio sconosciuto. Per sviluppare un modello che descriva il meccanismo di nucleo-sintesi, è necessario misurare le rese delle reazioni nucleari relative ai principali cicli astrofisici e le caratteristiche di decadimento di molti 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.



## 2. I forni di produzione del progetto SPES

La produzione del fascio radioattivo è strettamente legata alle caratteristiche del target (illustrato nel precedente capitolo) colpito dal raggio protonico.

La composizione ed il livello di purezza dei materiali costitutivi, la microstruttura e la morfologia (fase cristallina, porosità, dimensione dei grani) del target sono di particolare importanza per la qualità del fascio. Il tipo di isotopi prodotti dipende dall'energia del raggio incidente e dal materiale fissile, mentre l'efficienza di rilascio è legata soprattutto alla diffusione degli isotopi all'interno del target, nonché alla loro effusione.

La diffusione e l'effusione delle specie radioattive crescono enormemente all' *aumentare della temperatura*. Per questo motivo, la temperatura di lavoro del target deve essere mantenuta il più elevata possibile in modo da garantire che la fase di rilascio sia minore del tempo di decadimento degli atomi.

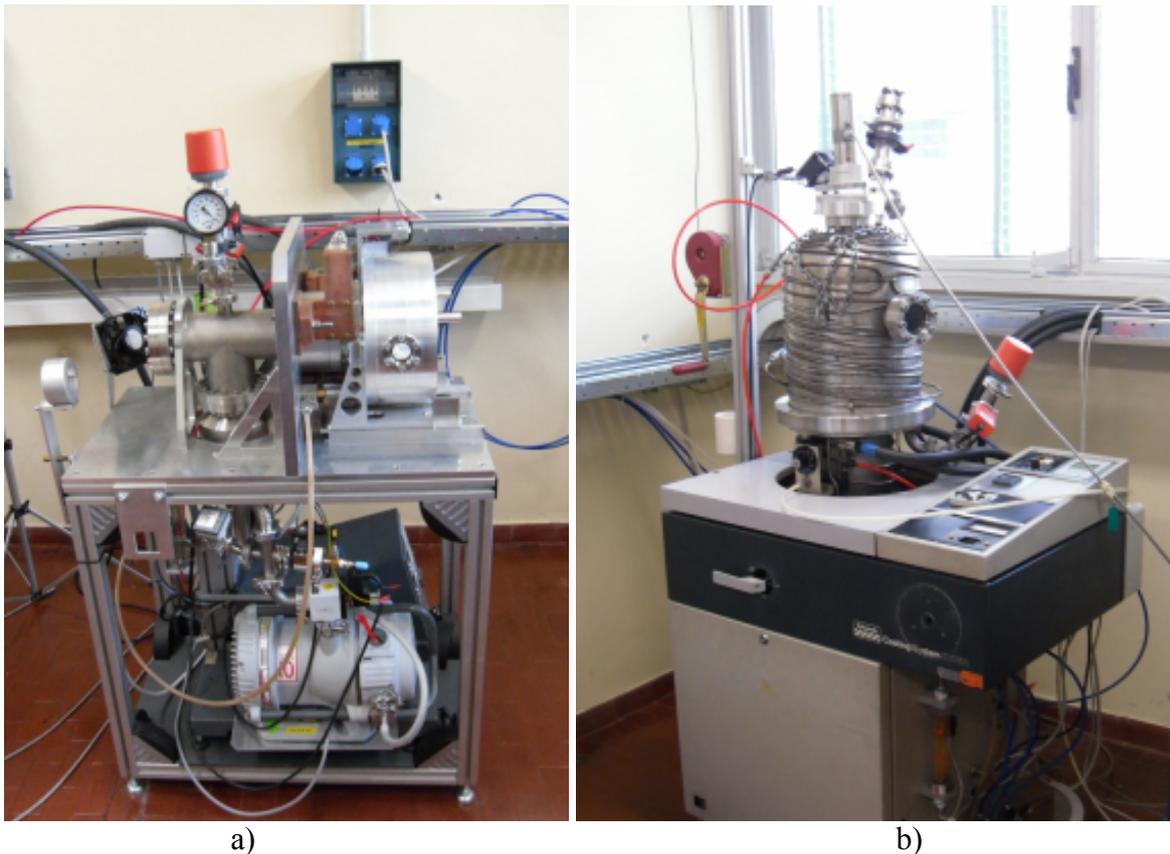
La temperatura di lavoro del target è limitata dalla pressione del vapore dei suoi elementi costituenti, dalla stabilità del target alle alte temperature e dalle possibili reazioni che possono avvenire tra il target ed il contenitore (alle alte temperature).

I forni di produzione rappresentano quindi validi e potenti strumenti per compiere test sperimentali, per effettuare studi qualitativi e quantitativi sui risultati empirici ottenuti, per sviluppare e consolidare nuove o rodiate realizzazioni tecnico-strutturali.

## 2.1 *I forni di produzione*

Sono progettati per trattamenti termici dei materiali e per l'analisi e lo studio delle deformazioni meccanico-strutturali dei componenti. Operano in condizioni di alto vuoto e vengono perennemente raffreddati, grazie ad un impianto di raffreddamento a liquido, nelle possibili zone di contatto per ragioni di sicurezza.

I forni utilizzati nell'ambito del progetto SPES sono 4. Di seguito vengono mostrati i 3 forni presenti ai LNL.



**Figura 2-1: Forni di produzione - a) forno per i test termo-meccanici - b) forno per i test sui materiali**

Il trattamento avviene all'interno di un contenitore accessibile (denominato evaporatore o camera target), attraverso il riscaldamento per effetto joule di un elemento conduttore nel quale vengono collocati i composti da trattare.

L'elemento conduttore può essere un crogiolo di grafite oppure un riscaldatore in tantalio.

Il forno può funzionare in modalità manuale, oppure in modalità remota attraverso un software dedicato (che verrà descritto nel Capitolo 4).

Il forno può rimanere in funzione anche per cicli lunghi (della durata di alcuni giorni).

Il presente tirocinio si è concentrato nello sviluppo e nell'aggiornamento del software di controllo del forno di produzione target (figura 2-2), nonché a seguire e a dirigere le fasi di installazione e di messa in funzione dei moduli di potenza e dei controllori di temperatura (per maggiori dettagli si faccia riferimento al capitolo 5).

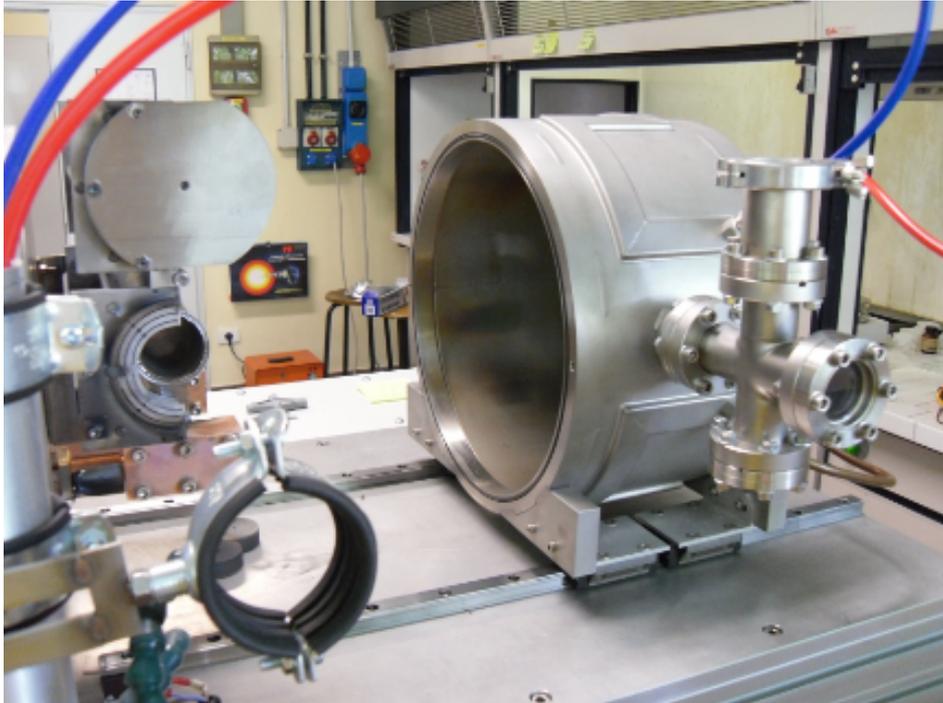


**Figura 2-2: Forno di produzione target**

In seguito viene fornita una presentazione del forno di produzione target in tutte le sue parti.

### 2.1.1 Evaporatore

È costituito da una parte fissa, posizionata sul rack di supporto e da una parte mobile. Quest'ultima ha una forma del tutto simile a quella della camera del target (Figura 2-3). La parte mobile è fissata all'armadio di supporto mediante una guida che le permette di traslare in senso orizzontale (camera) o verticale (campana), ed è percorsa da una canaletta a serpentina che, percorsa da acqua, serve al raffreddamento, durante il funzionamento del sistema.



**Figura 2-3: Evaporatore**

All'interno dell'evaporatore, nella parte fissa del rack, vi è il sistema di riscaldamento costituito da due pinze in rame alle cui estremità viene fissato l'elemento riscaldatore. Le pinze di rame sono direttamente collegate al generatore di corrente e sono percorse dallo stesso liquido di raffreddamento della campana. Come accennato precedentemente, l'elemento riscaldatore può essere un crogiolo di grafite o un riscaldatore in tantalio (Figura 2-4).



**Figura 2-4: Riscaldatore in tantalio del forno di produzione fissato alle pinze in rame**

### 2.1.2 Generatori di potenza

Si tratta di quattro alimentatori TDK-LAMBDA GEN10-330 da 10V e 330A ciascuno, che vengono controllati sia manualmente in locale, sia da software per la gestione da remoto (per maggiori dettagli si faccia riferimento al Capitolo 5).



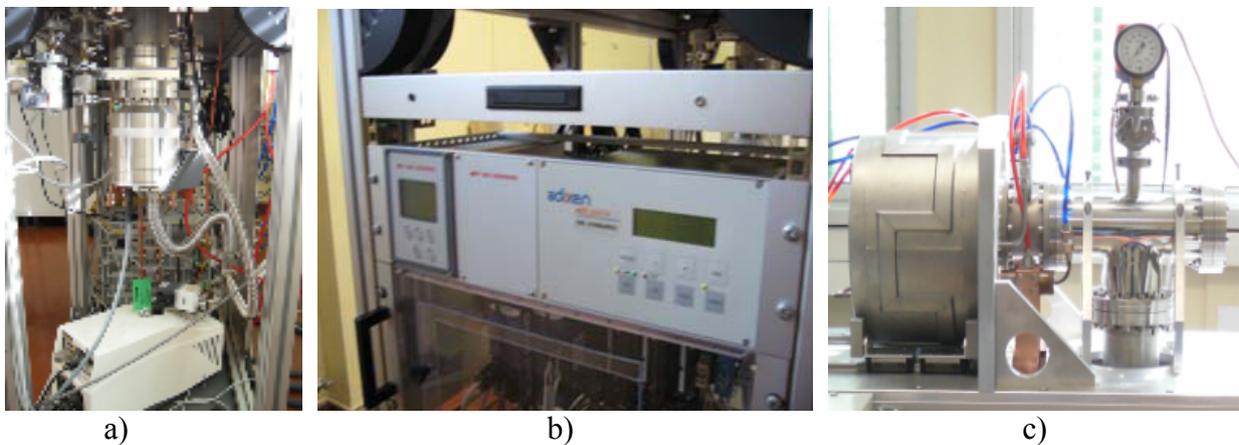
**Figura 2-5: Moduli GEN10-330 installati nel rack del forno di produzione**



**Figura 2-6: Moduli GEN10-330 in configurazione master/slave con uscite di potenza collegate in parallelo**

### 2.1.3 Gruppo di pompaggio a vuoto

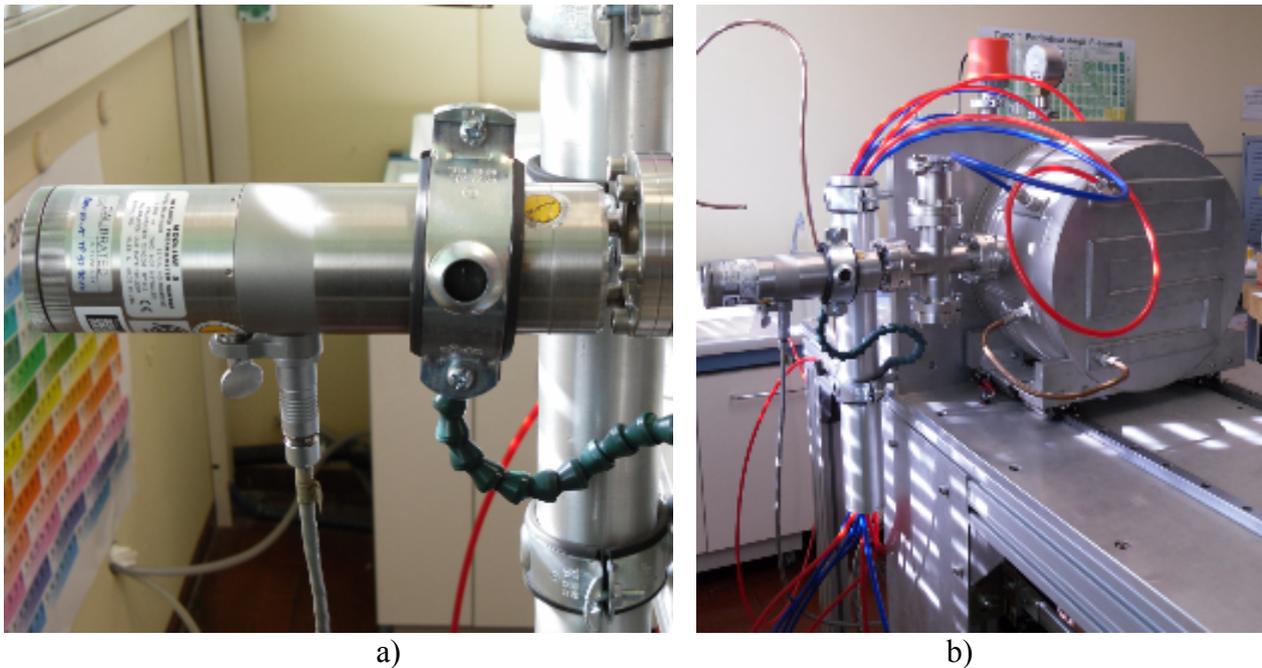
È costituito da una pompa rotativa a secco ed una pompa turbo molecolare, tra le quali è interposta una valvola di isolamento. Vi è un misuratore del vuoto BOC-Edwards – Serie TIC a tre canali completo di teste di misura e relè box per il segnale di sistema in vuoto.



**Figura 2-7: a) In basso pompa rotativa, in alto fissata su flangia, pompa turbomolecolare – b) sistema di controllo pompe – c) testa di misura analogica (display circolare graduato)**

### 2.1.4 Pirometri ottici

Si tratta di pirometri a infrarosso Ircon Modline 5 R- 3015 alimentati in cc 24V per la misura di temperatura, scala da 1000 a 3000 gradi Celsius. Sono presenti delle finestre flangiate in vetro di kodial che accedono direttamente alla camera riscaldante per poter rilevare la temperatura del riscaldatore.



**Figura 2-8: a) Pirometro utilizzato nel forno di produzione – b) pirometro centrato su raccordo flangiato in vetro di kodial**

### 2.1.5 Switch di rete

Dispositivo di rete installato per espandere il numero di porte ethernet allo scopo di fornire un ulteriore collegamento necessario per la connessione tra PC → Controller FieldPoint → Modulo di potenza TDK-Lambda.

### 2.1.6 Termoregolatori Eurotherm 2216e

Si tratta di due termometri a termocoppia con campo misurabile da 0 a 2300 °C.



**Figura 2-9: Termoregolatori per misurazione temperature, applicati nella parte bassa del box del quadro elettrico generale del forno di produzione**

### 2.1.7 Controller Fieldpoint National Instrument

Si tratta di un controller Compact Field Point cFP-2120 della National Instrument. E' indispensabile per il controllo dell'intero sistema, viene connesso al PC tramite lo switch di rete. Dispone di 4 porte di comunicazione seriali dedicate e di una porta ethernet. A questo dispositivo sono collegati tutti gli strumenti sopra citati, oltre ai segnali di interlocking che danno il consenso solo se lo stato di sicurezza del sistema è in condizioni opportune (segnalatori di soglia vuoto raggiunta e presenza del flusso d'acqua nel sistema di raffreddamento). Nel controller viene caricato ed eseguito il programma principale.



**Figura 2-10: Controller FieldPoint cFP-2120 National Instrument**

## 2.1.8 Host PC

Si utilizza un notebook per monitorare le grandezze e lo stato del sistema.



### 3. Il software LabVIEW

LabVIEW è un ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio visuale (o grafico) di National Instruments.

LabVIEW viene utilizzato per interfacciamento con dispositivi di acquisizione e analisi dati, controllo di processi, generazione di rapporti e più generalmente con tutto ciò che concerne l'automazione industriale, con possibilità di esecuzione in diverse piattaforme come Windows, Solaris, Linux, Mac OS, e controllori National Instruments [11,12].

Il programma che si incarica del controllo e della gestione del sistema è stato sviluppato utilizzando questo tipo di linguaggio.

In seguito viene presentato e descritto l'ambiente di sviluppo utilizzato per la stesura del programma di gestione dell'intero sistema.

LabVIEW è un ambiente di sviluppo per applicazioni principalmente orientate a:

- acquisizione, analisi, visualizzazione, elaborazione, memorizzazione di segnali e dati;
- gestione di strumentazione elettronica;
- simulazione ed emulazione di sistemi fisici.

Si presenta come un ambiente di programmazione di tipo grafico ad oggetti, consentendo di realizzare programmi in forma di diagrammi a blocchi.

LabVIEW presenta tutti i tipi di dati e gli operatori predefiniti di uso comune, permettendo di generare nuovi tipi di dati e controllare l'esecuzione dei programmi ricorrendo a strutture di controllo di flusso.

Il programmatore ha a disposizione una serie di librerie che possono essere richiamate ed utilizzate all'interno dei programmi e comprendono:

- funzioni di uso comune: aritmetiche, statistiche, logiche, manipolazione di stringhe, etc..
- funzioni specifiche per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali, per il controllo di strumentazione via interfaccia IEEE-488 o VXI, per la comunicazione seriale, per la comunicazione tramite protocollo TCP/IP, etc...

I programmi realizzati in LabVIEW vengono chiamati strumenti virtuali (VI, Virtual Instrument), poiché nell'aspetto e nel funzionamento sono simili a strumenti fisici, ma l'interazione avviene attraverso un programma in esecuzione, che simula il funzionamento di un dispositivo fisico e che viene compilato solamente da LabVIEW.

Un VI si compone di tre componenti fondamentali:

- 1) Pannello frontale (Front Panel)
- 2) Diagramma a blocchi funzionale (Block diagram)
- 3) Icona/connettore (Icon/connector)

### **1) Pannello Frontale.**

È la finestra che rappresenta l'interfaccia utente del VI ed è costituito da:

- controlli: variabili d'ingresso che possono essere modificate agendo sul pannello frontale, mediante cursori potenziometrici, pulsanti, quadranti ed altri dispositivi d'ingresso. Simulano i dispositivi strumentali d'ingresso e forniscono i dati allo schema a blocchi del VI.
- indicatori: variabili d'uscita, il cui valore può essere modificato da programma e non dall'utente. Fanno parte di questa categoria i grafici, i LED ed altri dispositivi simili. Simulano i dispositivi strumentali di uscita e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera.

