

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI  
DI PADOVA**  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Dipartimento di Ingegneria Industriale

**ISTITUTO NAZIONALE  
DI FISICA NUCLEARE**  
Laboratori Nazionali di Legnaro

Under the Auspice of the TESLA TECHNOLOGY COLLABORATION

**TESI DI MASTER**  
in  
**"Surface Treatments for Industrial Applications"**

**CONCEPTUAL DESIGN DEL SISTEMA DI  
TRATTAMENTO ARIA PER LA GESTIONE DELLA  
RADIOATTIVITÀ INDOTTA DA CICLOTRONE PER  
LA PRODUZIONE DI RADIONUCLIDI**

Relatore: Ing. P. Favaron  
Correlatore: Ing. M. Calderolla

Direttore del Master: Prof. V. Palmieri

Studentessa: Nicoletta Ciatara  
N. Matr.: 1111604

Anno Accademico 2014-2015



# Sommario

1.	Introduzione .....	7
1.1	Il progetto SPES e il progetto LARAMED .....	10
1.1.1.	Principali richiami sulla fisica di SPES/LARAMED .....	12
1.1.2.	Radioisotopi da ciclotrone per radiofarmaci .....	14
1.1.2.	Principali caratteristiche del ciclotrone B70 del LNL .....	17
1.2.	La radioattività prodotta dai target SPES/LARAMED .....	19
1.2.1.	Il target in UCx della facility SPES .....	21
	Produzione di specie radioattive nel target lamellare SPES mediante fissioni dirette da protoni .....	26
1.2.2.	Caratteristiche fisico-ingegneristiche dei target per la produzione di radioisotopi con la facility LARAMED .....	29
	Modalità di deposizione su substrati per produzione di target .....	30
	Produzione dei target con tecniche Sputtering .....	32
1.3.	Analisi della radioattività indotta dall'uso di un fascio di protoni .....	33
1.3.1	Attivazione delle pareti delle sale di irraggiamento: problematiche radioprotezionistiche .....	33
1.3.2.	Radioattività indotta nell'aria: criteri per il controllo dei limiti vigenti .....	41
2.	Edificio SPES e produzione di radiofarmaci da ciclotrone .....	45
2.1.	Descrizione del layout generale delle sale sperimentali .....	48
2.1.1.	Bunker di irradiazione SPES .....	49
2.1.2.	Bunker di irradiazione LARAMED .....	52
2.1.3.	Normative internazionali di riferimento .....	53
2.2.	Requisiti strutturali e impiantistici .....	58
2.2.1.	Specifiche progettuali .....	60
2.2.2.	Criteri di dimensionamento impiantistico .....	62
	Centrali termica e frigorifera .....	62
	Centrale idrica .....	62

Sottocentrale termofrigorifera.....	63
Impianti di climatizzazione e raffreddamento apparati.....	64
Impianti aeraulici.....	65
Impianti di distribuzione gas tecnici.....	66
Impianto idrosanitario e di scarico .....	66
Impianti elettrici a servizio dei termotecnici .....	66
Regolazione automatica.....	67
3. Descrizione del sistema di aeroventilazione.....	69
3.1. Tecniche di trattamento aria .....	69
3.1.1. Sistemi di depressurizzazione.....	71
Impianto di depressurizzazione a servizio della Cyclotron Room (A1).....	72
Impianto di depressurizzazione a servizio dei Bunker Isol (A4/A6) .....	73
Impianto di depressurizzazione a servizio dei Bunker Isol (R1/R2/R3) .....	74
3.1.2. Unità di Trattamento Aria (UTA).....	75
Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Cyclotron Room (A1) .....	76
Impianto di rinnovo forzato aria a servizio dei bunker Isol (A4/A6).....	78
Impianto di ricircolazione aria a servizio dei Bunker Isol (A4/A6).....	80
Impianto di rinnovo forzato aria a servizio del locale tecnico (A17/VT2).....	80
Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Control Room (A12) .....	81
Impianti di rinnovo forzato aria a servizio del secondo piano.....	81
3.1.3. Sistemi di filtrazione dell'aria .....	83
Filtrazione assoluta.....	83
Filtrazione a carboni attivi .....	84
3.2. Schemi di funzionamento degli impianti.....	84
3.2.1. Metodo di settaggio delle UTA.....	85
3.2.2. Logiche di regolazione delle UTA .....	91
UTA 1 – UTA 3 .....	91
UTA 2.....	96

UTA 5 .....	100
UTA 5a .....	104
UTA 6 – UTA 7 .....	107
Schema tipico con ciclotrone a regime (esperimento in corso) .....	110
Schema con allestimento esperimento.....	112



# 1. Introduzione

Dall'inizio del XX secolo la fisica nucleare sta esplorando i confini della natura per produrre materia mai osservata in laboratorio; le ricerche di base e le complesse tecnologie appositamente create, hanno spesso portato alla nascita di un gran numero di applicazioni nel campo della medicina, dell'industria e della fisica applicata. Nel corso degli anni l'Europa ha assunto la leadership nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando la costruzione di una nuova generazione di *facility* per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica (lontano, cioè, dalle condizioni di stabilità nucleare note) e di fornire un valido strumento per applicazioni di tipo medico ed industriale

I Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) dell'INFN nell'ambito dei loro programmi scientifici, hanno previsto la costruzione di una *facility* per la produzione e lo studio di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*). Tale programma è coordinato a livello nazionale e prevede la collaborazione tra sei sezioni INFN, l'ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e, a livello internazionale, strette collaborazioni con il CERN (Svizzera-Francia) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

I Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) all'interno del progetto SPES prevedono la produzione selettiva di specie esotiche con la tecnica ISOL e la successiva riaccelerazione di tali specie con il già esistente complesso PIAVE-ALPI che include un acceleratore RFQ e un acceleratore lineare per ioni pesanti (Linac), entrambi superconduttivi.

La tecnica ISOL (Isotope Selection On Line) prevede un acceleratore e un bersaglio primario per la produzione degli isotopi di interesse, la loro estrazione per via termica (evaporazione del bersaglio) e successiva ionizzazione, selezione e riaccelerazione. Il progetto SPES utilizzerà come fascio primario protoni accelerati da un ciclotrone e come bersagli primari vari materiali tra cui il carburo di uranio di cui è previsto l'uso solo in una fase successiva.

Il progetto SPES si caratterizza, inoltre, per la sua multidisciplinarietà, incentrando l'attività di ricerca sia nella fisica nucleare e astrofisica nucleare che nella ricerca di fisica applicata o interdisciplinare. È da queste applicazioni interdisciplinari che è nato nel 2013

il progetto LARAMED (LABoratorio di RADionuclidi per la MEDicina), il cui scopo è quello di condurre ricerche su radionuclidi di tipo innovativo, oltre che sulla produzione, con metodi alternativi, di radionuclidi già noti per interesse medico.