L'utente può modificare il valore di alcune grandezze, agendo su manopole o interruttori visualizzati nel programma e può osservare il risultato delle elaborazioni condotte su display grafici molto simili a quelli che si trovano su strumentazione numerica/digitale da laboratorio.

## 2) *Diagramma a blocchi*

Il Block Diagram è costituito dal vero e proprio codice sorgente proposto chiaramente in per via grafica. Gli oggetti del pannello frontale appaiono come terminali sullo schema a blocchi. I terminali rappresentano le porte di ingresso e di uscita dello schema a blocchi. Si incaricano dello scambio di informazioni tra il pannello frontale e lo schema a blocchi stesso.

I terminali sono analoghi a parametri e costanti nei linguaggi di programmazione testuali.

I tipi di terminali includono:

- terminali di controlli e di indicatori: sono i corrispondenti dei controlli ed indicatori selezionati nel pannello frontale. I dati inseriti nei controlli dal pannello frontale, si inseriscono nello schema a blocchi tramite i terminali del controllo. I dati passano poi attraverso varie funzioni. Quando queste completano i loro calcoli, producono nuovi valori dei dati, che arrivano ai terminali indicatori, aggiornando gli indicatori del pannello frontale
- terminali nodo: oggetti dello schema a blocchi che hanno ingressi e/o uscite ed effettuano operazioni quando un VI si trova in esecuzione. Essi sono analoghi a dichiarazioni, operatori, funzioni e subroutine nei linguaggi di strutture. Le strutture sono elementi di controllo del processo, come le strutture Case, i cicli For o While...
- funzioni: sono elementi operativi fondamentali di LabVIEW. Le funzioni non hanno pannelli frontali o schemi a blocchi ma hanno riquadri dei connettori.
- subVI: sono VI costruiti per essere usati all'interno di un altro VI. Ogni VI può essere potenzialmente utilizzabile come subVI.

## 3) *Icona/connettore*

Essendo LabVIEW un linguaggio di programmazione ad oggetti, è facile che un VI venga riutilizzato come subVI (sottoprogramma VI) di un altro VI.

Per far ciò, è necessario definire le variabili in ingresso e quelle in uscita. Le finestre di *icona e connettori* permettono di impostare gli input/output di ciascun VI.

L'*icona* è un simbolo grafico di piccole dimensioni che rappresenta simbolicamente il VI stesso e che permette di trasformare il programma in un oggetto facilmente importabile da un secondo programma. È normalmente visibile nell'angolo in alto a destra della finestra del Front Panel o anche in quella del Block Diagram.

Quando il VI corrente viene impiegato all'interno di un altro programma come sub-VI, l'icona permette di identificare in maniera univoca il sub-VI aggiunto.

Il riquadro dei *connettori* è un insieme di terminali che corrisponde praticamente ai controlli e agli indicatori presenti nel VI stesso (corrispondono ai parametri di chiamata a funzione nei linguaggi di programmazione testuali).

Essi stabiliscono la corrispondenza tra le diverse aree poste sull'icona grafica e i controllori/indicatori del pannello frontale.

### 3.1 *Macchine a stati*

Come noto, una macchina a stati è un'astrazione matematica usata e poiché particolarmente adatta per progettare sistemi digitali o programmi.

Lo schema di progetto della macchina a stati si può usare per implementare ogni algoritmo che può essere esplicitamente descritto da un diagramma di stato o di flusso.

Il modello progettuale della macchina a stati è uno schema di progetto per LabVIEW comune e molto utile.

Le due macchine a stati finiti più comuni sono la macchina di Mealy e la macchina di Moore.

Una macchina di Mealy effettua un'azione per ogni transizione, mentre una macchina di Moore effettua un'azione specifica per ogni stato del diagramma di transizione di stato.

Il vantaggio di usare una macchina a stati consiste nel fatto che una volta creato un diagramma di transizione di stato, si possono facilmente costruire dei VI in LabVIEW che implementano il corretto funzionamento del sistema.

La traduzione del diagramma di transizione di stato in uno schema a blocchi richiede i seguenti componenti infrastrutturali:

- while loop – esegue continuamente i vari stati, implementando il flusso del diagramma di transizione di stato.
- case structure – contiene una condizione per ogni stato ed il codice da eseguire per ognuno di essi
- shift register – contiene informazioni sulla transizione di stato (tiene traccia dello stato corrente e lo comunica all'ingresso della struttura case)
- state functionality code – codice che implementa la funzione dello stato
- transition code – codice che determina lo stato seguente nella sequenza

### 3.2 *Property node*

Consentono di modificare le proprietà di controllori e le proprietà degli indicatori.

Per esempio, agendo sulle property node appropriate è possibile:

- rendere invisibili o disabilitare gli elementi sul pannello frontale
- modificare la lista di opzioni di un menu (ring)
- cambiare i valori di fondo scala degli elementi di interazione (come manopole, slider,...)
- modificare le impostazioni di visualizzazione di grafici (fondo scala, colori, assi...)

### 3.3 *Measurement & Automation Explorer*

Measurement & Automation Explorer (MAX) è un'interfaccia software che fornisce accesso a tutti i dispositivi DAQ, GPIB, IMAQ, IVI, Motion, VISA e VXI National Instruments ed anche a strumenti diversi che sono comunque collegati al sistema.

È uno strumento potente in grado di instaurare la comunicazione con il dispositivo, sia essa seriale piuttosto che ethernet piuttosto che GPIB e di configurare quindi l'hardware/software stesso.

L'applicativo MAX comprende le seguenti sezioni:

1) *Data Neighborhood*: questa sezione viene utilizzata per creare canali virtuali, alias-name e identificativi per canali

2) *Devices and Interfaces*: questa sezione viene utilizzata per configurare e visualizzare le risorse e altre proprietà dei dispositivi connessi. Uno strumento utile per questa sezione è senza dubbio il *VISA Test Panel*, un'utility che permette una preventiva verifica di comunicazione e un primo test di funzionalità sul dispositivo.

3) *Software*: questa sezione viene utilizzata per visualizzare il software installato e per determinare la relativa versione. Se il software non è aggiornato all'ultima release, è possibile procedere con l'update grazie al *Software Update Agent* che apre la pagina web di *ni.com* e scarica la versione aggiornata.

4) *IVI Drivers*: questa sezione consente di accedere a tutti i driver IVI ed associare ad ogni driver, un nominativo. La corretta associazione tra nome logico e driver permette di evitare riferimenti a moduli software e a risorse hardware.



## 4. Il sistema di controllo dei forni di produzione

Il sistema di controllo dei forni di produzione implementa una macchina a stati finiti realizzata con software LabVIEW.

Il cuore del sistema è rappresentato dal controller Fieldpoint cFP-2120 della National Instrument. Questo dispositivo è uno strumento adatto per applicazioni di tipo embedded.

Infatti, grazie alla sua modularità e all'applicativo LabVIEW Real-Time che gira al suo interno, questo controller offre una soluzione efficace per la gestione e il controllo di sistemi distribuiti.

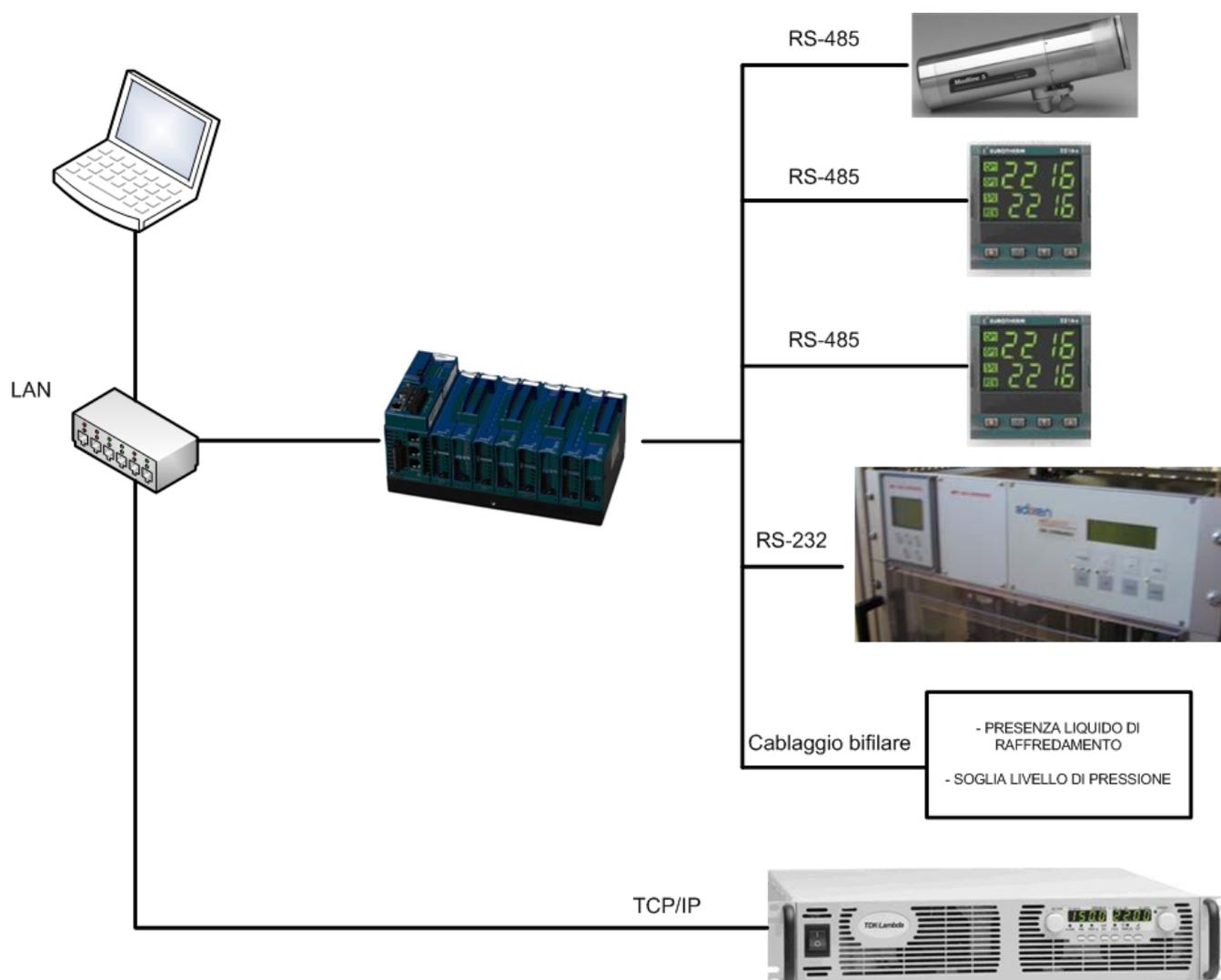


Figura 4-1: Schema a blocchi del sistema di controllo del forno di produzione

Una volta caricato il VI desiderato nel controller, quest' ultimo esegue l'applicativo senza la necessità di un host PC.

Collegando il cFP-2120 a una rete Ethernet e utilizzando un generico PC come terminale di monitoraggio, si può supervisionare in maniera completa e dettagliata l' intero sistema (figura 4-2).



**Figura 4-2: Host PC - Pannello grafico per supervisione del sistema**

L'interfaccia grafica di tale implementazione offre il monitoraggio delle variabili delle grandezze in gioco quali, per esempio, le tensioni, le correnti, le temperature e le pressioni presenti in camera target.

Il software provvede inoltre al salvataggio e all'archiviazione di tutte le misure in un apposito file per permettere, nella successiva fase di studio e investigazione, una diagnosi approfondita del completo trattamento.

### 4.1 Stati di inizializzazione

Di seguito vengono illustrati e descritti gli stati di inizializzazione della FSM

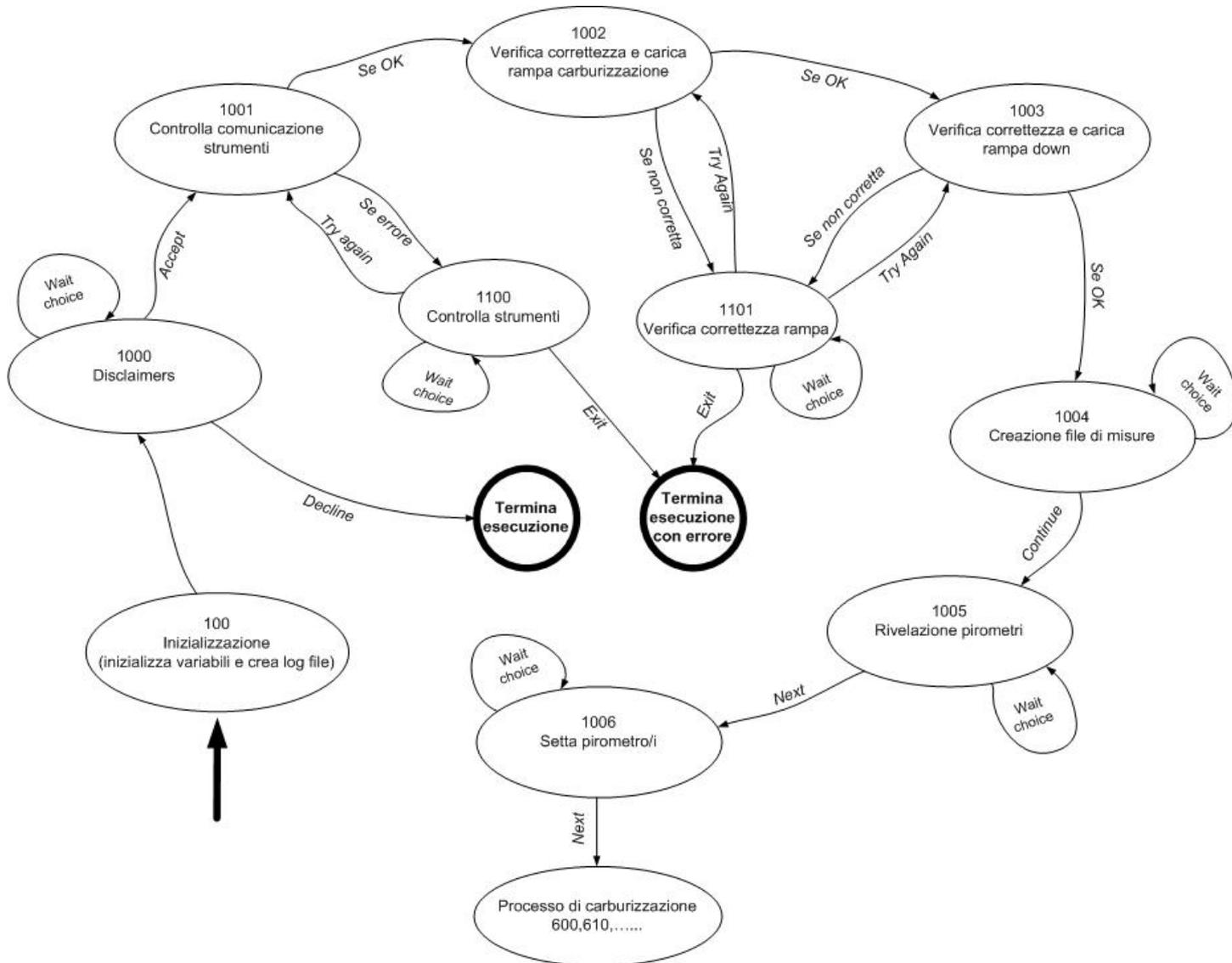


Figura 4-3: Diagramma di stato della fase di inizializzazione ( stato iniziale stato 100 )

- *Stato 100*: inizializzazione delle variabili e creazione del file di log (in cui verranno storicizzati e archiviati tutti gli stati del processo – per maggior dettagli si faccia riferimento al paragrafo 6.5 – I file di log e i file di misure ).
- *Stato 1000*: attende conferma da parte dell' utente per avviare o meno l'esecuzione del programma.
- *Stato 1001*: effettua un controllo generale degli strumenti connessi al controller Fieldpoint NI ed un controllo della condizione iniziale del sistema, segnalando tramite messaggi di errore, la presenza di

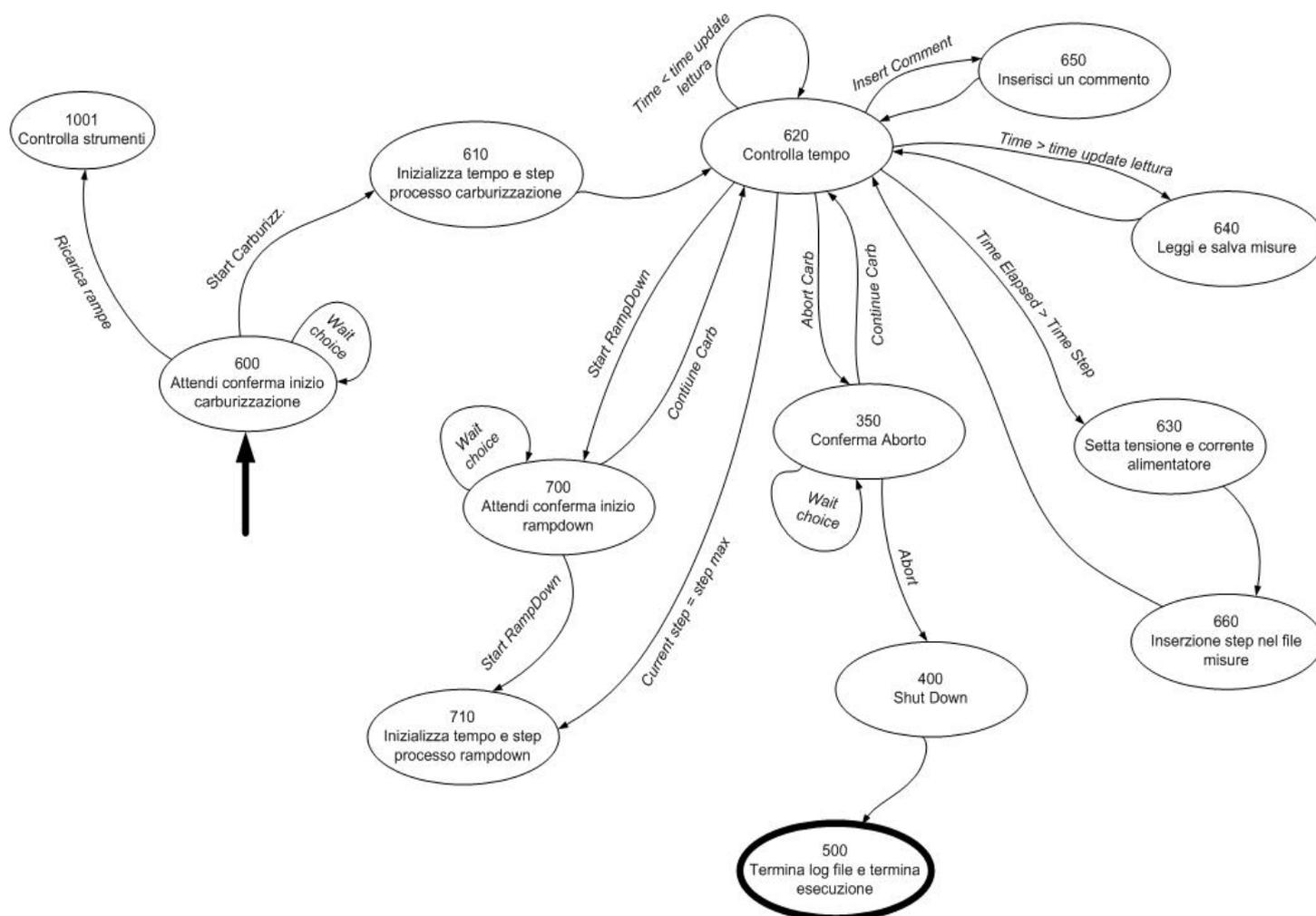
qualche anomalia (ad esempio, l'assenza di comunicazione con il pirometro, l'assenza di comunicazione con gli alimentatori, l'assenza di comunicazione con i termoregolatori, il livello di soglia di pressione in camera non valido).

- *Stato 1002*: verifica la correttezza della rampa di carburizzazione e segnala, in caso di anomalia, la riga alla quale è stato riscontrato l'errore. Possibili errori della rampa di carburizzazione consistono nell'impostare tra uno step e il successivo, una tempistica troppo bassa (allo stato attuale delle cose, il minimo valore temporale settabile tra uno step e l'altro è di 60 secondi. Tempi più brevi provocano il lancio di errori durante questa fase) oppure un valore di corrente superiore a 1320A oppure un valore di tensione superiore a 10V.
- *Stato 1003*: verifica la correttezza della ramp-down e segnala, in caso di anomalia, la riga alla quale è stato riscontrato l'errore. Possibili errori della ramp-down consistono nell'impostare tra uno step e il successivo, una tempistica troppo bassa (allo stato attuale delle cose, il minimo valore temporale settabile tra uno step e l'altro è di 60 secondi. Tempi più brevi provocano il lancio di errori durante questa fase) oppure un valore di corrente superiore a 1320A oppure un valore di tensione superiore a 10V.
- *Stato 1004*: crea il file di misure nel quale verranno salvati e storicizzati i valori delle variabili di sistema monitorate (tensioni, correnti, pressioni, temperature, emissività).
- *Stato 1005*: rileva la presenza di un secondo/terzo pirometro.
- *Stato 1006*: imposta i parametri di misura del pirometro/i.
- *Stato 1100*: l'esecuzione si pone in questo stato in seguito alla segnalazione di errore da parte dello stato 1002 e/o dello stato 1003. Attende il comando *TRY AGAIN* da parte dell'utente per ritornare allo stato 1002 ( e/o 1003) ed effettuare nuovamente il controllo di correttezza rampa. Invece, se scelto il comando *EXIT*, viene terminata l'esecuzione del programma e viene lanciato l'errore di rampa sbagliata.
- *Stato 1101*: l'esecuzione si pone in questo stato in seguito alla segnalazione di errore da parte dello stato 1001. Attende il comando *TRY AGAIN* da parte dell'utente per ritornare allo stato 1001 ed effettuare nuovamente il controllo generale degli strumenti oppure, se scelto il comando *EXIT*, termina l'esecuzione del programma con il lancio dell'errore.

Se la procedura di inizializzazione va a buon fine, il sistema passa ai successivi stati di carburizzazione.

## 4.2 Stati del processo di carburizzazione

Di seguito vengono illustrati e descritti gli stati del processo di carburizzazione.



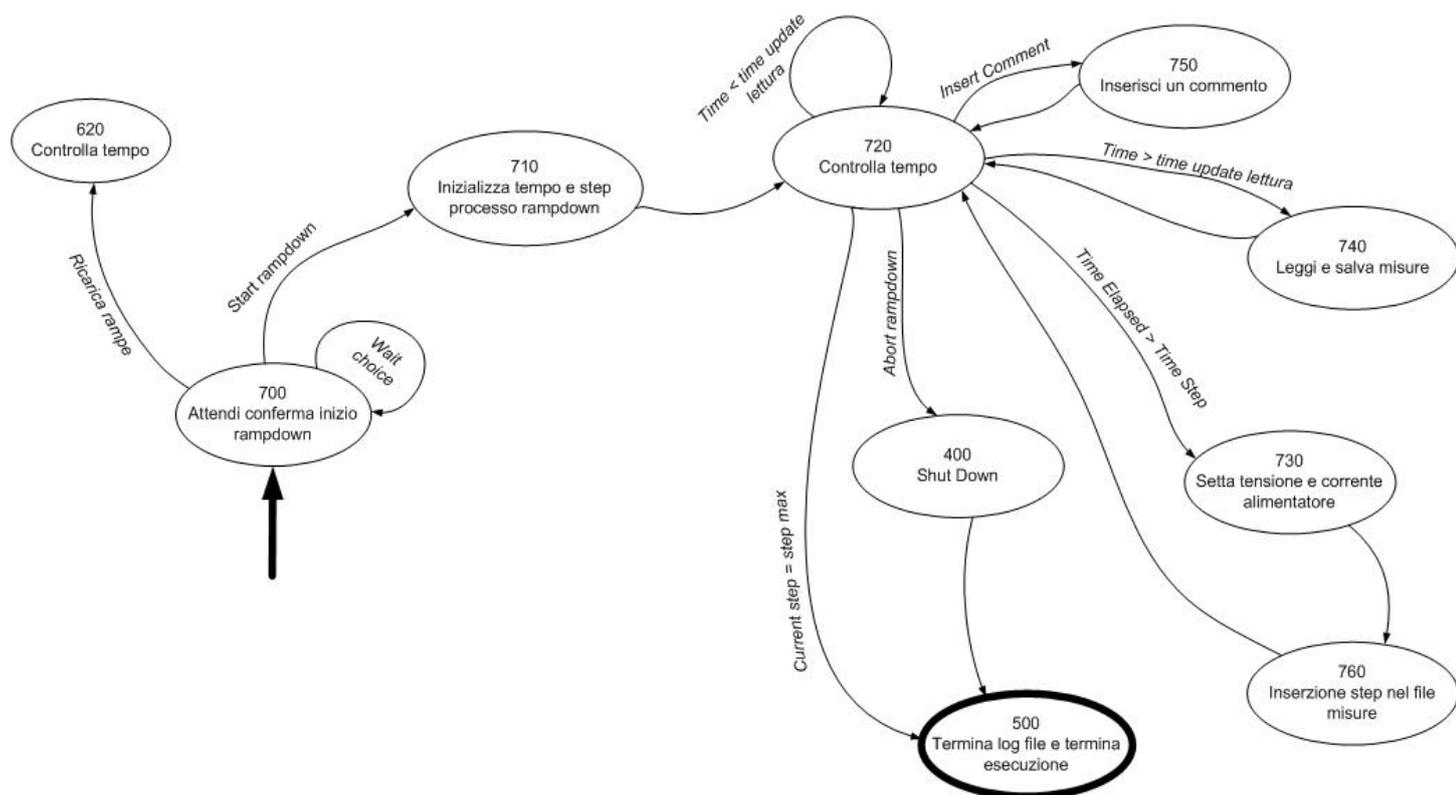
**Figura 4-4: Diagramma di stato del processo di carburizzazione (stato iniziale 600)**

- *Stato 600*: questo stato segnala che il sistema è pronto per iniziare il trattamento ed attende conferma da parte dell'utente per procedere. In questo stato è inoltre possibile terminare l'esecuzione del programma (tramite comando *EXIT*) oppure ritornare alla fase di inizializzazione (grazie al comando *RELOAD RAMPS AND RELOAD PYROS*) oppure avviare il processo di carburizzazione (grazie al comando *START CARBURIZATION PROCESS*).
- *Stato 610*: inizializza il numero di passi e il timer per il controllo della tempistica della rampa.
- *Stato 620*: verifica passo e timer.
- *Stato 630*: imposta per ogni step, le tensioni e le correnti desiderate.

- *Stato 640*: effettua la lettura e il salvataggio delle grandezze misurate (vengono visualizzate a terminale tramite interfaccia grafica e riportate in appositi grafici per studiarne l'andamento temporale – per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 6.3 – Schermate di monitoraggio sistema).
- *Stato 650*: inserisce un commento/nota esplicativa nel file di misure.
- *Stato 660*: inserisce nel file di misure il numero del passo della rampa effettivamente raggiunto, contrassegnandolo come *DONE*.
- *Stato 350*: attende conferma da parte dell'utente per procedere all'arresto del processo di carburizzazione. In questo stato è prevista la possibilità di riprendere il processo precedentemente interrotto.
- *Stato 400*: procede allo spegnimento del sistema. Pone a zero l'uscita degli alimentatori con successiva disattivazione. Chiude la comunicazione seriale con pirometri e controllori di temperatura.
- *Stato 500*: termina l'esecuzione del programma e chiude il file di log.

### 4.3 Stati del processo di ramp-down

Di seguito vengono illustrati e descritti gli stati del processo di ramp-down.



**Figura 4-5: Diagramma di stato del processo di ramp-down (stato iniziale 700)**

- *Stato 700*: il sistema si pone in questo stato una volta terminato il processo di carburizzazione oppure una volta che si è deciso di abortire il trattamento di carburizzazione stesso. Questo stato attende la conferma da parte dell'utente per procedere con la fase di ramp-down. E' prevista inoltre la possibilità di ritornare al processo interrotto, in caso si desiderasse ultimare i passi mancanti.
- *Stato 710*: inizializza il numero di passi e il timer per il controllo della tempistica.
- *Stato 720*: verifica passo e timer.
- *Stato 730*: imposta per ogni step le tensioni e le correnti desiderate.
- *Stato 740*: effettua la lettura e il salvataggio delle grandezze misurate (vengono visualizzate a terminale tramite interfaccia grafica e riportate in appositi grafici per studiarne l'andamento temporale – per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 6.3 – Schermate di monitoraggio sistema).
- *Stato 750*: inserisce un commento/nota esplicitiva nel file di misure.

- *Stato 760*: inserisce nel file di misure il numero del passo della rampa effettivamente raggiunto, contrassegnandolo come *DONE*.

#### 4.4 *Altri stati*

Altri stati che compongono la FSM sono:

- *Stato 300*: stato di gestione errori. Il sistema si pone in questo stato nell'eventualità di lancio di errori in fase di esecuzione. Segnala a terminale l'anomalia occorsa e successivamente delega agli stati 450 e 550 il compito di arresto del sistema e di terminare l'esecuzione del programma;
- *Stato 450*: arresto del sistema (con errore). Pone a zero l'uscita degli alimentatori con successiva inibizione delle uscite. Chiude la comunicazione seriale con pirometri e controllori di temperatura;
- *Stato 550*: termina l'esecuzione del programma (con errore), segnalando nel file di log l'arresto del sistema con presenza di errori.



## 5. Implementazione LabVIEW dei driver per i moduli alimentatore e aggiornamento dei driver per termoregolatori RS-485

L'installazione dei moduli GEN10-330 si è resa necessaria allo scopo di fornire potenze superiori alla camera target in modo tale da raggiungere temperature superiori.

Il precedente modello di alimentatore presentava un limite massimo di corrente di 1000A.

Attualmente, i nuovi moduli TDK-Lambda raggiungono una corrente massima di 1320A.

In questo capitolo viene descritto nel dettaglio il lavoro svolto per procedere all'installazione e alla messa in funzione di questi nuovi moduli di potenza e all'installazione e in messa in funzione di 2 termoregolatori Eurotherm in bus EIA-485.

### 5.1 *Alimentatore TDK-Lambda GEN10-330: descrizione e configurazione*

Gli alimentatori Genesys GEN10-330 sono alimentatori AC/DC programmabili.

Ciascun modulo offre in uscita 3.3kW e possono essere pilotati da remoto tramite comunicazione seriale RS-232 o RS-485 o tramite comunicazione ethernet.

Se collegati opportunamente in parallelo, essi forniscono una corrente in uscita pari a 4 volte quella di un singolo modulo. In questa configurazione, una delle 4 unità opera da *master* mentre le rimanenti unità fungono da *slave*.

Nel controllo remoto, solo il master può essere programmato da PC, invece si può accedere agli slave solo per la lettura dei registri interni di stato e dei settaggi di corrente e tensione [13].

Si è presentata l'esigenza di realizzare una nuova release del software, che prevedesse lo sviluppo e l'implementazione dei driver appropriati per l'utilizzo di questi dispositivi.

Il controllo degli alimentatori viene realizzato mediante connessione ethernet, utilizzando il protocollo TCP/IP (il sistema nel suo complesso, come già descritto nel paragrafo 4, è stato strutturato secondo lo schema a blocchi di figura 4-1).

Di seguito viene illustrata la procedura di configurazione. E' indispensabile verificare che il seguente settaggio sia verificato perché tutto funzioni correttamente

- 1) Accertarsi che i dip-switch posti sul retro pannello del modulo master siano in posizione mostrata in fig. 5-1. E' sufficiente che il dip switch più a sinistra sia in posizione LAN (alto).

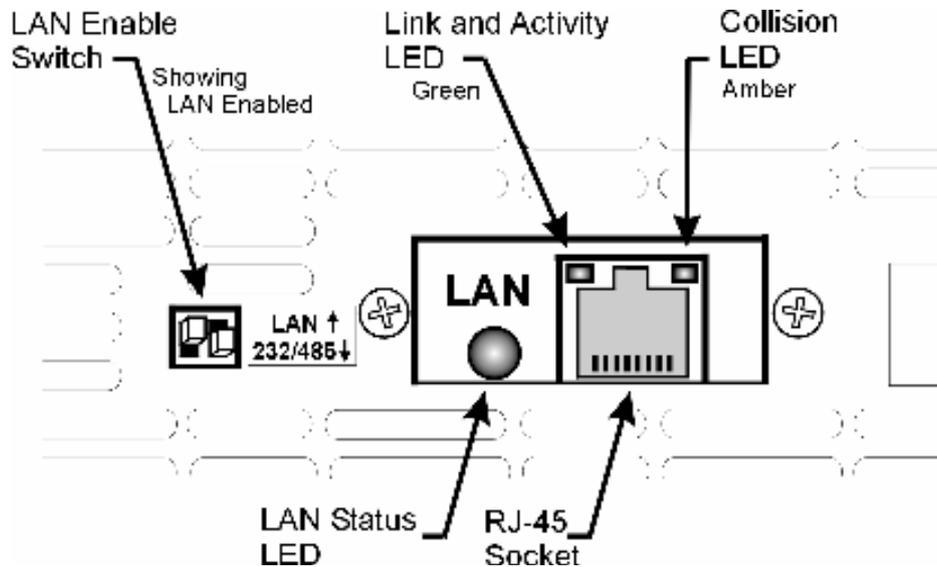


Figura 5-1: Connettore e settaggi LAN del retro pannello

*L'alimentatore DEVE ESSERE SPENTO in quanto solo dopo l'avvio del modulo , l'impostazione diventa effettiva*

- 2) Porre dip-switch N° 2 di SW1 (figura 5-2 bubble 6) dei 3 moduli SLAVE in posizione on (verso l'alto) mentre tutti gli altri in posizione off (verso il basso).

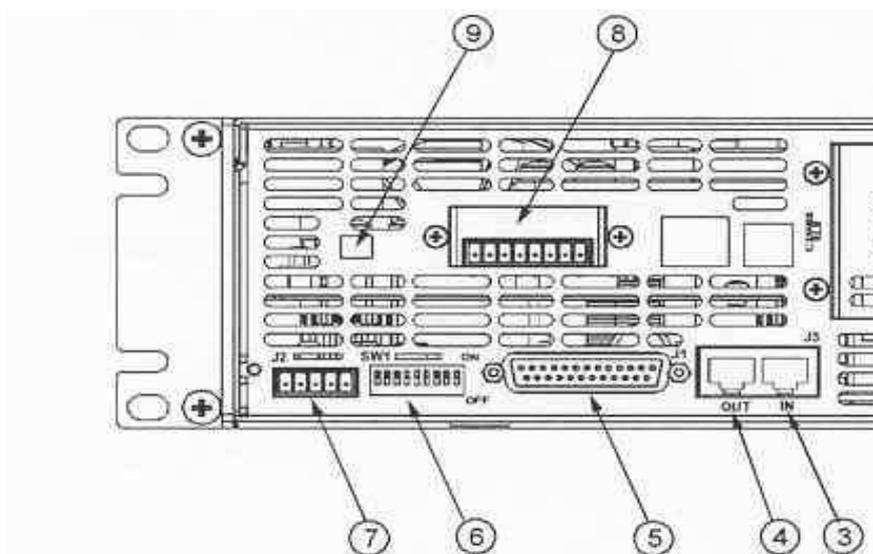


Figura 5-2: Retro pannello del modulo GEN10-330

I dip-switch del modulo MASTER invece devono essere tutti in posizione off (tutti verso il basso).