Il progetto SPES ha visto l'installazione nel giugno 2015 di un ciclotrone dotato di un doppio canale di uscita tale da permettere un utilizzo contemporaneo di due fasci accelerati per usi diversi, dalla fisica nucleare alla radiochimica, dalla fisica medica alla medicina nucleare ed oltre. Infatti, finché il primo fascio di protoni da 40 MeV viene usato per ricerca in fisica nucleare (progetto ISOL), il secondo fascio di protoni, con un'energia sintonizzabile in un range da 35 a 70 MeV, fornirà le basi per le ricerche del progetto LARAMED.

Uno tra gli obiettivi principali del progetto LARAMED si inserisce nella volontà della comunità scientifica di ricercare metodi alternativi per la produzione di isotopi fondamentali per le applicazioni nella diagnostica medica: il Tecnezio-99 metastabile (Tc-99m) e il suo nuclide genitore, il Molibdeno-99 (Mo-99). Attualmente la produzione di Mo-99 avviene nei reattori nucleari, attraverso la fissione indotta da neutroni del U-235 (n,f) Mo-99 su bersagli (*target*) di uranio altamente arricchito, cosiddetto *weapon-grade* (contenente più dell'80 % di U-235). La seconda fase è l'estrazione radiochimica e purificazione del Mo-99 dai prodotti di fissione, la terza fase è la produzione del generatore Mo-99 /Tc-99m, poi consegnato negli ospedali. (1)

L'isotopo più usato nella diagnostica è il Tc-99m; in tutto il mondo ne vengono usate circa 30 milioni di dosi ogni anno. Circa il 70% della produzione mondiale di Mo-99 è fornita da 2 strutture: il reattore NRU di Chalk River (Ontario, Canada) e il reattore HFR di Petten (Paesi Bassi). Nel 2009/2010 entrambe le strutture hanno dovuto affrontare un lungo periodo di stop non preventivato del reattore, provocando un calo della disponibilità del Tc-99m in tutto il mondo. Queste circostanze unite al successivo incidente di Fukushima (Giappone) del 2011 hanno spinto la comunità scientifica a cercare di produrre in maniera alternativa questi nuclidi. Una delle possibilità più concrete è la sostituzione della produzione basata sui reattori con quella basata sugli acceleratori. (2)

Il progetto LARAMED vede la collaborazione dei LNL in particolare riguardo lo studio dei *target* per la produzione di Tc-99m. Tali *target* sono attualmente in fase di sperimentazione e vengono prodotti con tecniche di vuoto (sputtering nella fattispecie). I

numerosi corsi del Master incentrati sulla produzione di radionuclidi per radiofarmaci hanno permesso di focalizzare al meglio l'attività che si svolgerà all'interno dell'edificio SPES grazie all'utilizzo del ciclotrone recentemente installato. Tali informazioni hanno, inoltre, permesso di comprendere maggiormente le problematiche di radioprotezione che rendono necessari determinati parametri progettuali strutturali e impiantistici.

## 1.1 Il progetto SPES e il progetto LARAMED

L'idea del progetto SPES inizia a prendere piede alla metà degli anni '90. Il progetto, nel corso degli anni, ha subito alcune variazioni sia per ragioni logistiche che di costi. Attualmente si suddivide in 4 fasi:

$\alpha$  – Acquisizione, installazione e commissioning di un ciclotrone ad alta intensità;

$\beta$  – Applicazioni nel campo della fisica nucleare, studio delle reazioni con fasci radioattivi riaccelerati, in particolare la riaccelerazione dei fasci esotici con il linac superconduttore ALPI;

$\gamma$  – Produzione di nuovi radioisotopi di interesse medico prodotti da ciclotrone (progetto premiale LARAMED);

$\delta$  – Facility per neutroni utilizzando il fascio del ciclotrone, per varie attività di ricerca in fisica della materia, radiobiologia, medicina, studio del danneggiamento di dispositivi elettronici per applicazioni spaziali e altro ancora.

SPES- $\alpha$  prevede l'acquisizione, installazione e commissioning di un ciclotrone ad alte prestazioni con elevata corrente di uscita ( $\sim 0,75$  mA) e ad alta energia (fino a 70 MeV), insieme con la relativa infrastruttura per l'acceleratore e stazioni sperimentali. Il ciclotrone sarà dotato di due porte di uscita, una configurazione molto adatta per la duplice missione del laboratorio: la ricerca di base e applicazioni tecnologiche. Uno dei due fasci sarà dedicato agli studi sulla struttura nucleare della materia esotica, (producendo ioni *neutron-rich* da collisioni di protoni su un bersaglio UCx); il secondo sarà dedicato alla fisica applicata.

SPES- $\beta$  è stato approvato e parzialmente finanziato dal Governo italiano nell'ambito dei Progetti PREMIALI 2011. Le specie nucleari ricche di neutroni *neutron-rich* saranno accelerate e fatte collidere contro target adeguati. Nelle collisioni, saranno prodotti nuovi nuclei, estremamente ricchi di neutroni, che sono simili a quelli generati nelle fasi stellari avanzate e non sono presenti sulla Terra a causa della loro breve vita. L'indagine su tali sistemi è la nuova frontiera della ricerca in fisica nucleare del nucleo (o di bassa energia), per estendere la conoscenza dei nuclei in condizioni estreme e per fornire informazioni di base per lo studio dell'evoluzione stellare.

SPES- $\gamma$  riguarda la produzione di radionuclidi di interesse medico, utilizzando il ciclotrone SPES- $\alpha$ . L'obiettivo è la produzione di radionuclidi per radiofarmaci innovativi (ad esempio quelli basati sui generatori Sr-82/Rb-82 e Ga-68 / Ge-68), così come la produzione di radionuclidi convenzionali con nuovi approcci sugli acceleratori. A questo proposito lo stato metastabile di Tecnezio-99 (Tc-99m) è di particolare interesse. Questa fase del progetto SPES, che è stato approvato dal MIUR nell'ambito dei PROGETTI PREMIALI 2012 (progetto LARAMED), è il risultato di una collaborazione tra l'INFN, CNR, Università italiane e un partner privato.

SPES- $\delta$  prevede lo sviluppo di una intensa sorgente di neutroni, dal ciclotrone e/o da un acceleratore lineare ad alta intensità basato sulla tecnologia del quadrupolo a radiofrequenza (RFQ). Le applicazioni della sorgente di neutroni variano dall'astrofisica nucleare per testare l'elettronica nello spazio, alla caratterizzazione dei rifiuti nucleari e ai trattamenti tumorali sperimentali. Per lo sviluppo di questo approccio, un accordo è stato sottoscritto da Sogin, Università degli Studi di Pavia e INFN e le munes progetto (multidisciplinare Neutron Source) è stato finanziato dal governo italiano entro i PREMIUM-PROGETTI 2011. (3)

Il progetto LARAMED è quindi una fase, per quanto importante, del progetto SPES.