3) Effettuare il collegamento ai 4 connettori J1 degli alimentatori (figura 5-2, bubble 5) con la seguente configurazione:

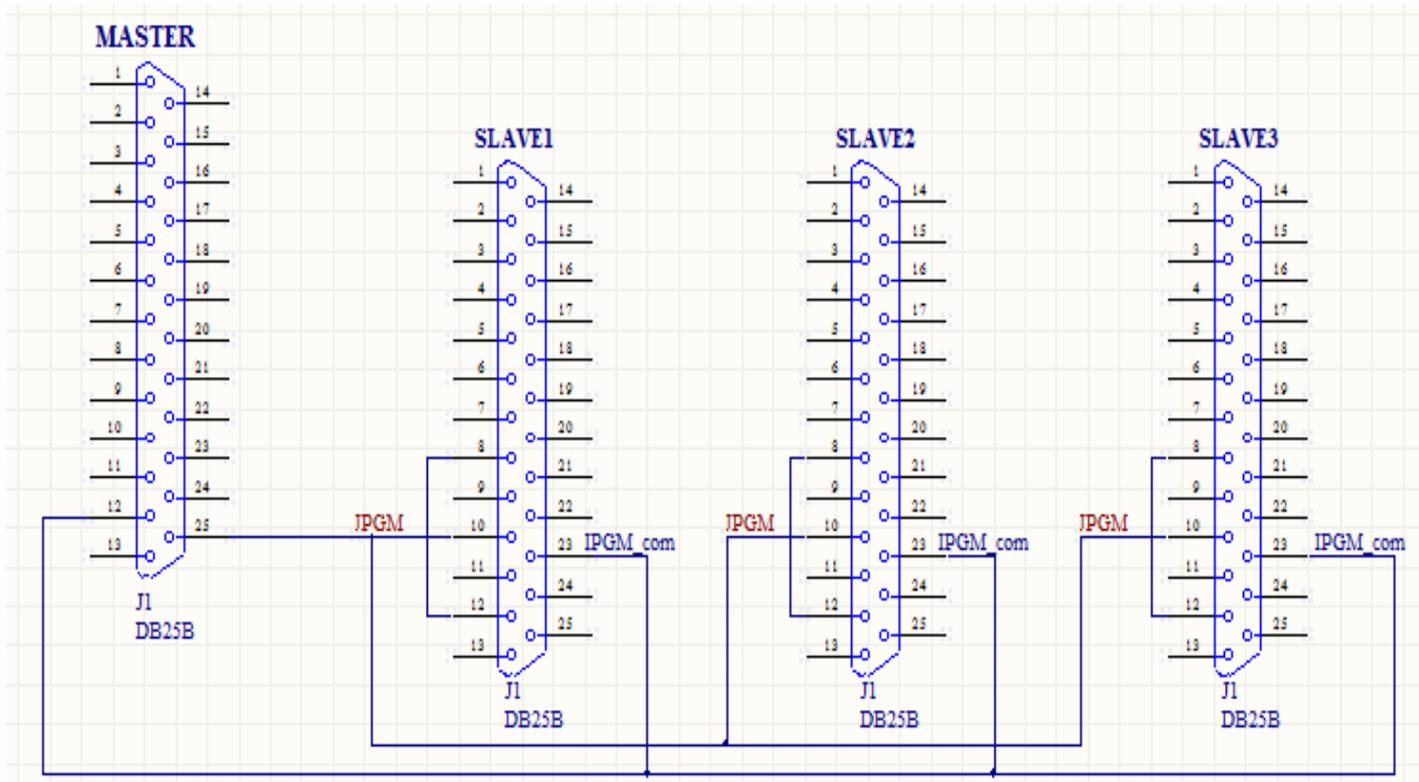


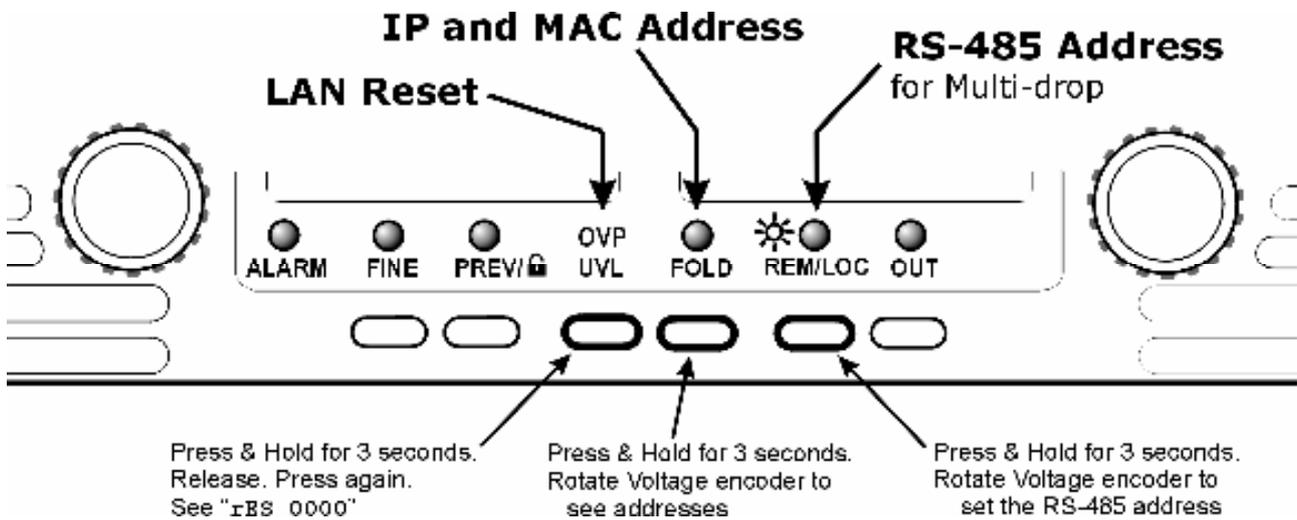
Figura 5-3: Cablaggio tra il connettore J1 del master e i connettori J1 degli slave

4) Tener premuto il tasto FINE per 3 secondi (vedi figura 5-4) e verificare ed eventualmente agire sulla manopola CURRENT (manopola a destra) in modo da impostare sul display del modulo master la scritta *H4*.

Sugli altri moduli, seguire la stessa procedura, verificando ed eventualmente agendo sulla manopola CURRENT in modo da impostare sui display dei 3 moduli slave la scritta *S*.

5) Verificare ed eventualmente impostare l'IP Address del modulo master.

In figura 5-4 vengono riportate le indicazioni per agire sulle impostazioni LAN dell'alimentatore.



**Figura 5-4: Settaggi LAN del pannello frontale**

Per evitare conflitti e malfunzionamenti, l'indirizzo IP da assegnare al GEN10-330 è il seguente:

*192.168.0.7*

Per maggiori dettagli riguardo la configurazione IP, si faccia riferimento all'appendice A.2

## 5.2 Implementazione dei driver TCP/IP per il controllo remoto dei moduli alimentatore [15, 16]

Di seguito vengono presentati e illustrati i driver realizzati per il pilotaggio degli alimentatori

### 5.2.1 GEN\_Open\_TCP.vi

Questo VI apre una comunicazione TCP/IP con il dispositivo GEN10-330.

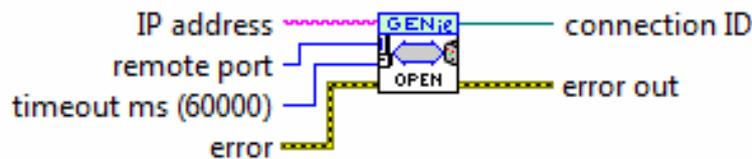


Figura 5-5: GEN\_Open\_TCP.vi: icona e connessioni

Specificato l' IP Address e la remote port, il VI cerca di instaurare una comunicazione e attende un certo intervallo di tempo (timeout in ms) prima di restituire un errore se il tentativo non va a buon fine. Il timeout è stato impostato a 5000ms.

### 5.2.2 GEN\_Init\_TCP.vi

Interroga e restituisce l' identificativo del dispositivo, in modo tale da verificare se i driver che si utilizzano sono compatibili con lo strumento che si intende pilotare.

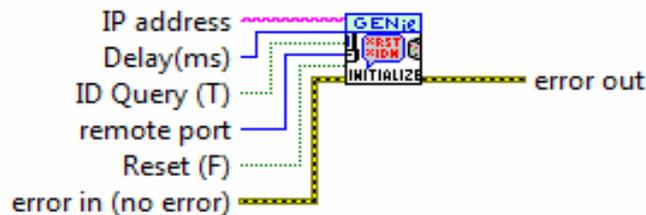


Figura 5-6: GEN\_Init\_TCP.vi: icona e connessioni

E' possibile resettare il dispositivo ed impostare il ritardo (delay in ms) di attesa, durante il quale il VI attende risposta dallo strumento. GEN\_Init\_TCP.vi abilita lo status report dei messaggi di errore.

### 5.2.3 GEN\_Config\_TCP.vi

Questo VI imposta il controllo da remoto del dispositivo, la protezione in corrente, la protezione alla sovratensione (OV Protection) e il valore di tensione massimo in uscita (Voltage Limit )

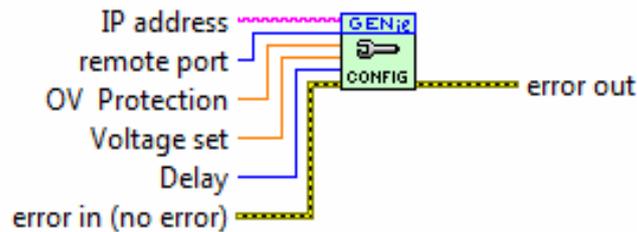


Figura 5-7: GEN\_Config\_TCP.vi: icona e connessioni

La protezione di corrente deve essere disattivata per applicazioni in cui l'alimentatore viene usato in modalità CC (corrente continua).

#### 5.2.4 GEN\_Wait\_TCP.vi

Attende un certo intervallo di tempo (in ms).

Viene utilizzato per fornire al dispositivo un' adeguata tempistica per permettere il raggiungimento delle condizioni di regime, in seguito ad un precedente comando.

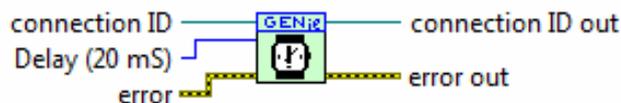


Figura 5-8: GEN\_Wait\_TCP.vi: icona e connessioni

#### 5.2.5 GEN\_OnOff\_TCP.vi

Questo VI accende o spegne l'alimentatore. Se Output ON/OFF è settata FALSE, l'uscita sarà OFF.

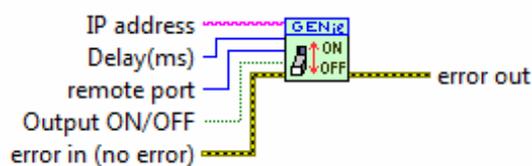


Figura 5-9: GEN\_OnOff\_TCP.vi: icona e connessioni

### 5.2.6 GEN\_SetVI\_TCP.vi

Questo VI imposta il valore di corrente e tensione in uscita ai moduli alimentatori.

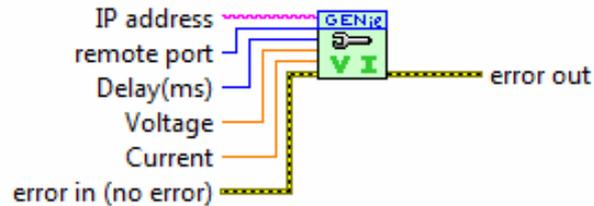


Figura 5-10: GEN\_SetVI\_TCP.vi icona e connessioni

### 5.2.7 GEN\_ReadVI\_TCP.vi

Questo VI restituisce il valore di corrente e di tensione impostate negli alimentatori (e ne calcola la relativa potenza apparente).

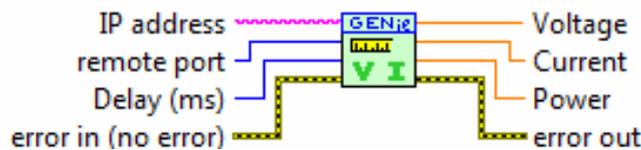


Figura 5-11: GEN\_ReadVI\_TCP.vi

### 5.2.8 GEN\_Close\_TCP.vi

Questo VI chiude una comunicazione TCP/IP con il dispositivo GEN10-330.



Figura 5-12: GEN\_Close\_TCP.vi: icona e connessioni

Specificato l' IP Address e la remote port, il VI cerca di chiudere la comunicazione e attende un certo intervallo di tempo (timeout in ms) prima di restituire un errore se il tentativo non va a buon fine. Il timeout è stato impostato a 5000ms.

### 5.2.9 Gestione di errore dei driver alimentatore

I driver sono stati implementati per sopperire a inconvenienti quali la perdita di controllo dei moduli alimentatori in caso di comparsa di qualche malfunzionamento.

Si possono distinguere errori di diversa natura, quali per esempio, errori strettamente legati alla comunicazione (anomalie che occorrono nel canale di comunicazione) ed errori strettamente legati al dispositivo da controllare remotamente.

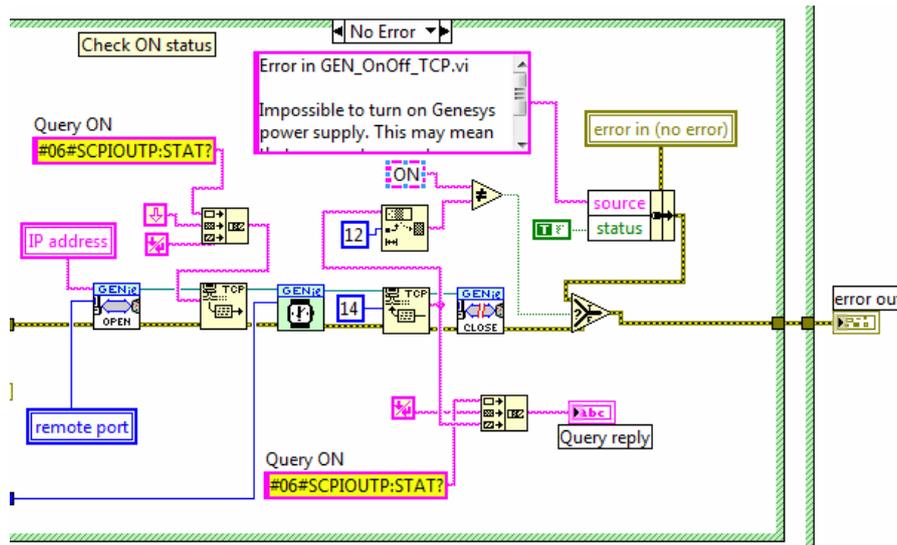


Figura 5-13: parte del diagramma a blocchi di GEN\_OnOff\_TCP.vi – esempio di gestione di errore

In figura 5-13 viene illustrata parte della struttura del driver GEN\_OnOff\_TCP.vi.

All'interno della struttura CASE si effettua la query sullo stato dell'uscita, allo scopo di verificare se l'abilitazione è avvenuta con successo.

Se tutto è andato a buon fine, l'esecuzione del programma continua senza problemi perché nessun messaggio di errore è stato lanciato.

Invece, se interviene un'anomalia e di conseguenza l'uscita risulta in questo caso non abilitata, allora si procede al lancio di un messaggio di errore.

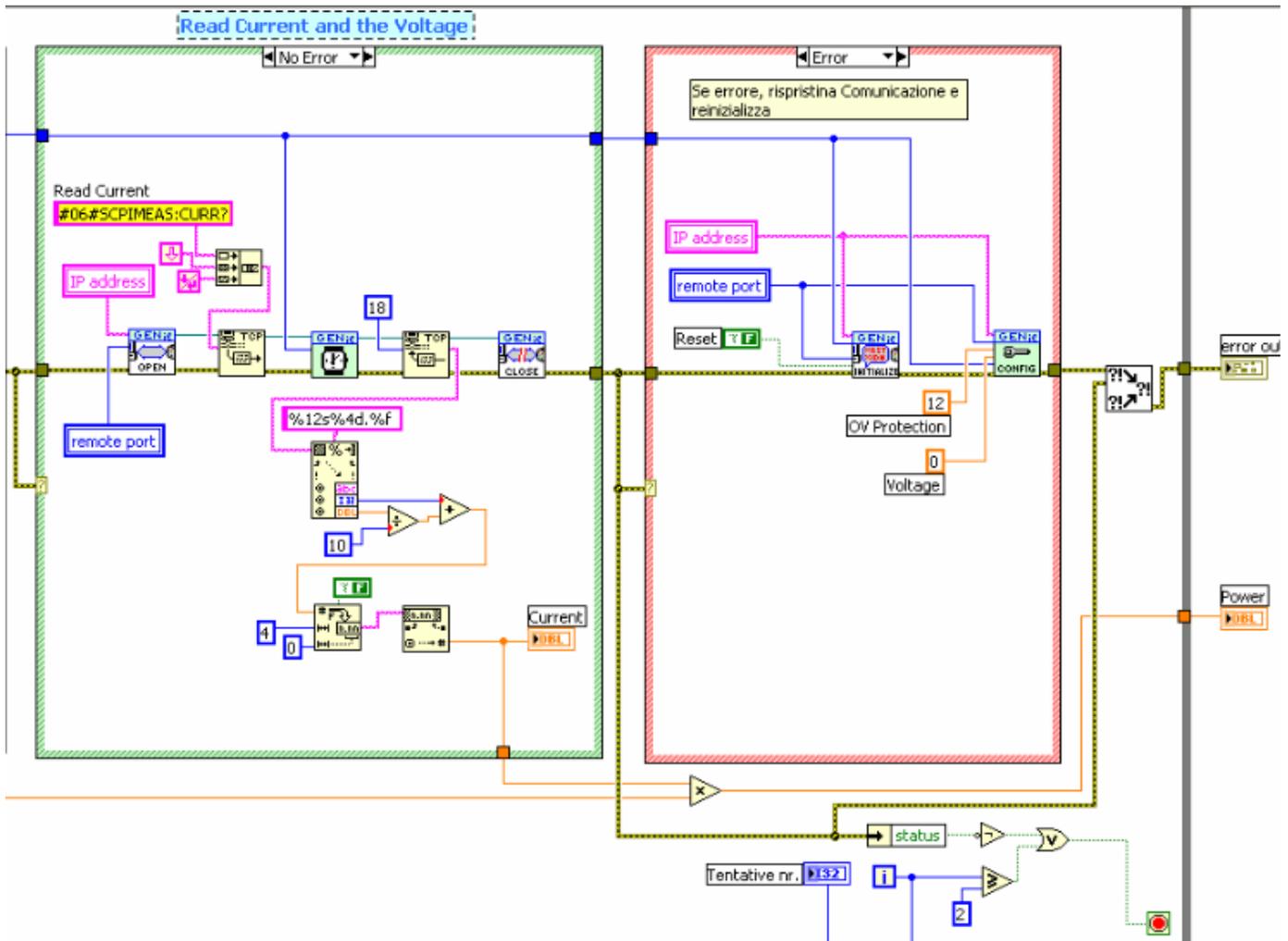
In generale, il driver effettua un confronto tra il valore atteso e l'effettiva risposta alla query e se non c'è la giusta corrispondenza, allora si segnala la condizione di errore. In questo caso, si pone lo status del cluster d'errore in condizione true (si veda fig. 5-13) e si immette in source (sempre del cluster d'errore) la stringa che si desidera vedere nel momento in cui la segnalazione viene emessa a terminale.

Così facendo se ad esempio GEN\_OnOff\_TCP.vi abilita l'uscita di potenza (ON), ma in realtà dalla lettura della query l'uscita risulta disattivata, allora il driver avverte e propaga l'errore alle successive strutture VI e nel momento in cui l'esecuzione viene interrotta, a terminale comparirà la seguente segnalazione:

*“Error in GEN\_OnOff\_TCP.vi Impossible to turn on Genesys power supply. This may mean that an over-temperature or an AC fault occurs.”*

### 5.2.10 Gestione della perdita di comunicazione dei driver alimentatore

In caso di perdita di comunicazione, il software segnala che non è più in grado di dialogare con il dispositivo e lancia errore.



**Figura 5-14:** parte del diagramma a blocchi di GEN\_ReadVI\_TCP.vi – esempio di recupero perdita di comunicazione

L'errore viene propagato tra le varie strutture del software per poi essere discriminato all'interno dei driver, per esempio come accade in GEN\_ReadVI\_TCP.vi (figura 5-13).

Se all'ingresso della struttura CASE (quella più a destra di figura 5-13) viene rilevato la presenza di un errore, si esegue la seguente manovra:

- si interroga il dispositivo, in modo tale da capire se i driver utilizzati sono compatibili con lo strumento che si sta pilotando e successivamente si configura lo strumento (nell'eventualità avesse perso o resettato le impostazioni settate in fase di inizializzazione);

- si ripete il punto precedente per 2 volte. Si eseguono 2 tentativi e se l' errore è ancora presente allora viene propagato e segnalato all' operatore interrompendo l'esecuzione del programma.

### 5.3 *Termoregolatore Eurotherm RS-485 [14]*

La rivelazione della temperatura è affidata al regolatore Eurotherm 2216e. Questo dispositivo offre due uscite di controllo configurabili via software, un relè di allarme, un ingresso per trasduttore di termocoppia e una porta di comunicazione seriale.



**Figura 5-15: Regolatore di temperatura Eurotherm 2216e**

È un regolatore di tipo PID che viene utilizzato semplicemente come lettore di temperatura e non effettua alcun controllo di tipo retroazionato sulla grandezza considerata.

Il forno montava un unico modulo Eurotherm, che comunicava con il controller FielPoint cFP-2120 attraverso una porta seriale dedicata RS-232.

È nata l'esigenza di installare un secondo modulo Eurotherm per il prelievo di una seconda temperatura in un differente punto del forno. Per questa ragione si sono adottati controllori di tipo RS-485 (si veda lo Schema a blocchi in figura 4.1).