L'obiettivo principale del progetto LARAMED è lo studio e sviluppo di metodi efficienti per la produzione di radionuclidi di interesse nella medicina utilizzando il nuovo ciclotrone ad alta energia e ad alta corrente. Il progetto è suddiviso secondo alcune linee di ricerca:

1. Lo sviluppo di una tecnologia di bersaglio adatto per il funzionamento con fasci di protoni ad alta corrente e alta energia;
2. Lo sviluppo di metodi alternativi e più efficienti per la produzione di importanti radionuclidi medici, tra cui Tc-99m, Cu-67, I-124, Sr-82, Ge-68 e Zr-89 con il ciclotrone da 70 MeV e 750  $\mu$ A;
3. Determinazione con elevato livello di precisione e rivalutazione di sezioni d'urto (*cross-section*) delle reazioni nucleari impiegate per la produzione di radionuclidi medici;
4. Sviluppo di procedure completamente automatizzate di radiochimica per il target processing, la separazione e la purificazione di radionuclidi medici;
5. Ricerca e sviluppo di nuovi radiofarmaci per imaging guidato e terapia oncologica.

Il progetto LARAMED si propone, quindi, di sfruttare le caratteristiche tecniche del nuovo ciclotrone ad alta corrente da 70 MeV per indagare metodi di produzione ancora inesplorati dei nuovi radionuclidi aventi proprietà nucleari potenzialmente interessanti per le applicazioni mediche e sviluppare metodi più efficienti per la produzione di ben consolidati radionuclidi che già svolgono un ruolo chiave in medicina nucleare, realizzando presso i LNL una *facility* di produzione di un certo numero di importanti radionuclidi medici da distribuire agli ospedali e ai reparti clinici, oltre ad un utilizzo di routine nel trattamento dei pazienti.

### 1.1.1. Principali richiami sulla fisica di SPES/LARAMED

La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede l'impiego di tecnologie estremamente complesse ed innovative; il progetto SPES prevede il bombardamento di un bersaglio (*target*) in carburo di uranio con un fascio primario: in modo da generare, prevalentemente tramite reazioni di fissione nucleare e successivi decadimenti  $\beta$ , specie radioattive all'interno del *target*. Le particelle radioattive generate vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivo.

Solitamente, il *target* 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; questo consente, a parità di volume, di aumentare la superficie di scambio termico radiativo tra il *target* e la scatola che lo contiene: tale accorgimento permette al *target* di smaltire con maggiore efficienza la potenza termica (pari ad 8 kW) prodotta dal fascio protonico che lo investe.

Il principale obiettivo del progetto SPES è di svolgere ricerche all'avanguardia in fisica nucleare attraverso lo studio di nuclei lontani dalla condizione di stabilità. I nuclei radioattivi *neutron-rich* saranno prodotti attraverso la fissione nucleare (con una resa massima di  $10^{13}$  fissioni/s) indotta bombardando il *target*. Essendo il livello stimato di radioattività nel *target* di produzione molto elevato, è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture in modo da garantire la sicurezza in termini di radioprotezione. La *facility* SPES prevede inoltre la realizzazione di sorgenti neutroniche aventi diverse caratteristiche fisiche, attraverso l'impiego di un secondo fascio di protoni ad alta energia. Tale *Neutron*

*Facility* è un obiettivo secondario del progetto SPES, ma permette comunque importanti applicazioni mediche ed interdisciplinari.

La produzione di nuovi radionuclidi per impieghi nella diagnostica o cura in medicina può, infatti, essere realizzata in modo controllato attraverso l'impiego di acceleratori quali i ciclotroni. Questa tecnologia, infatti, permette di ottenere il radionuclide d'interesse ad alta attività specifica in seguito al bombardamento del bersaglio ed al conseguente trattamento chimico di dissoluzione/separazione/purificazione e al suo trasferimento all'interno di una fiala sterile per il successivo uso medico. Attualmente, è possibile ottenere i radionuclidi di uso più diffuso nella PET (F-18, C-11 e N-13, nel seguito indicati come radionuclidi 'standard') per mezzo di ciclotroni a bassa energia. La disponibilità di ciclotroni ad energia medio-alta può consentire di studiare le proprietà biologiche di radio-farmaci marcati con radionuclidi precedentemente non disponibili o difficili da produrre (radionuclidi 'non-standard'), la cui potenziale utilità clinica è già stata dimostrata in letteratura. È possibile quindi identificare alcuni radionuclidi non-standard, che possono essere prodotti in modo efficiente solamente con l'impiego di ciclotroni a medio-alta energia ed alta intensità, per i quali è ragionevole prevedere l'introduzione in medicina nucleare di alcuni utili radiocomposti nel prossimo futuro. Infine, accanto a questi, va considerata la necessità di metodi innovativi per la produzione di radionuclidi in uso da anni, come il Tc-99m

I principali obiettivi della ricerca in fisica nucleare sono i seguenti:

1. Ricerca e Sviluppo di nuovi o più efficienti metodi per la produzione, mediante il ciclotrone di Legnaro da 70 MeV di energia e 750  $\mu$ A di corrente di fascio, di radionuclidi già ben consolidati che rivestono un ruolo fondamentale nella Medicina Nucleare. Inoltre effettuare ricerche ed indagini sperimentali su nuovi metodi di produzione (cioè reazioni nucleari alternative) per nuovi radionuclidi aventi proprietà nucleari potenzialmente interessanti per le applicazioni mediche, ma non ancora disponibili in Medicina Nucleare.
2. Sviluppo di nuove tecnologie per la realizzazione di bersagli dedicati alla produzione di radioisotopi di interesse medico e di ricerca e capaci di sfruttare le elevate correnti (potenze) dei fasci disponibili da acceleratori ad alta intensità. I ciclotroni di prossima generazione, che potrebbero garantire la produzione di radioisotopi destinati alla medicina nucleare in quantità sufficiente a soddisfare una distribuzione capillare ai bisogni regionali, sono già oggi in grado di fornire diverse centinaia di  $\mu$ A di corrente di fascio di protoni. Tuttavia,

l'adeguato sfruttamento di tali nuove prestazioni richiederebbero, per contro, la risoluzione di problemi tecnologici (non ancora risolti) relativi ai bersagli di produzione, che sono specifici per ogni diverso radionuclide prodotto. Ciò a causa degli elevati livelli di potenza termica che si prevede possano essere depositati all'interno del bersaglio, il quale richiede nuovi e più efficienti metodi tecnologici per garantire un'adeguata refrigerazione.

3. La determinazione sperimentale, con elevato grado di precisione (ripetizione o nuove misure mai prima effettuate) di sezioni d'urto che siano rilevanti per le reazioni nucleari mirate alla produzione di radionuclidi destinati ad uso medico-diagnostico. Tale attività di ricerca della fisica nucleare riveste, infatti, un ruolo fondamentale all'interno del progetto proposto ed ha un impatto diretto e critico su ogni attuale o futura produzione di radionuclidi. Sebbene l'attività di ricerca teorica in fisica nucleare, che sarà eseguita utilizzando conoscenze e strumenti software dedicati, sia utile a fornire delle stime, tuttavia solo un'accurata misurazione sperimentale permette di definire sia il grado di efficienza, sia i parametri operativi dell'irraggiamento mirato alla produzione di un dato radionuclide. Solo attraverso tale iter teorico-sperimentale sarà, infatti, possibile definire con precisione i parametri di progetto per la realizzazione dei bersagli di produzione. Inoltre, definire meglio i parametri operativi ottimali del fascio (intervallo di energia e tempo di irradiazione, caratteristiche isotopiche del materiale bersaglio) che dovranno essere impiegati e che, a loro volta, hanno un impatto diretto sulla mappatura dei radionuclidi prodotti nel bersaglio. La misura di parametri afferenti alla fisica nucleare, rilevanti per comprendere le reali possibilità di produzione diretta del tecnezio metastabile (Tc-99m) tramite acceleratori è uno dei temi principali perseguiti al momento da tale progetto. (4)

### 1.1.2. Radioisotopi da ciclotrone per radiofarmaci

I radiofarmaci sono composti chimici contenenti radionuclidi impiegati in medicina nucleare a scopo diagnostico o terapeutico. Alcuni radionuclidi presenti in natura (isotopi di U e Th) non sono utilizzati in medicina a causa della loro emivita molto elevata ( $T_{1/2} \sim 10^8 \div 10^9$  y). Gli altri radioisotopi noti esistenti in natura, prodotti intermedi della catena di decadimenti U-Th (Pa, Ac, Ra, Rn, Po, Fr) hanno emivite variabili da diversi anni a

frazioni di secondo (sostanzialmente tutti emettitori  $\alpha$ ). Tranne alcuni casi particolari come il At-211, questi radionuclidi non sono usati in medicina per via anche della loro pericolosità chimica. Per scopi medici, quindi, devono essere utilizzati radionuclidi prodotti artificialmente mediante reazioni nucleari. A questo scopo sono utilizzati sia reattori nucleari che acceleratori di particelle, tra cui principalmente i ciclotroni.

Il reattore è un sistema in cui si realizza in modo controllato una reazione nucleare definita cattura neutronica, conseguente alla irradiazione di nuclidi con neutroni termici (vale a dire di bassa energia); la cattura neutronica comporta una variazione del numero di massa, ma non del numero atomico dell'elemento bersaglio; attraverso questo processo è quindi possibile ottenere isotopi radioattivi dello stesso nuclide irradiato. La cattura di un neutrone da parte del nucleo di un atomo pesante, come il fissile U-235/Pu-239, determina invece una reazione nucleare di fissione, che consiste nella scissione di un nucleo e nella formazione di due nuovi nuclei, di massa all'incirca intermedia, con liberazione di due o tre neutroni ed energia. Nel caso in cui l'elemento irradiato sia l'U-235, il processo inizia con la trasformazione di U-235 in U-236; l'U-236 tende a dividersi in due o più nuclei denominati prodotti di fissione. I neutroni liberatisi nel processo di fissione possono a loro volta dare origine a diversi isotopi attraverso una reazione a catena. I prodotti di fissione più utilizzati per scopo diagnostico e terapeutico sono: I-131 ( $\tau_{1/2} = 8$  giorni), ricavato direttamente come prodotto della fissione nucleare, e il Mo-99 ( $\tau_{1/2} = 67$  ore) dal quale deriva per decadimento il Tecnezio-99 metastabile (Tc-99m;  $\tau_{1/2} = 6$  ore). Il Mo-99 viene estratto radiochimicamente e purificato, viene distribuito negli ospedali attraverso i generatori Mo-99 /Tc-99m, che sono composti da una colonna di  $Al_2O_3$  caricata per adsorbimento con Mo-99 come molibdato di ammonio, in cui l'attività generata viene periodicamente rimossa per eluizione con soluzione fisiologica (dal momento che il  $[Tc-99mO_4]^-$  è meno strettamente legato alla colonna rispetto al  $[Mo-99O_4]^{2-}$ ). Conveniente per l'uso quotidiano, l'attività massima Tc-99m si raggiunge in sistemi di generazione di circa quattro emivite dopo l'eluizione precedente, vale a dire ogni 24 ore. In questo modo il rapido decadimento di Tc-99m (emivita  $\tau_{1/2} = 6,0067$  h) non è un problema durante la produzione e per i tempi di consegna, dal momento che è prodotta dal decadimento del capostipite più longevo, il Mo-99 (emivita  $\tau_{1/2} = 65,976$  h).

Il ciclotrone è un acceleratore circolare, in cui particelle cariche (protoni, deutoni, alfa) sono accelerate ad alta velocità nel passaggio attraverso orbite successive fino ad arrivare al bersaglio costituito da un elemento inerte che si vuole colpire con la massima energia cinetica. Alla particella carica viene impressa per accelerazione un'energia cinetica tale da farle penetrare il target fino al nucleo degli atomi che lo costituiscono, causando una reazione nucleare con formazione di radionuclidi che hanno:

- Un numero atomico diverso da quello del target iniziale;
- Un numero di massa e numero atomico dipendente dal tipo di particella incidente e dal bersaglio;
- Caratteristiche chimiche diverse da quelle dell'elemento iniziale.

Gli isotopi radioattivi comunemente producibili con un ciclotrone e di interesse per uso diagnostico possono successivamente decadere attraverso il decadimento positronico o attraverso il processo di cattura elettronica, vale a dire con l'emissione di fotoni singoli.

Per la produzione dei radionuclidi emittenti positroni sono sufficienti ciclotroni a bassa energia che permettono di accelerare particelle a 11-17 MeV. Questi radionuclidi, a causa della loro breve emivita, devono essere prodotti nell'ambito della stessa sede d'uso o nelle sue vicinanze, con una parziale eccezione per il F-18 che con circa due ore di emivita può essere trasportato ed usato anche ad una certa distanza dalla sede di produzione.

Per la produzione con ciclotrone di radionuclidi che decadono con l'emissione di singoli fotoni sono necessarie macchine a media energia, che permettono di accelerare particelle fino a 35-40 MeV. Data la loro emivita di alcune ore tali radionuclidi possono essere trasportati in una sede d'uso distante dal luogo di produzione.