Lo standard RS-485, a differenza del RS-232, permette di collegare più strumenti in bus e di rintracciarli e comunicarci specificando l'indirizzo appropriato (protocollo Modbus).

### 5.4 *Aggiornamento dei driver per l'utilizzo dei termoregolatori Eurotherm RS-485*

I controllori di temperatura Eurotherm RS-485 sono dispositivi che implementano una comunicazione seriale di tipo half-duplex, utilizzando quindi lo stesso canale sia per la trasmissione che per la ricezione (RS-485 sfrutta 3 fili: ground, TX+/RX+ e TX-/RX-).

È quindi chiaro che la comunicazione nei 2 versi non può avvenire contemporaneamente, ma è necessario adottare opportuni accorgimenti per evitare conflitti ed errori.

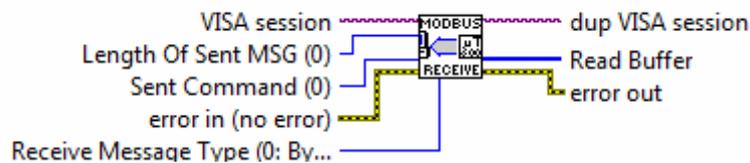
I driver per i dispositivi RS-232 non erano quindi compatibili con quelli RS485, è stato difatti necessario apportare una semplice modifica.

### 5.4.1 ET24XX Utility MODBUS RTU Receive Message RS485.vi

Il VI effettua la decodifica del frame modbus proveniente dal dispositivo.

Viene separato il messaggio dati dal resto del frame (costituito da indirizzo, codice funzione e codice CRC).

Il messaggio viene poi posto in un opportuno buffer di lettura e diventa pronto per essere decodificato (sono previste due possibile decodifiche per registri a 8 e a 16 bit [18-protocollo modbus]).

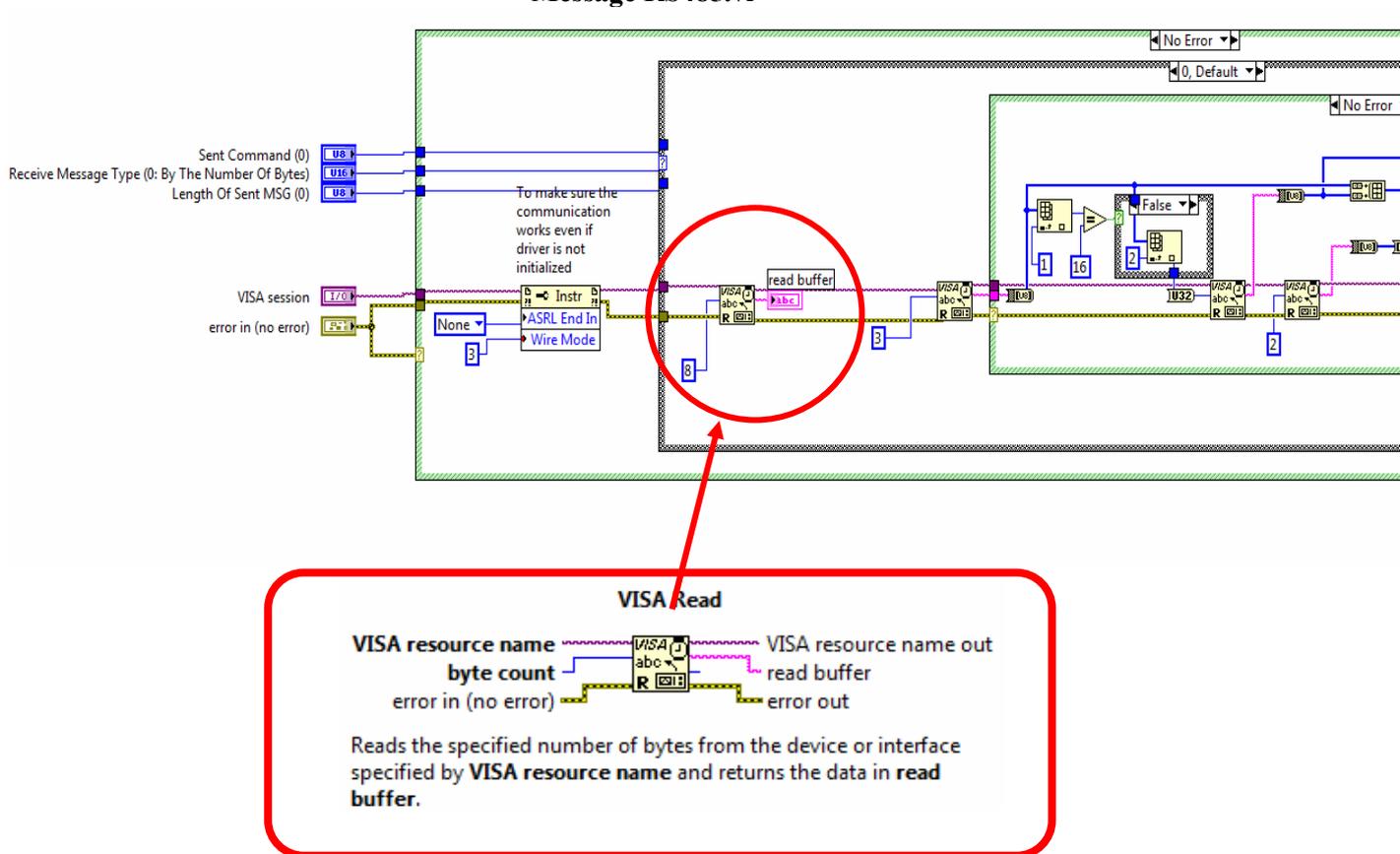


**Figura 5-16: ET24XX Utility MODBUS RTU Receive Message RS485.vi: icona e connessioni**

Come accennato precedentemente, essendo una comunicazione half-duplex, il canale di comunicazione vede il flusso dati di trasmissione con in coda il flusso dati di ricezione.

In questo caso, il frame di scrittura rimaneva presente nel canale così che, quando si procedeva alla lettura dei registri in realtà la decodifica vedeva l'eco della scrittura con in coda l'effettiva informazione attesa.

**Figura 5-17: Parte del diagramma a blocchi del driver ET24XX Utility MODBUS RTU Receive Message RS485.vi**



**Figura 5-18: Funzione VISA Read.vi aggiunta nel diagramma a blocchi del driver ET24XX Utility MODBUS RTU Receive Message RS485.vi**

L' inserzione di una funzione VISA Read.vi con un buffer di lettura in ingresso pari a 8 byte ha rappresentato la soluzione al problema.

Tale VI ha permesso di ignorare i primi 8 byte in ricezione (che di fatto è la richiesta effettuata dal controller al dispositivo).

E' stato quindi possibile pulire il buffer dall' inutile eco e grazie a questa manovra la decodifica può avvenire in maniera corretta.



## **6. Il sistema di controllo dei forni di produzione: interfaccia grafica utente**

Il software di gestione del sistema presenta, a livello di interfaccia grafica utente, un approccio di tipo “ user-friendly ”.

Si è cercato di adottare un insieme di accorgimenti tali per cui la grafica utente potesse risultare la più chiara e la più comprensibile possibile.

Le schermate si presentano di immediata intuizione e prevedono l’ interagibilità con l’operatore in caso di richiesta di conferma/aborto per talune operazioni.

L’ utente viene informato in qualsiasi momento dello stato del sistema attraverso segnalazioni di avvenuta anomalia o segnalazioni di esito positivo delle operazioni eseguite.

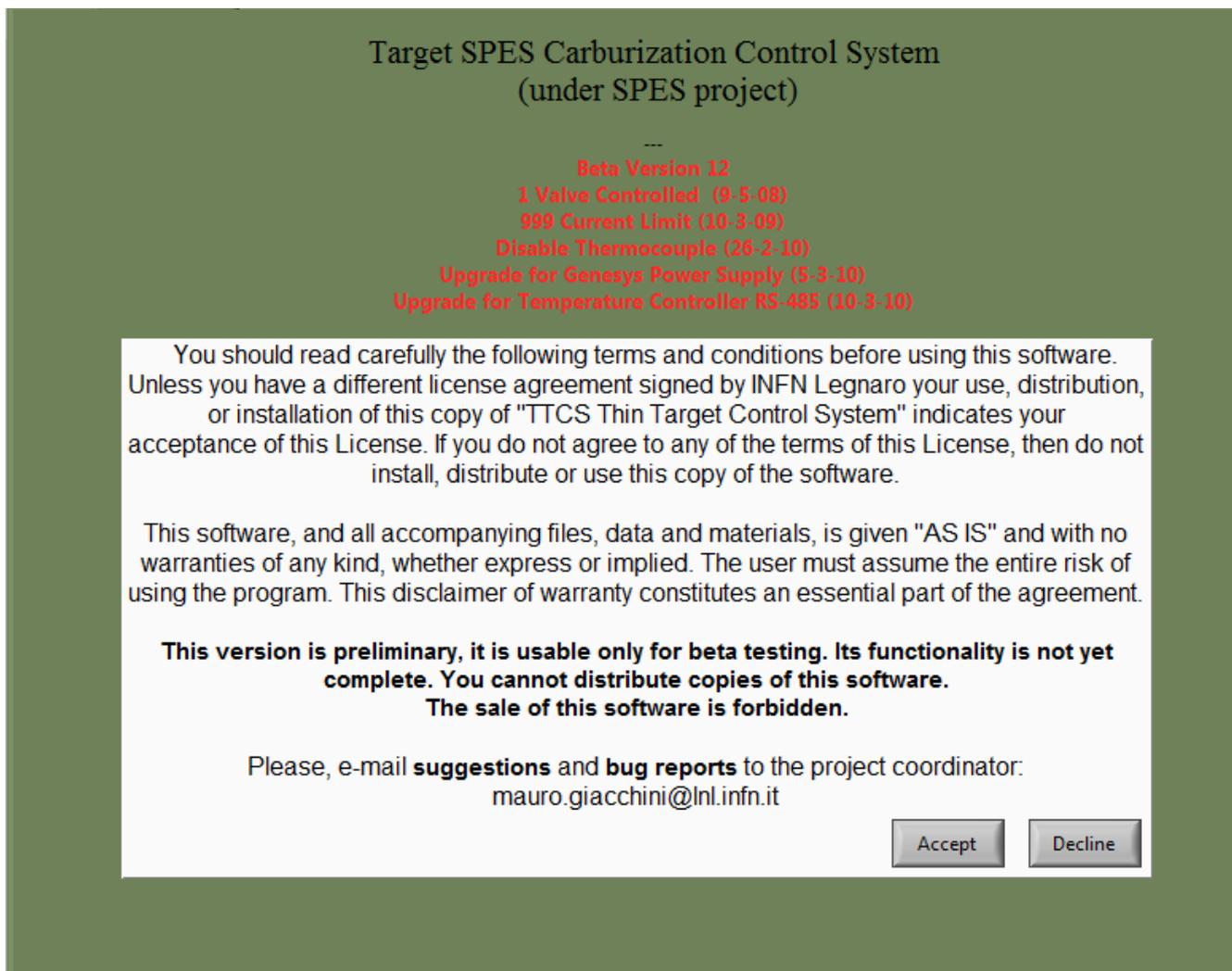
Le misure di temperatura, pressione, corrente e tensione del forno vengono continuamente monitorate per offrire una supervisione completa e dettagliata delle condizioni del forno.

Inoltre, tutti i dati empirici vengono continuamente raccolti e archiviati in appositi file per le successive fasi di studio e analisi.

Di seguito vengono illustrate le finestre che compaiono durante l’ esecuzione del programma.

## 6.1 Schermate di avvio

Le seguenti figure mostrano 6 schermate che si presentano all' avvio del programma



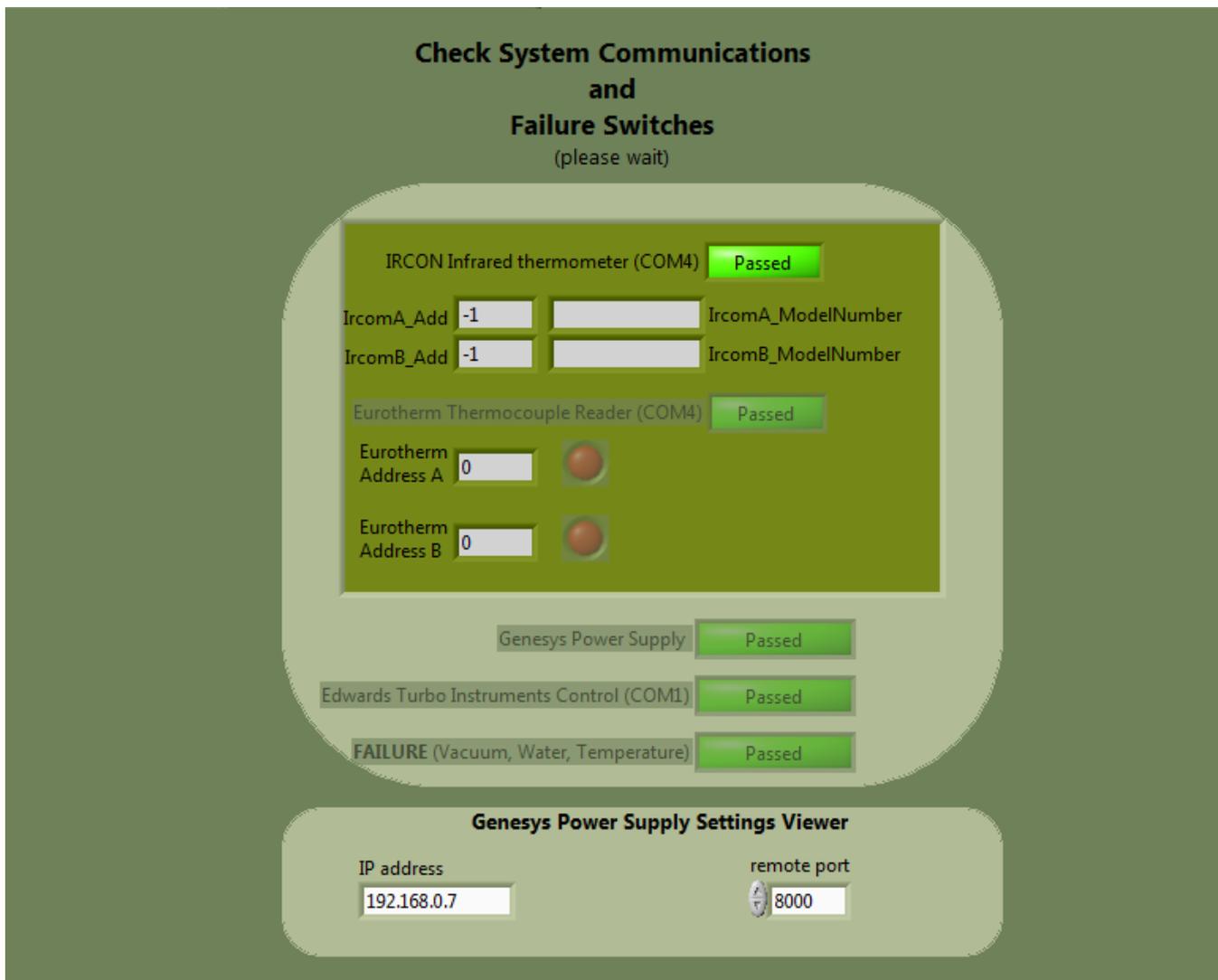
**Figura 6-1: Schermata iniziale**

In figura 6-1 viene visualizzata la schermata di introduzione al programma

Compare nel momento in cui viene lanciato l'applicativo VI.

Si attende la scelta da parte dell' utente, il quale può terminare immediatamente il programma (*DECLINE*) oppure decidere di continuare l' esecuzione (*ACCEPT*).

La seconda schermata mostra la fase di check generale del sistema di comunicazione (per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 4.3 – Stati di inizializzazione – Stato 1001).



**Figura 6-2: Seconda schermata – Controllo del sistema di comunicazione e segnalazione anomalie**

Se il controllo va a buon fine, tutte le label si colorano di verde e viene segnalato *PASSED* all'interno di ciascuna.

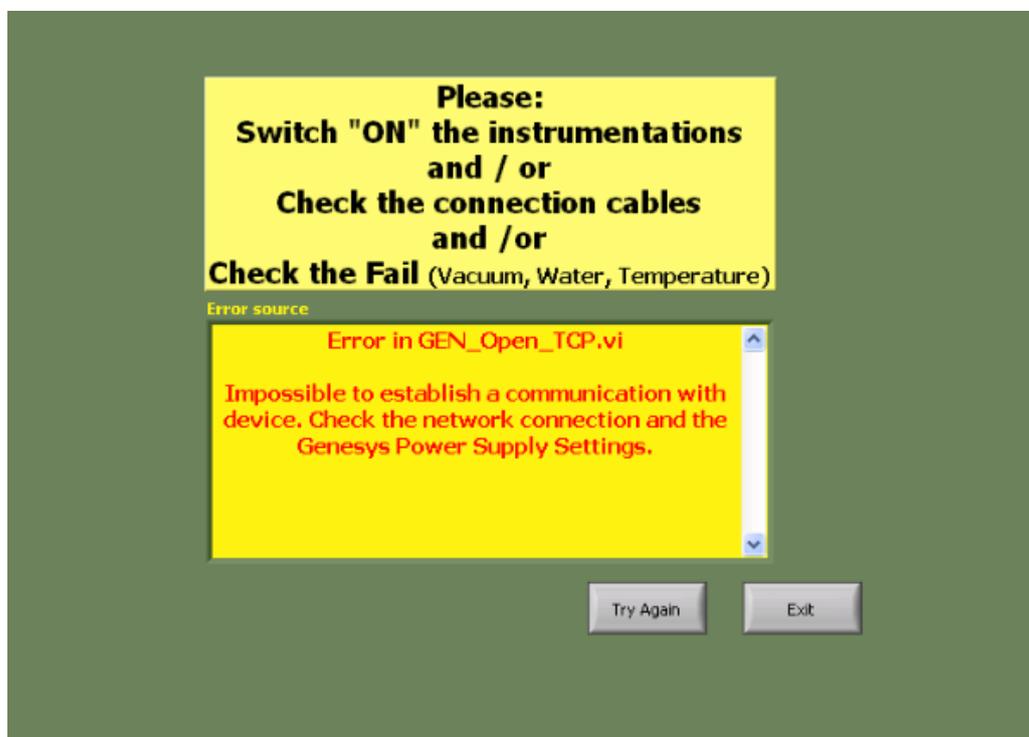
Se interviene qualche anomalia, la label relativa al dispositivo che presenta errore, si colora di rosso e viene segnalato *NOT PASSED* all'interno.

Particolare importanza riveste la sottofinestra *GENESYS POWER SUPPLY SETTINGS VIEWER*, che mette in evidenza l' IP Address e la remote port dei moduli alimentatori.

Tali impostazioni devono essere settate correttamente per permettere il controllo da remoto dei moduli di potenza.

Se per qualche ragione, i settaggi dell'alimentatore non sono quelli previsti, il software non è in grado di reperire e instaurare la comunicazione con gli alimentatori stessi (per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 5.2).

A questo punto, se il check fallisce compare la videata di figura 6-3.



**Figura 6-3: Schermata Error Source – possibile segnalazione di errore**

Nella box *Error Source* sono spiegate le possibili ragioni per le quali il check ha dato esito negativo.