La produzione di radionuclidi da acceleratori necessita che i fasci abbiano due caratteristiche particolari: devono avere energia sufficiente per portare alla reazione nucleare richiesta e devono avere sufficiente corrente per raggiungere rendimenti adeguati allo scopo. (5)

### 1.1.2. Principali caratteristiche del ciclotrone B70 del LNL

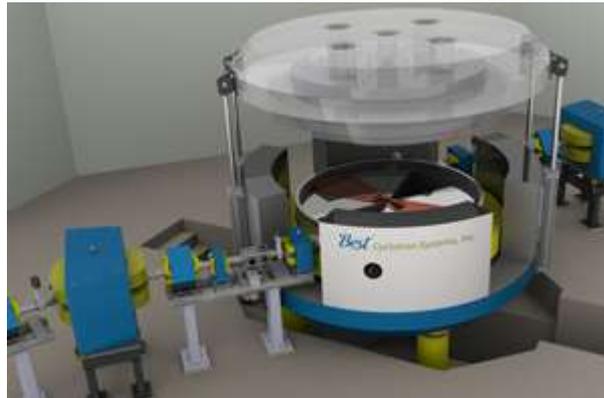


Figura 1.1 - Ciclotrone Best B70

Il ciclotrone della BEST installato presso i LNL è una macchina compatta a quattro settori, alimentata da due bobine conduttrici a temperatura ambiente. Il ciclotrone è in grado di accelerare un fascio di ioni  $H^-$ , generato da una sorgente di ioni esterna, che può arrivare fino all'energia di 70 MeV. Due canali di estrazione indipendenti, posti a  $180^\circ$  l'uno rispetto all'altro, generano l'estrazione simultanea di due fasci. Si stima che il massimo fascio di corrente sia di circa  $800 \mu A$ .

Main Magnet	Bmax field: 1.6 T Coil current: 127 kAT 4 sectors, deep valley Hill sector angle: $50^\circ$ Varying hill gap: 6-4.69 cm
RF cavity	Frequency: 58 MHz Harmonic: 4 th Dissipated power: 28 kW Dee voltage: 60-81 kV Dee angle: $36^\circ$
External ion source and injection line	Multi-cusp $H^-$ , 15-20 mA DC Beam current: $800 \mu A$ Injection energy: 40 keV Spiral inflector
Vacuum	Ion source: $< 1 \times 10^{-5}$ torr Main tank: $< 1 \times 10^{-7}$ torr
Extraction	Simultaneous dual beam 2 stripping multi-foil carousels Variable energy 35-70 MeV

Tabella 1.1 - Caratteristiche tecniche del ciclotrone B70

Il sistema sorgente è costituito da una cavità di plasma con 10 colonne di magneti permanenti che garantiscono un campo più forte che faccia anche da filtro virtuale, è

costituito anche da un sistema di estrazione a tre elettrodi e una copertura con all'interno un magnete di confinamento. Nel sistema di estrazione ci sono due paia di piccoli magneti permanenti incorporati nell'estrattore per la filtrazione degli elettroni e un magnete elettrico compatto ad anello chiuso sull'elettrodo di terra per lo steering assiale del fascio.

L'iniezione del fascio nel ciclotrone avviene per mezzo di una linea di trasporto assiale verso il deflettore che piega il fascio di  $90^\circ$ . La linea di iniezione del fascio a 40 keV di energia che parte dalla sorgente di ioni al ciclotrone utilizza due solenoidi e tre quadrupoli magnetici per la messa a fuoco trasversale.

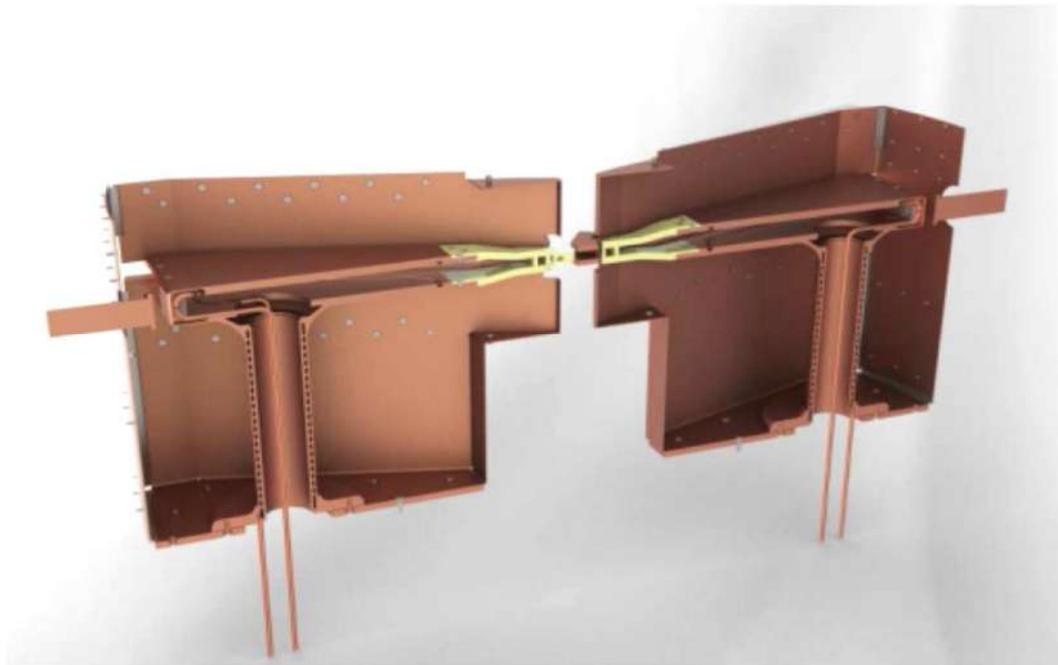


Figura 1.2 - Vista interna del sistema a radiofrequenza

Il sistema a radiofrequenza a 70 MeV consiste in due cavità indipendenti separate e protette al centro, che formano un sistema simmetrico di D per il fascio centrale.