Viene indicato il nome del subVI che ha generato l'errore e viene fornita una minima descrizione su come intervenire per risolvere il problema ( per ulteriori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 6.4 – Segnalazioni errori e/o anomalie).

Da questa schermata è possibile interrompere l'esecuzione del programma (tramite comando *EXIT*) oppure tentare nuovamente il check generale (tramite comando *TRY AGAIN*).

Se il check dell' apparato di comunicazione ha esito positivo, si passa alla successiva schermata (figura 6-4).

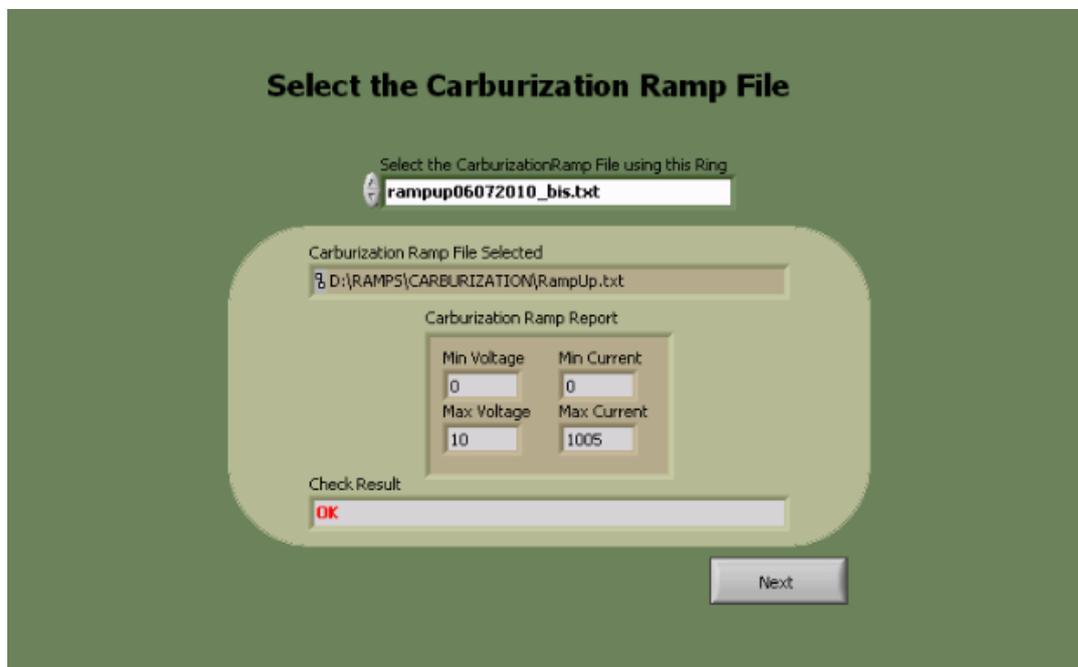
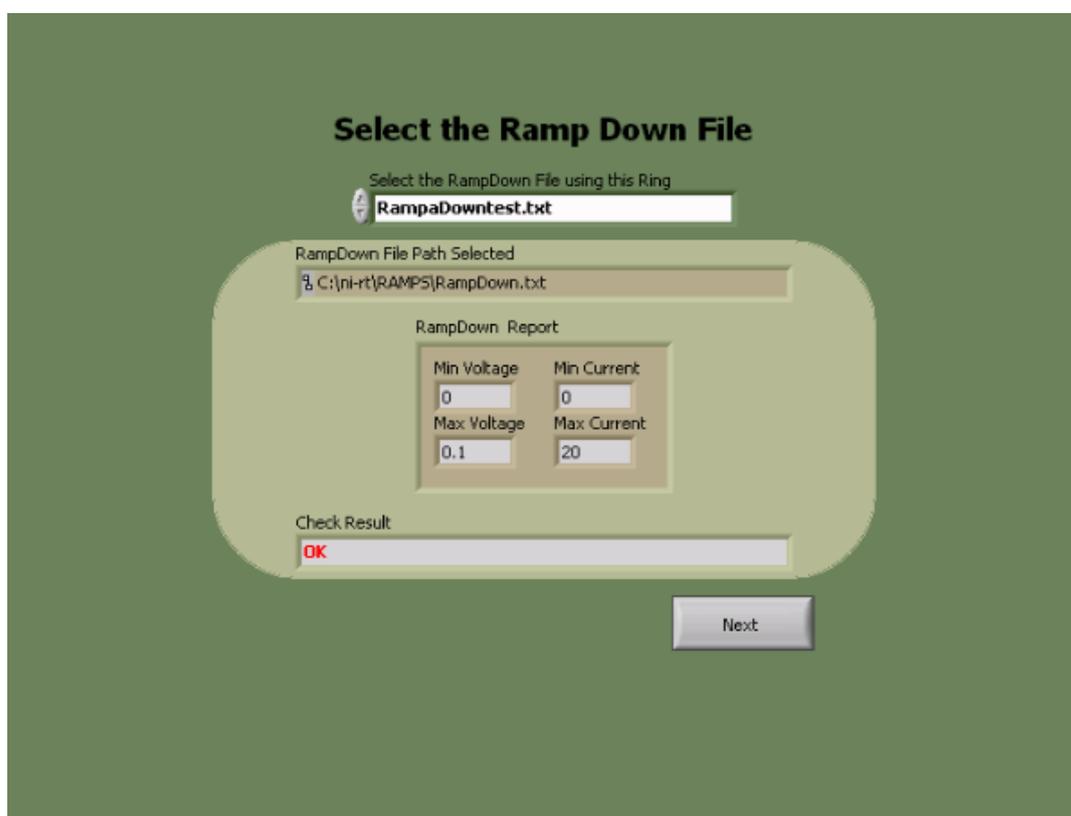


Figura 6-4: Selezione della rampa di carburizzazione

E' possibile selezionare la rampa di carburizzazione desiderata, scorrendo le voci attraverso le frecce a lato del menu ( *Select the carburization ramp file using this ring* ).

Se la rampa è tabulata e creata in maniera corretta (per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 4.3 – Stati di inizializzazione – Stato 1002 ), allora viene visualizzato *OK* sul campo *CHECK RESULT* e viene offerta un' anteprima dei valori minimi e massimi che corrente e tensione assumeranno durante il processo di carburizzazione.

Successivamente viene caricata la ramp-down (figura 6-5).

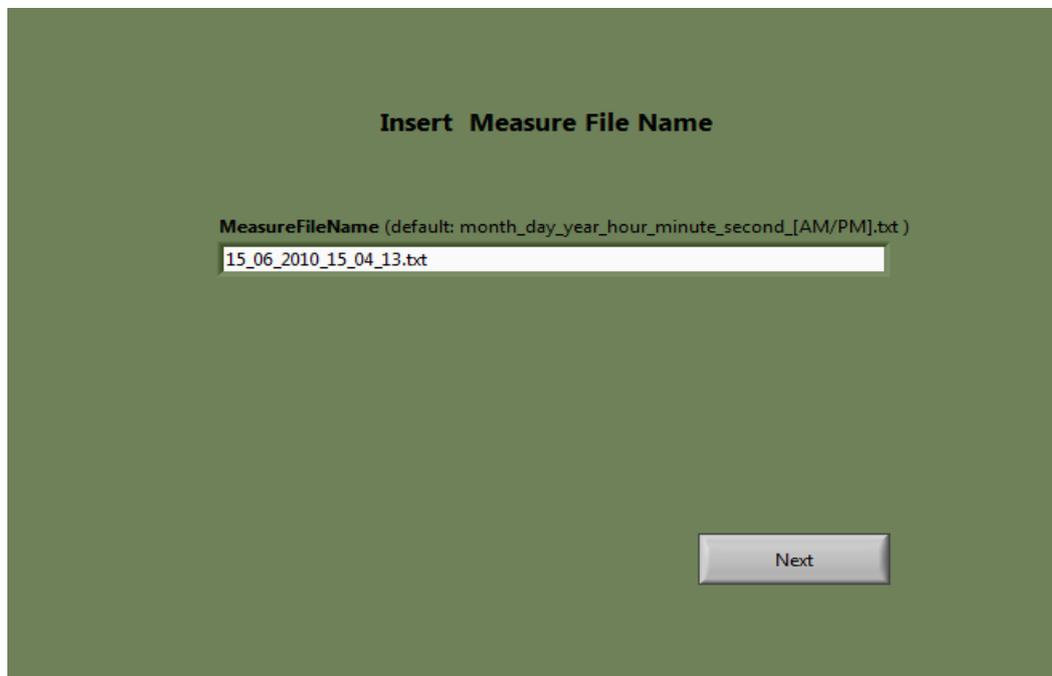


**Figura 6-5: Selezione ramp-down**

Analogamente a prima, è possibile selezionare la ramp-down desiderata, scorrendo le voci attraverso le frecce a lato del menu ( *Select the ramp down using this ring*).

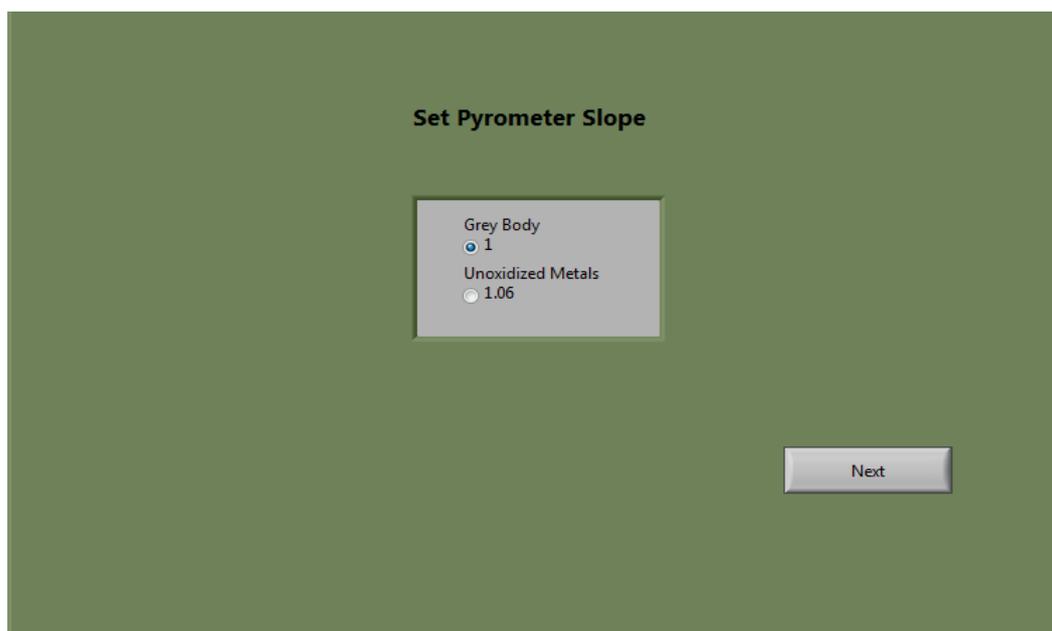
Se la rampa è tabulata e creata in maniera corretta (per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 4.3 – Stati di inizializzazione – Stato 1003), allora appare *OK* sul campo *CHECK RESULT* e viene offerta un' anteprima dei valori minimi e massimi che corrente e tensione assumeranno durante la fase di ramp-down.

Terminate le verifiche sulle rampe, la successiva finestra richiede di immettere un nominativo per il file di misure. Se non viene inserito alcun nome, il file di misure prende come nome di default la data, l'ora, minuti e secondi correnti (figura 6-6).



**Figura 6-6: Inserimento nome file di misure**

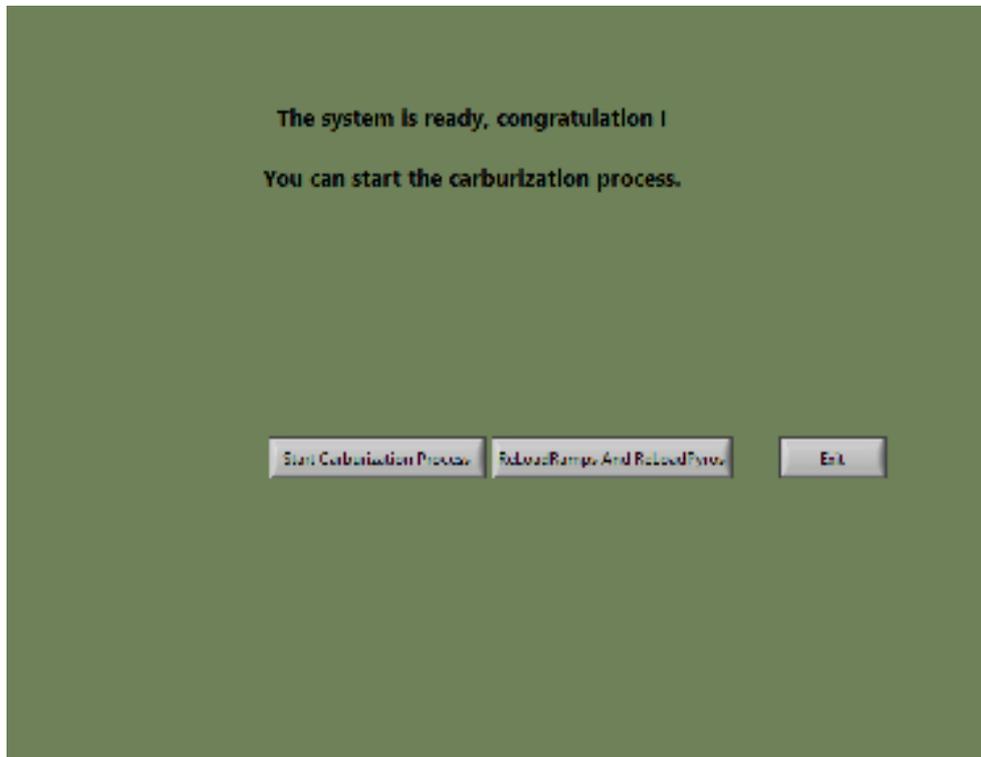
L'ultima schermata che viene mostrata in questa fase di avvio, è la schermata relativa al pirometro. Si tratta dell'impostazione del parametro di pendenza per la misura di temperatura (figura 6-7).



**Figura 6-7: Impostazione parametri pirometro**

## 6.2 Schermate di monitoraggio sistema

Ultimata la procedura di inizializzazione e di avvio, il programma propone la schermata in figura 6-8, che informa che il sistema è pronto per procedere con il trattamento termico.



**Figura 6-8: Schermata di inizio trattamento termico**

Si attende la scelta da parte dell'operatore.

Attraverso la pressione dei 3 pulsanti, è possibile procedere con la fase di carburizzazione, oppure ricaricare le rampe e i parametri del pirometro oppure arrestare l'esecuzione del programma (per maggiori dettagli si faccia riferimento al paragrafo 4.4 Stati del processo di carburizzazione – Stato 600).

Dopo aver scelto la voce per dar inizio il processo di carburizzazione, il programma mostra la seguente videata (figura 6-9).



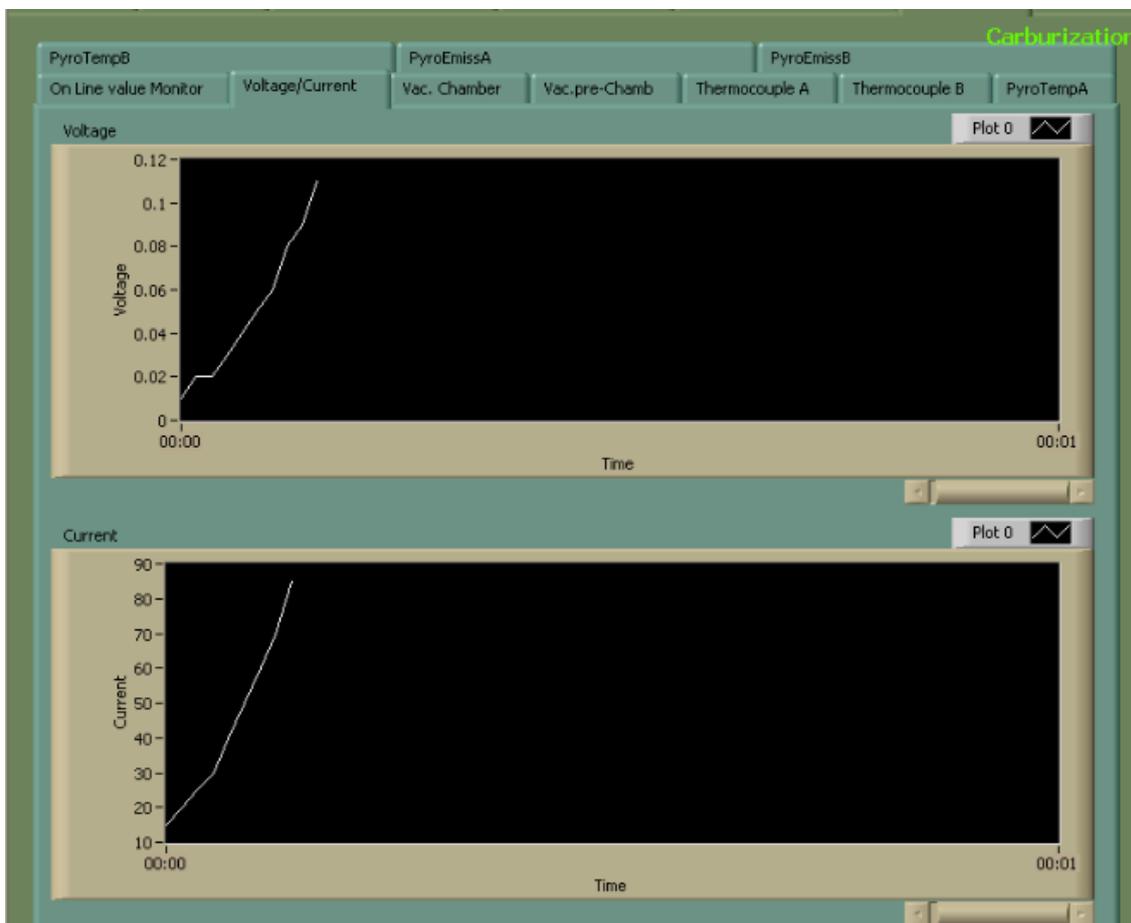
**Figura 6-9: Schermata di monitoraggio del processo di carburizzazione**

Vengono monitorate le temperature e le pressioni della camera target, le tensione e le correnti degli alimentatori (con relativo calcolo della potenza applicata alla camera), l'emissività del materiale di cui è composto il target e le tempistiche della rampa (step in progress, tempo totale del processo, tempo rimanente e tempo trascorso).

Come si può notare in figura 6-9, selezionando i vari tab *Voltage/Current*, *Vac. Chamber*, *Vac.pre-Chamber*, etc.. presenti nella parte alta della schermata, la grandezza monitorata viene riportata in appositi grafici che pongono le variabili considerata lungo l'asse y e la variabile tempo lungo l'asse x.

Si può notare il termometro a barra marcato come *Thermoc. B* in figura, che è stato aggiunto in seguito all'installazione del secondo controllore di temperatura.

In figura 6-10 viene mostrato un tipico grafico utilizzato per la rappresentazione dell' andamento temporale della grandezza fisica in esame.