Il ciclotrone è progettato per portare protoni con un'energia tra i 35 e i 70 MeV. Le linee di estrazione partono dal punto di separazione dei due fasci ionizzanti. La corrente totale di fascio misurata fuori dai due magneti che separano i fasci dovrà essere non inferiore al 99% della corrente del fascio pieno. (6)

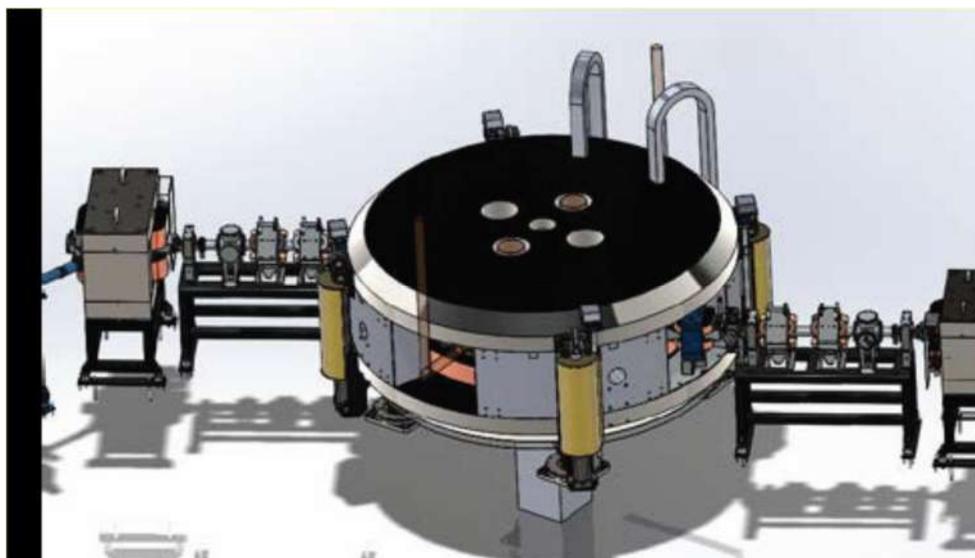


Figura 1.3 - Layout del ciclotrone e dei 2 fasci uscenti

## 1.2. La radioattività prodotta dai target SPES/LARAMED

Le proprietà della materia sono strettamente connesse ai suoi costituenti: gli atomi. In particolare, le proprietà chimiche sono determinate principalmente dalla nube elettronica esterna (struttura di riempimento degli orbitali e degli stati di valenza), mentre quelle fisiche dipendono dallo stato di aggregazione degli atomi, secondo strutture che possono essere ordinate (reticoli cristallini) o amorfe (ad es. stato vetroso). La maggior parte della massa dell'atomo (più del 99,9%) si concentra nel nucleo; i nuclei sono aggregati di particelle, dette nucleoni, che si possono distinguere in protoni (con carica positiva) e neutroni (elettricamente neutri), aventi massa circa 1800 volte più grande degli elettroni.

La stabilità del nucleo è garantita dalla presenza di una forza di attrazione molto intensa tra i nucleoni, definita interazione forte; tale forza si manifesta con efficacia a distanze inferiori alle dimensioni nucleari (dell'ordine dei Fermi, ovvero  $10^{-15}$  m) 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 richiede molta energia.

I nuclei stabili (non radioattivi) possiedono approssimativamente un ugual numero di neutroni e di protoni, e costituiscono la cosiddetta "valle di stabilità" nella carta dei nuclidi

(vedi Figura 1.4). La ragione della maggior stabilità dei nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni è da attribuirsi al fatto che l'interazione neutrone-protone è leggermente più intensa rispetto alle interazioni protone-protone e neutrone-neutrone. Per atomi con numero di massa  $A \geq 40$  (con  $A = Z + N$ , con  $Z =$  numero di protoni ed  $N =$  numero di neutroni), i fenomeni elettrostatici determinano uno spostamento della 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; ciò trova giustificazione nel fatto che i neutroni sono privi di carica, quindi non alimentano la forza repulsiva elettrostatica. Quest'ultima limita inoltre l'esistenza di elementi super pesanti: il corto raggio di azione della forza nucleare forte non permette un'efficace opposizione alla forza elettrostatica, agente invece a più lungo raggio.

I nuclei con eccesso o difetto di neutroni, e quindi lontani dalla stabilità, sono radioattivi e decadono con emissione di particelle ( $\alpha$  e  $\beta$ ) e raggi  $\gamma$ . Tra questi, quelli in cui il bilanciamento tra protoni e neutroni è in notevole eccesso (o difetto) rispetto ai nuclei stabili vengono comunemente chiamati "esotici". Al momento ne sono state prodotte e caratterizzate in laboratori di ricerca di tutto il mondo circa 3600 specie, tuttavia calcoli teorici prevedono l'esistenza di oltre 6000 diversi nuclei.

La carta dei nuclidi individua e classifica i nuclei in base al numero di protoni ( $Z$ ) e al numero di neutroni ( $N$ ). I nuclei definiti stabili (quadrati neri) sono quelli non radioattivi oppure aventi tempo di decadimento comparabile con l'età della terra (o addirittura superiore). Aggiungendo neutroni o protoni ad un nucleo ci si allontana dalla condizione di stabilità, entrando rispettivamente nella zona *neutron-rich* e *proton-rich*, fino a raggiungerne i limiti rappresentati dalle due *dripline*. I nuclei già studiati sono rappresentati in diversi colori a seconda delle modalità del loro decadimento, mentre nella zona bianca, detta terra incognita, si ritiene si trovino quelli non ancora studiati. Calcoli teorici hanno dimostrato che al di fuori dei campi delimitati dalle *dripline* i nuclei emettono nucleoni per formare nuovi nuclei, con combinazioni di protoni e neutroni tali da poter rientrare nell'area di potenziale stabilità.

Lo studio dei nuclei instabili, ed in particolare dei nuclei esotici, ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare, ha permesso di confermare precedenti ipotesi di fondamentale importanza ed ha infine suggerito promettenti applicazioni in fisica dello stato solido, nell'astrofisica, ed in medicina.

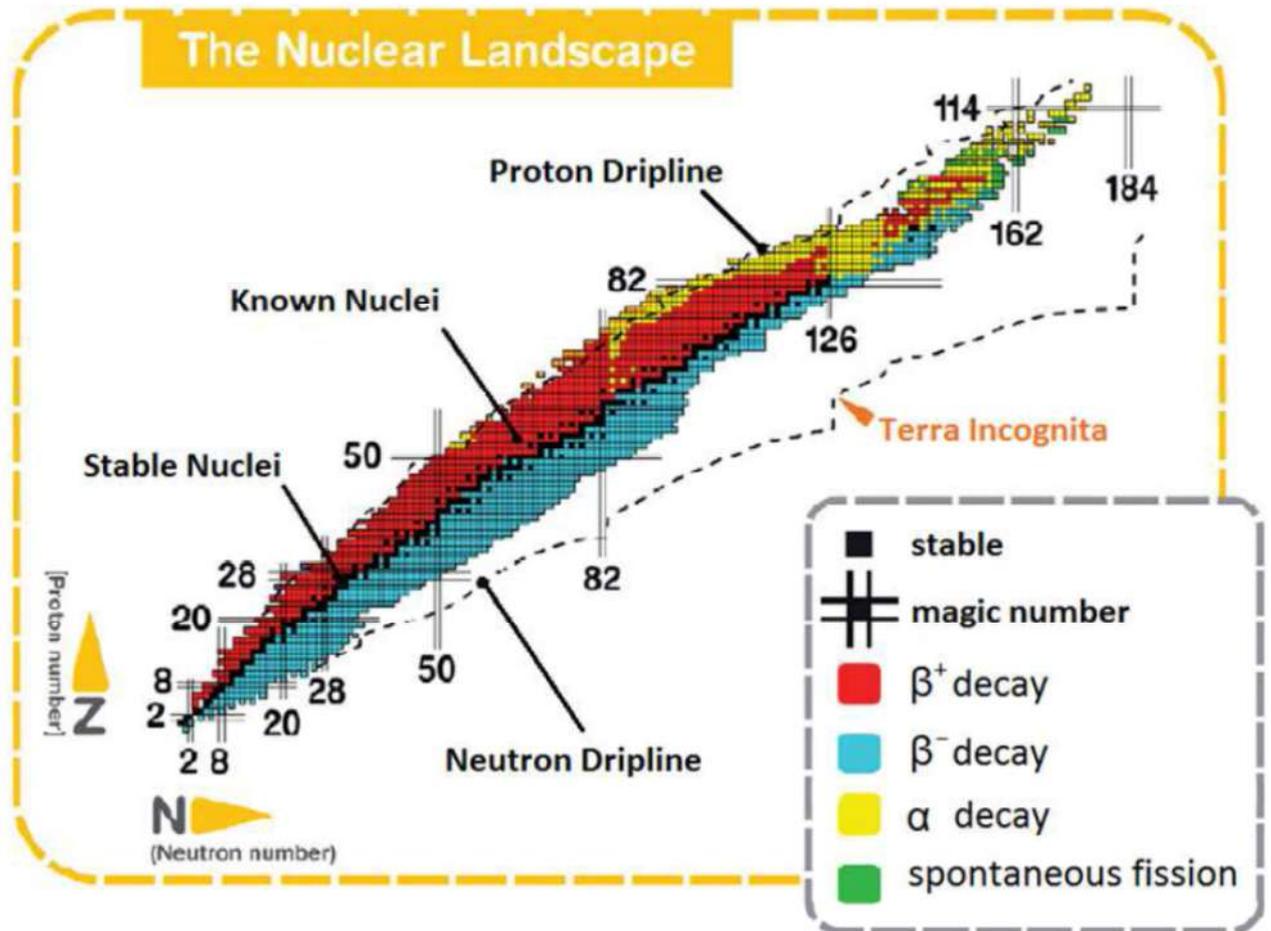


Figura 1.4 - Carta dei nuclidi

### 1.2.1. Il target in UCx della facility SPES

Il *target* di produzione dei radioisotopi, e il loro sistema di estrazione e ionizzazione sono contenuti all'interno di una camera di forma cilindrica (camera *target*), la quale viene raffreddata mediante un opportuno circuito, viste le elevate temperature in gioco (vedi Figura 1.5). Sempre a causa delle alte temperature, per evitare l'ossidazione dei componenti presenti, l'interno della camera viene mantenuto in condizioni di alto vuoto (con pressione dell'ordine dei  $10^{-7}$  mbar; la mancanza di atmosfera è necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte. Il volume della camera, di forma cilindrica, è delimitato dallo spallamento di una flangia (*plate*) e da un coperchio (*cover*), entrambi realizzati in lega di alluminio, mentre la tenuta a vuoto è garantita da un O-Ring (vedi Figura 1.6).

Il *target* è composto da sette dischi coassiali in carburo di uranio (UCx), aventi diametro di 40 mm e spessore di circa 1 mm ed opportunamente distanziati in direzione assiale al fine di dissipare attraverso radiazione termica la potenza sviluppata dal fascio di protoni. Essi sono contenuti in una scatola (*box*), un tubo cavo di grafite, avente un diametro esterno e una lunghezza rispettivamente di 49 mm e 215.5 mm. Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa due finestre in grafite (*window*), molto sottili per non attenuare l'intensità del fascio, ma sufficienti da schermare la zona attiva e da evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio.

Dopo aver investito le due finestre di grafite e i dischi di UCx, il fascio primario va ad impattare su tre *dumper* e sul fondo scatola (*box base*); questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio, sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del *target*.