**Figura 6-10: Grafico per la rappresentazione dell' andamento temporale della tensione e della corrente applicate alla camera target**

Tale rappresentazione offre una prima stima dell' evoluzione temporale della grandezza fisica, permettendo di capire se l'andamento può considerarsi accettabile o meno. Se ci sono anomalie o stranezze, allora si potranno notare delle irregolarità sulla traccia grafica.

L'operatore prenderà in esame, valuterà ed interpreterà il fenomeno per capire se intervenire in maniera da terminare preventivamente il trattamento e/o avviando anzitempo il processo di ramp-down.

E' prevista la possibilità di aggiungere un commento di carattere esplicativo in corrispondenza del relativo step in progress.

Questo commento viene salvato e archiviato nel file misure (si faccia riferimento al paragrafo 6.5 – File di log e file di report misure).

La successiva figura mostra la finestra per il monitoraggio del processo di ramp-down (figura 6-11).



**Figura 6-11: Schermata di monitoraggio del processo di ramp-down**

Analogamente alla schermata del processo di carburizzazione, questa finestra effettua il monitoraggio delle temperature e delle pressioni della camera target, delle tensioni e delle correnti degli alimentatori (con relativo calcolo della potenza applicata alla camera), dell'emissività del materiale del target e delle tempistiche della rampa (step in progress, tempo totale del processo, tempo rimanente e tempo trascorso).

Si può notare il termometro a barra marcato come *Thermoc. B* in figura, che è stato aggiunto in seguito all'installazione del secondo controllore di temperatura.

Inoltre, selezionando i vari tab *Voltage/Current*, *Vac. Chamber*, *Vac.pre-Chamber*, etc.. presenti nella parte alta della schermata, la grandezza monitorata viene riportata in appositi grafici che pongono le variabili considerate lungo l'asse y e la variabile tempo lungo l'asse x.

Come nel caso precedente, vengono generati i grafici di figura 6-10, ma questa volta validi per il processo di ramp-down.

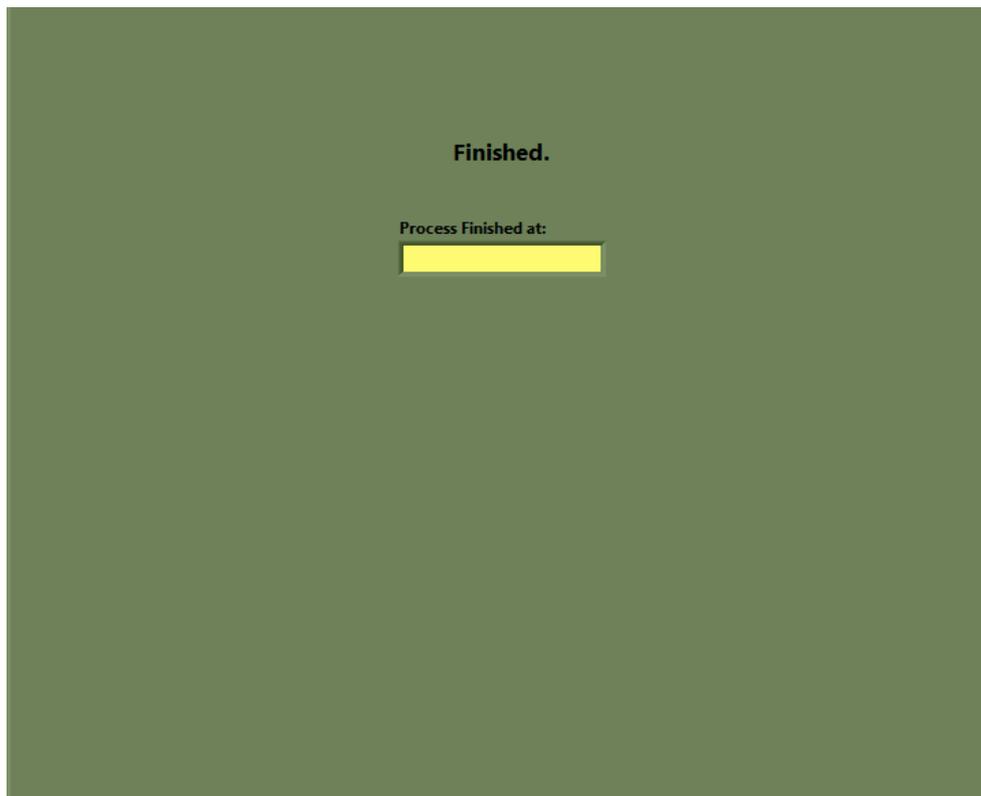
Tale rappresentazione offre una prima stima dell'evoluzione temporale della grandezza fisica, permettendo di capire se l'andamento può considerarsi accettabile o meno. Se ci sono anomalie o stranezze, allora si potranno notare delle irregolarità sulla traccia grafica.

L'operatore prenderà in esame, valuterà ed interpreterà il fenomeno per capire se intervenire in maniera da terminare preventivamente il trattamento.

E' prevista anche la possibilità di aggiungere un commento di carattere esplicativo in corrispondenza del relativo progress step. Questo commento viene salvato e archiviato nel file misure (si faccia riferimento al paragrafo 6.5 – File di log e file di report misure).

La figura 6-12 presenta la schermata di fine trattamento.

Viene indicata nel campo giallo, la data e l'ora in cui il trattamento è stato ultimato (processo di carburizzazione e ramp-down completati).



**Figura 6-12: Schermata di segnalazione fine trattamento**

Quando si conclude il trattamento, il software termina l'esecuzione e si pone in attesa di un successivo avvio.

### 6.3 Segnalazioni errori e/o anomalie

Il programma effettua continuamente delle verifiche sulle condizioni del sistema per evitare di perdere il controllo delle sue parti. Inoltre, il software necessita di alcune condizioni iniziali indispensabili per poter avviare il trattamento.

Di seguito viene presentata una guida alle possibili segnalazioni di errore che si potrebbero riscontrare con le relative risoluzioni al problema.

Errore	Descrizione	Risoluzione problema
5500 Failure : Water	Non è stata rilevata la presenza dell'acqua nel circuito di raffreddamento.	Assicurarsi che il circuito di raffreddamento dell'acqua sia aperto e che l'acqua sia effettivamente circolante al suo interno.
5500 Failure : Vacuum	La camera target non ha raggiunto il corretto livello di vuoto.	Assicurarsi che le pompe siano azionate e che la camera target abbia raggiunto la soglia di vuoto prestabilita ( $\sim 10^{-6}$ mbar).
0xBFFC0011 <ERR> This Instrument is not supported by this driver!	L'errore viene generato dai subVI relativi al regolatore Eurotherm.	Il regolatore di temperatura installato non è compatibile con i driver.
Error in GEN_Open_TCP.vi Impossible to establish a communication with device. Check the network connection and the Genesys Power Supply Settings.	L'errore viene generato dal subVI GEN_Open_TCP.vi. Segnala che non è possibile instaurare una comunicazione col il dispositivo alimentatore.	L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano accesi e che i settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web server del modulo master [13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia impostato come remote port 8000 (vedi figura 6-2).
0xBFFC0011 <ERR> Error in GEN_Init_TCP.vi The ID Query failed. This may mean that you selected the wrong instrument or your instrument did not respond. You may also be using a model that is not officially supported by this driver. If you are sure that you have selected the correct instrument and it is responding, try disabling the ID Query.	L'errore viene generato dal subVI GEN_Init_TCP.vi.	L'alimentatore installato non è compatibile con i driver.
Error in GEN_Config_TCP.vi Impossible to set Genesys power	L'errore viene generato dal subVI GEN_Config_TCP.vi. Segnala che non è possibile	L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano acceso e che i

<p>supply in remote mode.</p>	<p>settare il dispositivo in Remote Mode.</p>	<p>settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web server del modulo master[13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia impostato come remote port 8000 (vedi figura 6-2).</p>
<p>Error in GEN_Config_TCP.vi Impossible to disable foldback protection.</p>	<p>L'errore viene generato dal subVI GEN_Config_TCP.vi. Segnala che non è possibile disabilitare la protezione al cortocircuito.</p>	<p>L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano acceso e che i settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web server del modulo master[13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia impostato come remote port 8000 (vedi figura 6-2).</p>
<p>Error in GEN_Config_TCP.vi Impossible to set the OverVoltage Protection to desired value.</p>	<p>L'errore viene generato dal subVI GEN_Config_TCP.vi. Segnala che non è possibile settare la protezione di sovratensione al valore desiderato.</p>	<p>L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano acceso e che i settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web server del modulo master[13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia impostato come remote port 8000 (vedi figura 6-2).</p>
<p>Error in GEN_Config_TCP.vi Impossible to set the desired Voltage value.</p>	<p>L'errore viene generato dal subVI GEN_Config_TCP.vi. Segnala che non è possibile settare il valore di tensione al valore desiderato.</p>	<p>L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano acceso e che i settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web server del modulo master[13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia impostato come remote port 8000 (vedi figura 6-2).</p>
<p>Error in GEN_OnOff_TCP.vi Impossible to turn on Genesys power supply. This may mean that an over-temperature or an AC fault</p>	<p>L'errore viene generato dal subVI GEN_OnOff_TCP.vi. Segnala che non è possibile attivare l'uscita dell'alimentatore.</p>	<p>L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano acceso e che i settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web</p>

occurs.		server del modulo master[13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia impostato come remote port 8000 (vedi figura 6-2).
Error in GEN_SetVI_TCP.vi Voltage value set isn't the value configured in the power supply. This may mean that Genesys power supply not been configured.	L'errore viene generato dal subVI GEN_SetVI_TCP.vi. Segnala che non è stato settato il valore di tensione.	L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano acceso e che i settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web server del modulo master[13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia impostato come remote port 8000 (vedi figura 6-2).
<ERR>GEN SetVI. Current value set isn't the value configured in the power supply. This may mean that Genesys power supply not been configured.	L'errore viene generato dal subVI GEN_SetVI_TCP.vi. Segnala che non è stato settato il valore di corrente.	L'alimentatore potrebbe essere spento. Assicurarsi che gli alimentatori siano acceso e che i settaggi di rete (IP Address e remote port) siano corretti. In caso, accedere alla pagina web server del modulo master[13] e settare come IP Address 192.168.0.7. Verificare che il software abbia come remote port 8000 (vedi figura 6-2).

**Tabella 1: guida alla risoluzione degli errori**

Altri possibili errori che si possono incontrare sono legati ad anomalie di National Instruments VISA (Virtual Instrument Software Architecture).

Sono errori tipicamente legati alla comunicazione seriale e/o ethernet.

Infatti il software VISA, fornito da National Instrument, è un' interfaccia tra l'ambiente di sviluppo LabVIEW e l'hardware che si incarica di instaurare e configurare, previe opportune impostazioni, la comunicazione tra i componenti.

Per errori di legati strettamente a NI VISA, si faccia riferimento direttamente all' help di LabVIEW.

## 6.4 I file di log e i file di report misure

I file di log vengono creati immediatamente all'avvio del programma e il loro compito è di archiviare, step by step, gli stati della FSM e di tenerne traccia fornendo il riferimento temporale di ciascun step.

In questa maniera l'esecuzione viene continuamente visionata, con la possibilità di recuperare informazioni in caso di eventuali malfunzionamenti (e agevolare la successiva fase di indagine).

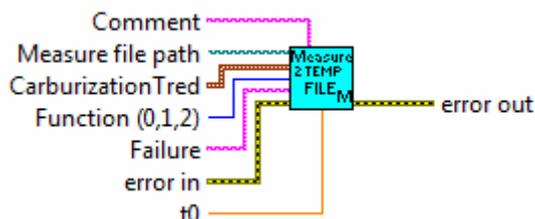
I file di misure vengono creati durante l'inizializzazione del sistema (si faccia riferimento al paragrafo 4.3 Stati di inizializzazione – Stato 1004).

In questi file vengono salvati e storicizzati i valori delle grandezze da monitorare.

Per ottenere una maggiore chiarezza sui dati raccolti, i file di misure possono mostrare a fianco dei campi di misura delle note chiarificatrici che vengono aggiunte dall'operatore durante il trattamento (cliccando sulla voce *INSERT COMMENT* presente sulla schermata di monitoraggio del sistema – si faccia riferimento a paragrafo 6.3 – Schermate di monitoraggio sistema).

### 6.4.1 Creazione e tabulazione file di log e file di misure

Il VI dedicato alla creazione e alla scrittura dei file di misure e dei log file è denominato *StoreMeasuresTwoPyrosTwoTemp.vi*.



**Figura 6-13: StoreMeasuresTwoPyrosTwoTemp.vi – icona e connessioni**

Fornendo a *Function* il numero:

0 – si crea un file in cui viene predisposta un'intestazione che riporta in più colonne, separate ciascuna da opportune tabulazioni, il nome della grandezza con la relativa unità di misura. Tale predisposizione sarà utile in fase di incolonnamento e salvataggio delle misure acquisite.

Vengono utilizzati i caratteri speciali *\s* e *\t* che rappresentano rispettivamente, spazio e tabulazione.

1 - aggiunge le misure al file. Il file archivia in una nuova riga tutte le misure rilevate.

Viene effettuata la conversione di ogni numero in stringa (con generazione di stringa vuota in caso il numero in questione sia NaN).

2 - aggiunge un commento all'ultima riga. Permette di aggiungere un commento a carattere esplicativo in corrispondenza del relativo step in progress. Analogamente al punto precedente, il commento consiste in una stringa concatenata con un carattere tab che viene inserita in coda al file.



## Appendice

### A.1 *Glossario dei termini*

<b>CERN</b>	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
<b>ENEA</b>	Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
<b>INFN</b>	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
<b>ISOL</b>	Isotope Separation On-Line
<b>FEBIAD</b>	Forced Electron Beam Induced Arc Discharge
<b>LNL</b>	Laboratori Nazionali di Legnaro
<b>ORNL</b>	Oak Ridge National Laboratory
<b>PET</b>	Positron Emission Tomography
<b>RIB</b>	Radioactive Ion Beams
<b>RILIS</b>	Resonant Ionization Laser Ion Source
<b>SPES</b>	Study and Production of Exotic Species
<b>VI</b>	Virtual Instrument, si fa riferimento a programmi creati in LabVIEW (mentre con il termine <i>subVI</i> fa riferimento a sottoprogrammi LabVIEW)

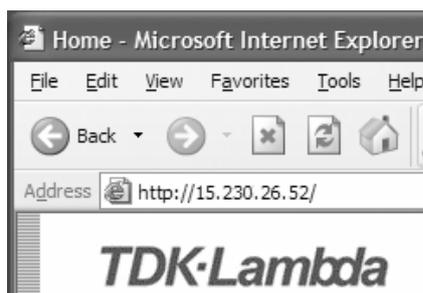
## A.2 Configurazione IP address modulo Master

Quando si sta per collegare il modulo master in una rete LAN o si cerca di ripristinare il collegamento in seguito ad un problema di connessione, è necessario :

- 1) Spegnerne i moduli GEN10-330
- 2) Impostare i dip switch come mostrato in figura 5-1
- 3) Riaccendere i moduli GEN10-330
- 4) Seguire la procedura mostrata in figura 5-4 per recuperare l'indirizzo IP dell'alimentatore.
- 5) Impostare l'IP address dell' Host PC in maniera che sia nella stessa sottorete del modulo alimentatore.

Accedere al *Pannello di controllo del PC* → *Connessioni di rete* → *Protocollo IP* e selezionarne le *Proprietà*. Immettere un generico IP avendo cura di mantenere i primi tre campi uguali ai primi tre dell'alimentatore (ad esempio, se l'alimentatore presenta 169.254.70.67 come IP address, allora il PC verrà settato con l' IP address 169.254.70.XX dove XX rappresenta un qualsiasi numero compreso tra 0 e 254 ad eccezione di 70 ).

- 6) Accedere ad un generico browser, ad esempio Internet Explorer, per entrare nella web page del modulo e immettere sulla barra degli indirizzi, l' indirizzo IP dell' alimentatore



Apparirà la home page del modulo TDK-Lambda

TDK-Lambda  
LAMBDA

Genesys™  
Programmable DC Power LXI

Welcome		LAN	
Model	GEN-30-20 LXI	IP Address	17.20.20.00
Manufacturer	TDK-Lambda	MAC Address	00:1B:19:00:00:01
Serial Number	3142703827	Host Name	17.20.20.00
Description	Removable Power Supply	EM Class	C
Maximum Output Ratings	30V 20A 750W	LXI Version	1.1
Internal Revision	01.0.00.4.14.02A-00.00	Auto-MDI	Yes
LAN Name using IP Address	10.11.17.20.26.52.169.16	Auto Negotiate	Yes
LAN Name using DHCP	10.11.17.20.26.52.169.16		
RS-485 Address	0		

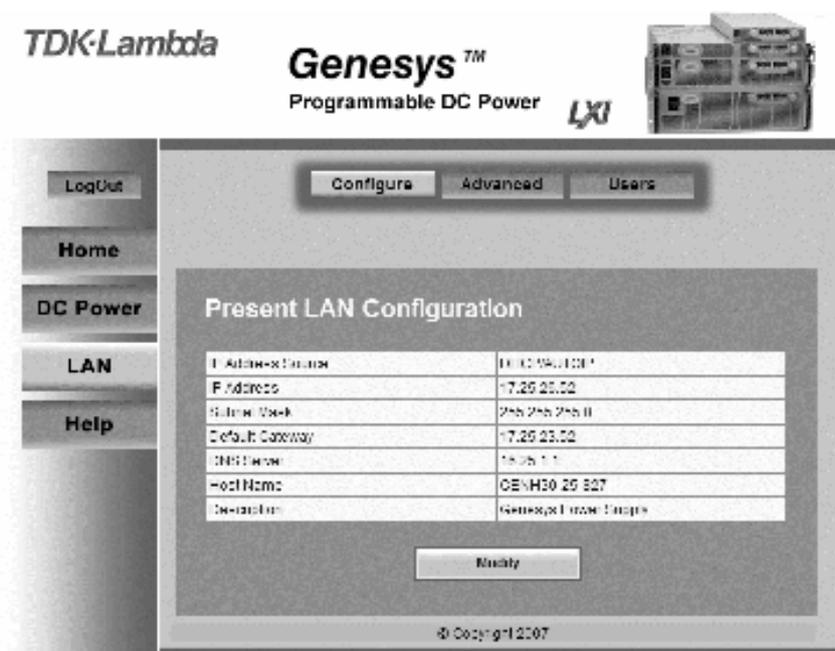
©2007 TDK-Lambda

7) Per cambiare le impostazioni LAN, è necessario accedere alla *LOGIN*



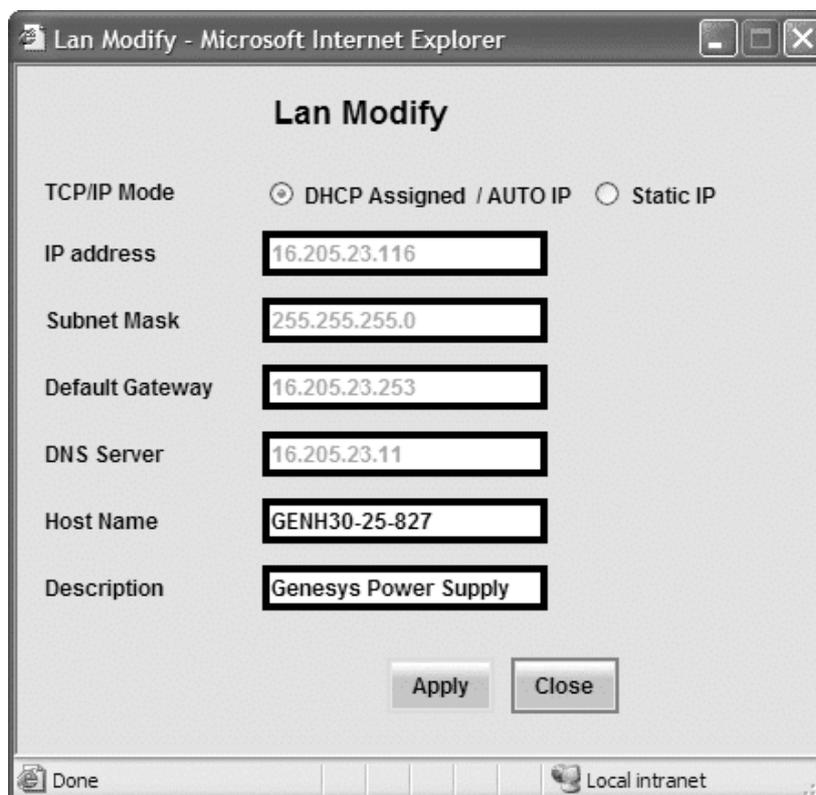
Cliccare sulla voce *Login*, apparirà una finestra pop-up e immettere sul campo *USER NAME* la parola *admin*.

8) Accedere alla pagina *LAN* → *Configure* e selezionare la voce *Modify*



Parameter	Value
IP Address/Default	10.225.26.76
F Address	17.25.25.52
Subnet Mask	255.255.255.0
Default Gateway	17.25.25.52
DNS Server	19.25.1.1
Host Name	GENESYS 25 527
Description	Genesys Programmable DC Power

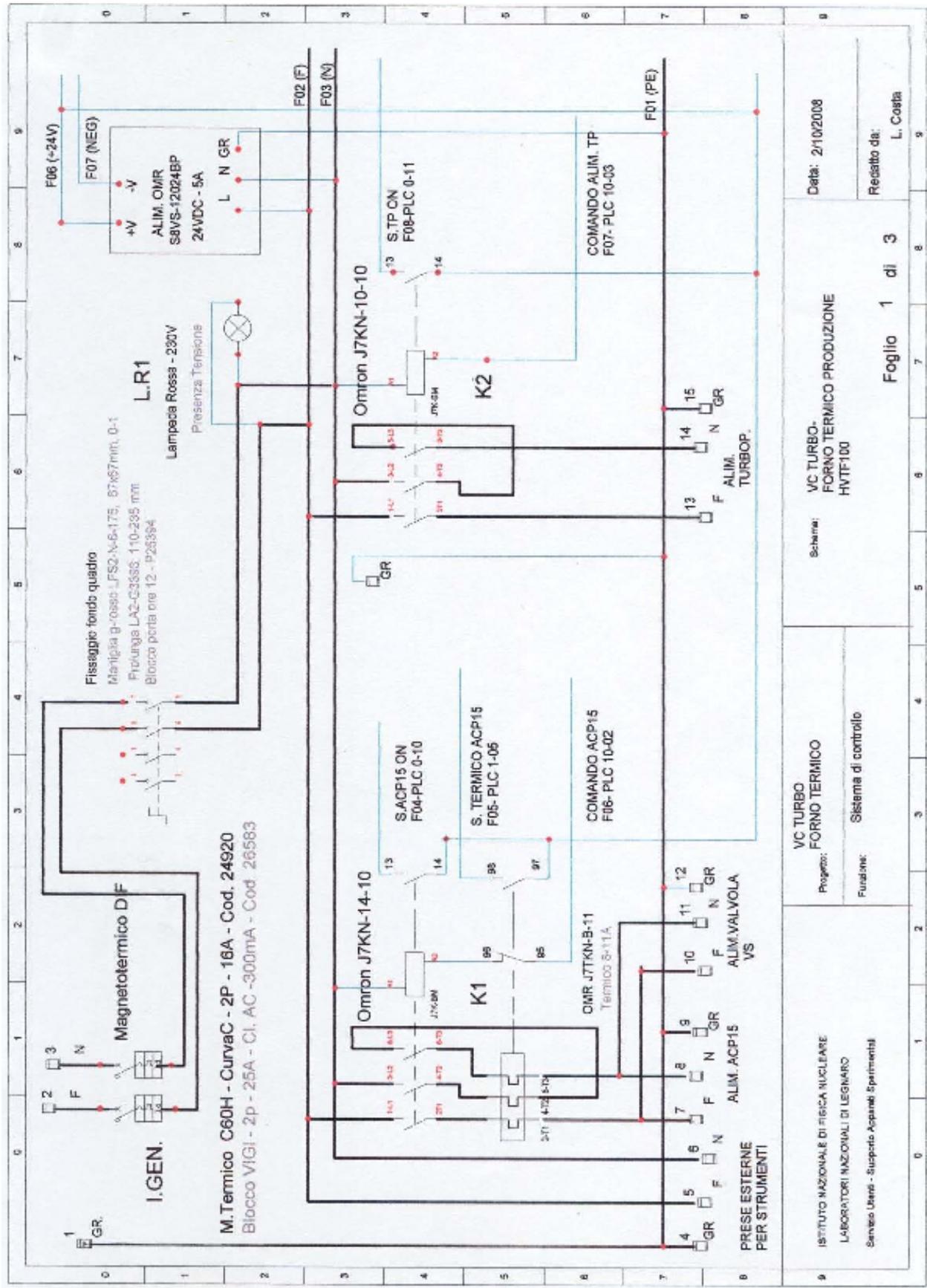
Appare la seguente schermata

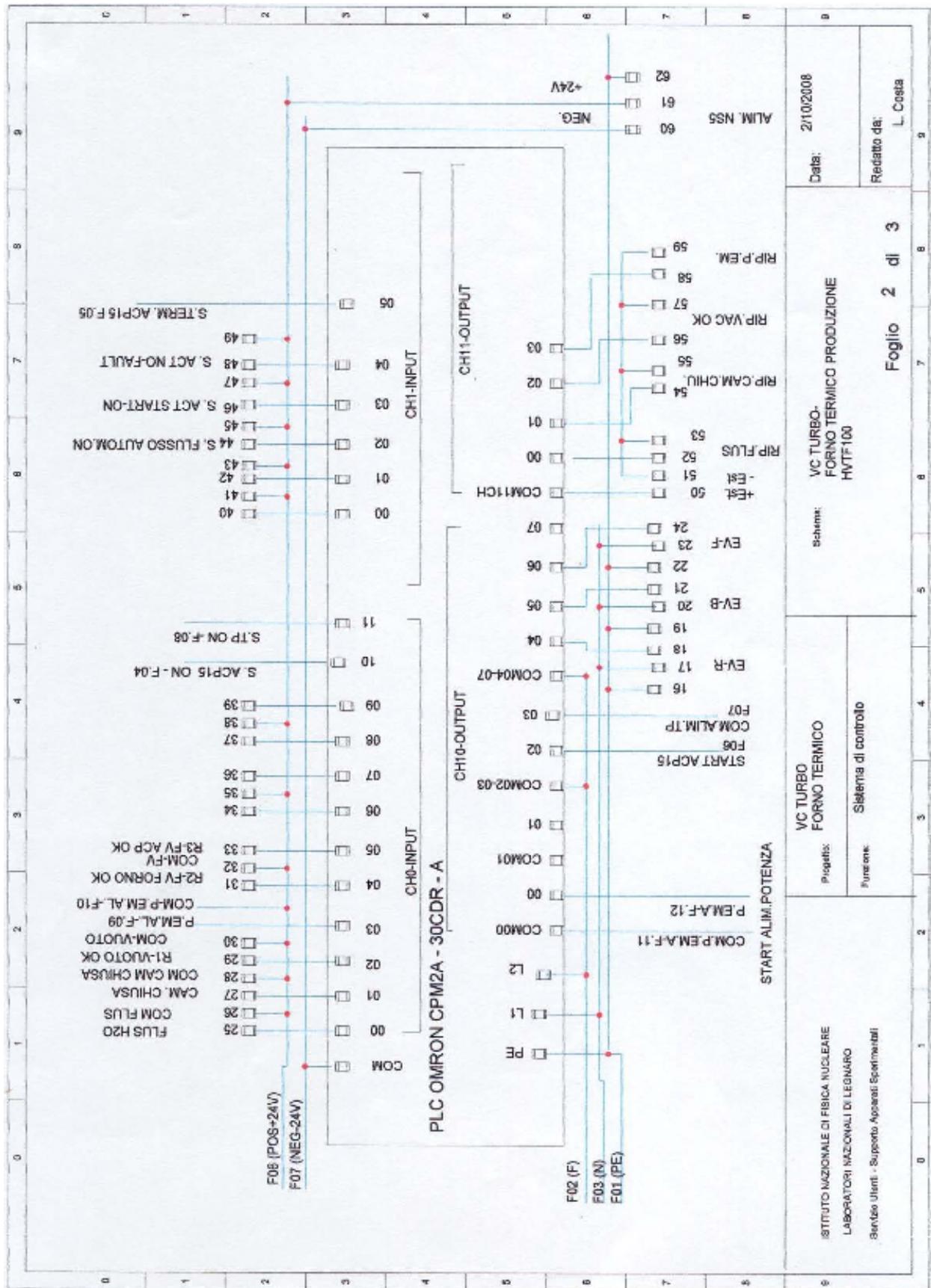


Selezionare *Static IP* e nel campo *IP address* immettere *192.168.0.7*

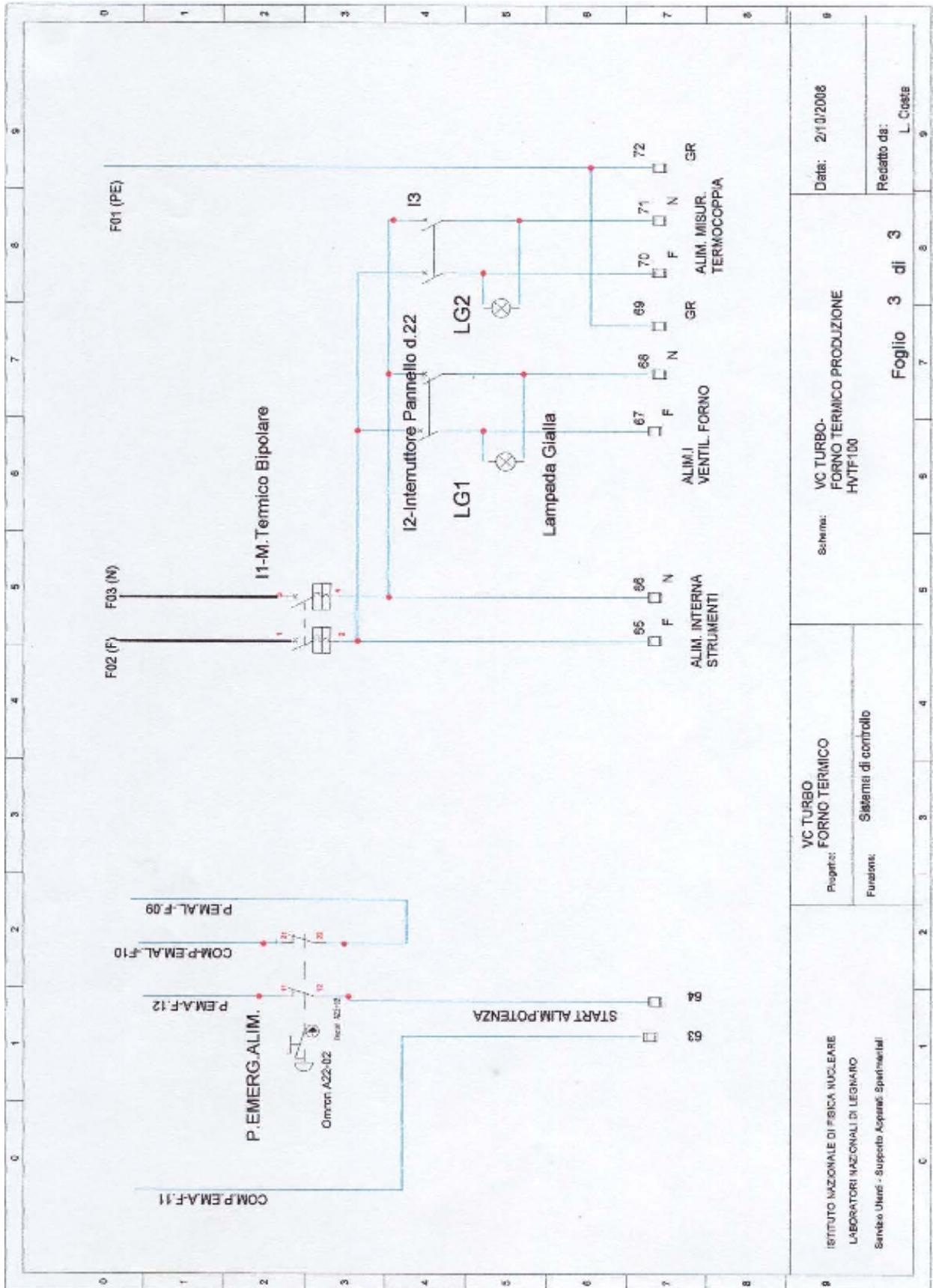
- 9) Ripristinare l'IP address dell'host PC seguendo la procedura al punto 5) avendo cura di immettere l'indirizzo *192.168.0.6* (sottorete SPES per il forno di produzione)

### A.3 *Schemi quadro elettrico del forno di produzione*





ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO Servizio Utenti - Supporto Apparatisti Specializzati	Progetto: VC TURBO-FORNO TERMICO	Schema: VC TURBO-FORNO TERMICO PRODUZIONE HVTF-100	Data: 2/10/2008
	Funzione: Sialtina di controllo	Foglio 2 di 3	Redatto da: L. Costa



ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO Servizio Utens - Supporto Apparat. Sperimentali	VC TURBO- FORNO TERMICO	Schema: VC TURBO- FORNO TERMICO PRODUZIONE HVTF100	Data: 2/10/2008
	Progett.: Funzioni: Sistemi di controllo	Foglio 3 di 3	Redatto da: L. Costa

## Bibliografia

- [1] G.Ciavola, *Fasce di ioni radioattivi ai laboratori nazionali del sud dell'INFN: il progetto EXCYT*, 1999
- [2] M. Lindros, *Review Of ISOL-type radioactive beam facilities*, EPAC, 2004.
- [3] <http://www.ganil-spiral2.eu/eurisol>
- [4] A.Andrighetto, *The SPES Project at LNL*. AIP (American Institute of Physics), 2009.
- [5] G. Meneghetti, M. Manzolaro, A. Andrighetto, *Design of the SPES Target Heating System: theoretical analyses and comparison with experimental data*. TCN CAE, 2008.
- [6] A.Covello, G.Prete, *SPES Technical Design Report*. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Legnaro, Aprile 2008.
- [7] M.Manzolaro, *Analisi termica e strutturale del bersaglio diretto per la produzione di fasce radioattivi per il progetto SPES, Tesi di Laurea Specialistica*. Università degli Studi di Padova, a.a. 2006-2007
- [8] M. Deicher, *Radioactive isotopes in solid state physics*, Vol. 33 n°3, Europhysics News, 2002
- [9] R. Tinti, *Applicazioni di fisica nucleare in radioterapia e diagnostica medica*, 2003.
- [10] <http://www.wikipedia.org>
- [11] *Corso LabVIEW per la preparazione all'esame CLAD*. s.l. : National Instrument Italy, 2005.
- [12] <http://www.ni.com>
- [13] [http://www.us.tdk-lambda.com/hp/product\\_html/genesys2u3\\_3.htm](http://www.us.tdk-lambda.com/hp/product_html/genesys2u3_3.htm).
- [14] <http://www.eurotherm.com/en-US/products/controllers/single-loop/2200/2216/>
- [15] <http://tools.ietf.org/html/>
- [16] <http://www.tcpipguide.com/>
- [17] <http://isolde-project-rilis.web.cern.ch/isolde-project-rilis/intro/principle.html>
- [18] <http://www.modbus.org/>



## Ringraziamenti

Un grazie al Dott. Andrighetto per avermi dato la possibilità di conoscere e lavorare presso l'INFN-LNL, ambiente particolarmente stimolante e formativo.

Rivolgo un grandissimo ringraziamento a Mauro Giacchini, che mi ha seguito e mi ha aiutato con dedizione durante questi mesi.

Un ringraziamento a tutto il team del progetto SPES, in particolar modo a Mattia Manzolaro, Lisa Biasetto, Michele Lollo, Giorgio Bassato e Luciano Costa...Grazie a tutti per il tempo che mi avete dedicato e per gli insegnamenti che mi avete trasmesso, grazie per la vostra disponibilità e per avermi permesso di raggiungere con successo tutti gli obiettivi prefissati all'inizio di questo tirocinio.

Inoltre, come non citare i colleghi laureandi (al momento in cui scrivo, già laureati) con i quali è stato un piacere confrontarmi, riflettere e ragionare per trovare soluzioni appropriate e performanti.

Ringrazio tutti i ragazzi...Maurizio, Clelia, Nicola Baccini, Nicola Conforto, Loris, Nicola Deieso, Andrea Baraldo, Jacobo Montano, Alberto Cavazza e Stefano Corradetti.

Devo dire tante grazie a Jesus Vasquez, al quale sono molto grato per avermi aiutato a risolvere alcuni problemi che si sono presentati strada facendo e che si sono mostrati più ostici del previsto...ma dai quali siamo riusciti a venirme fuori integri, felici e temprati...muchas gracias Jesus!

Un doveroso ringraziamento di cuore a tutta la Telema-Computers di Padova che in questi anni mi ha dato la possibilità di portare avanti la carriera universitaria affiancandola all'esperienza lavorativa, dandomi la possibilità di imparare e arricchire il mio personale bagaglio di conoscenze...Grazie Telema!

Infine, ultimo ma il più importante...il mio totale riconoscimento alle persone alle quali devo molto se non tutto...Grazie infinite e di cuore a tutta la mia famiglia che mi è stata sempre vicina e che mi ha sempre sostenuto trasmettendomi forza e coraggio per andare avanti anche nei momenti più duri e difficili.

Grazie infinite e di cuore a mamma, papà, Jonathan, nonna Armida e nonno Alfredo...promessa mantenuta!

Un enorme ringraziamento a tutti i miei amici ed in particolare al mio amico Enrico (alias ciccio e/o paeta) e al mio amico Manuel (alias cobra) che mi hanno sempre capito, aiutato, sostenuto e sollevato il morale e l'umore quando le cose in questi anni si sono presentate particolarmente ostili, dure e pesanti...per la serie... "RIDI E BALLA CHE TUTTO PASSA"...alla fine ce l'abbiamo fatta, grazie di cuore raga!

*.....Io, figlio d'una casalinga e di un impiegato,  
cresciuto fra i saggi ignoranti di montagna  
che sapevano Dante a memoria e improvvisavano di poesia,  
io, tirato su a castagne ed erba spagna,  
io, sempre un momento fa campagnolo inurbato,  
due soldi d'elementari ed uno d'università,  
ma sempre il pensiero a quel paese mai scordato  
dove ritrovo anche oggi quattro soldi di civiltà...*

*(Addio, F.Guccini )*