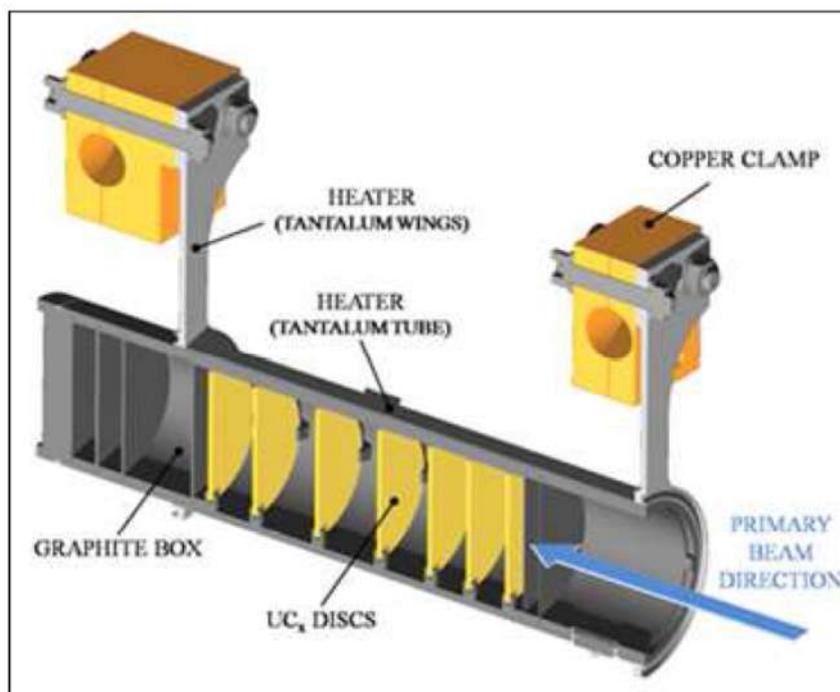


Figura 1.5 - Camera target

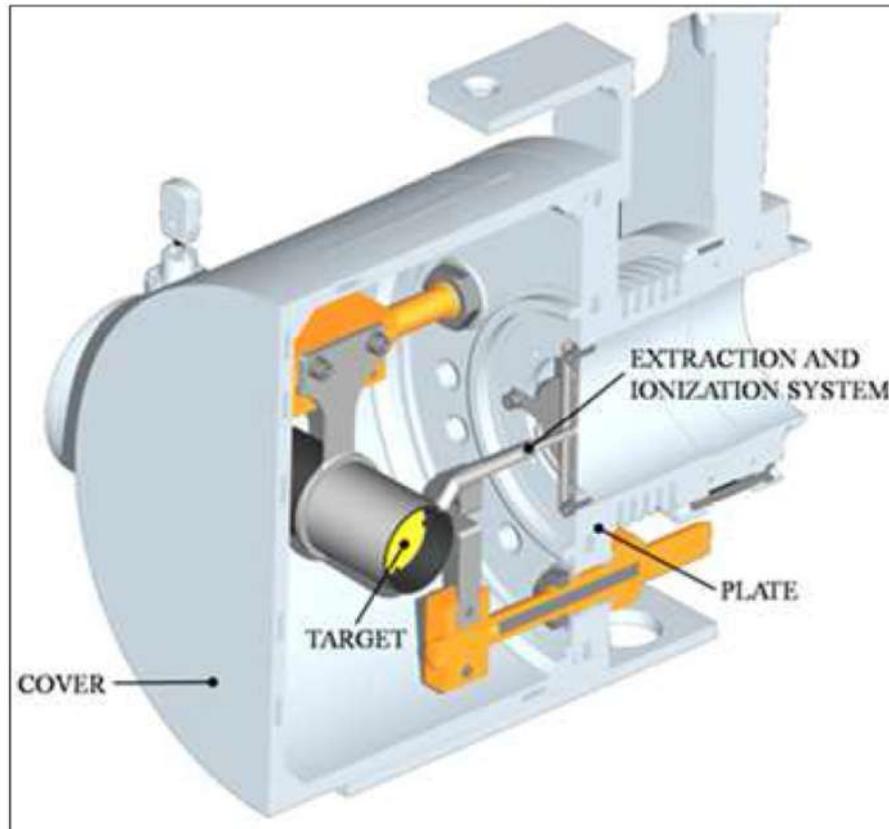


Figura 1.6 - Volume della camera target

La *box* deve mantenere la temperatura media di 2000°C, in modo da migliorare, per effetto di agitazione termica, l'estrazione dei prodotti di fissione. Essendo la potenza del fascio di protoni non sufficiente a portare il target al livello di temperatura richiesto, è necessario introdurre un dispositivo indipendente avente la funzione di riscaldare il target. Inoltre, il sistema di riscaldamento supplementare deve essere in grado di sostenere il target durante i transitori, evitando improvvisi sbalzi di temperatura molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi.

Il riscaldatore (*heater*) è composto da un tubo molto sottile (*tube*) saldato ai bordi a due ali (*wing*) direttamente collegate ai morsetti in rame (*clamp*); attraverso i morsetti è possibile far dissipare per effetto Joule il desiderato quantitativo di potenza al riscaldatore. La dissipazione di potenza in aggiunta al minimo (~350 W) di calore sviluppato dalla fissione nucleare, fa in modo che la temperatura del sistema scatola-dischi sia mantenuta al valore di utilizzo. Il materiale scelto per il riscaldatore è il tantalio: si tratta di un metallo altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre energia elettrica e termica e di raggiungere temperature molto elevate.

Il processo di fissione nucleare, che si manifesta quando il fascio di protoni investe i sette dischi in carburo di uranio, produce nuclei radioattivi aventi massa compresa tra gli 80 ed i 160 uma; per la produzione di un RIB (*Radioactive Ion Beams*), la specie esotica desiderata deve essere estratta dal *target* e ionizzata. Tale processo richiede del 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, attraverso la quale gli isotopi in uscita dal *target* vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove sono ionizzati positivamente (ioni +1). Nell'attuale configurazione la linea di trasferimento (*transfer line*) è un tubo sottile di tantalio saldato al riscaldatore ad un'estremità e connesso meccanicamente alla sorgente di ionizzazione all'estremità opposta. Come accade per il riscaldatore, anche il sistema linea di trasferimento - sorgente di ionizzazione viene riscaldato mediante dissipazione di potenza per effetto Joule; in questo modo la temperatura della sorgente può arrivare a sfiorare i 2400°C.

Per l'utilizzo pratico e la produzione di ioni radioattivi è necessaria la costruzione di sistemi, detti *facility* capaci di garantire fasci ionici (RIB, *Radioactive Ion Beams*) di elevata purezza, intensità ed energia; sono numerose le *facility* per la produzione di fasci radioattivi operanti sia in Europa che in altre parti del mondo; la maggior parte di queste sono basate sul metodo ISOL. La tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*) utilizza la separazione degli isotopi in linea; i principali costituenti di tale tipologia di *facility* sono:

- l'acceleratore primario;
- il complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione;
- i separatori di massa ed isobari;
- il post acceleratore;

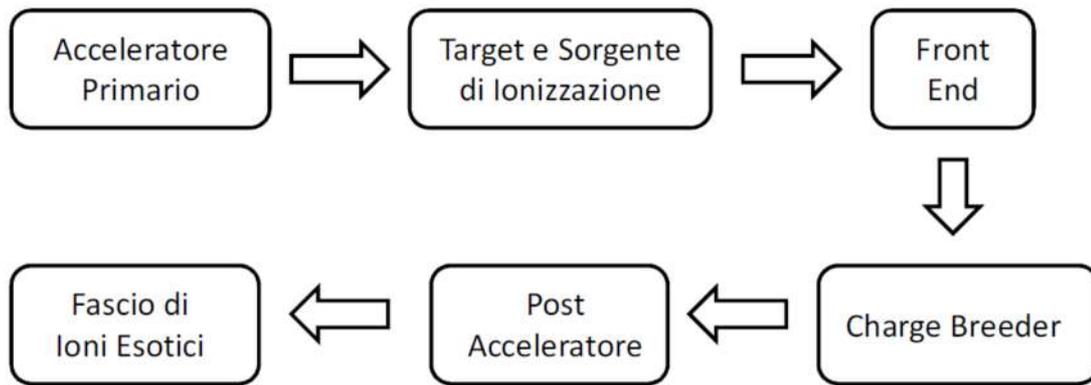


Figura 1.7 - Schema di una facility di tipo ISOL

Un fascio di particelle della voluta energia, proveniente dall'acceleratore primario, viene fatto collidere con un bersaglio (*target*) di materiale fissile; in questo modo si ottiene la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari (fissione, spallazione, frammentazione, etc.). Attraverso un opportuno sistema i radioisotopi prodotti vengono estratti e ionizzati; in questo modo potranno essere accelerati per differenza di potenziale. Il primo stadio di accelerazione avviene nel *front end* che attira gli ioni e li invia verso dei separatori elettromagnetici all'interno dei quali il fascio viene opportunamente selezionato e purificato; i separatori sono quindi necessari se si vuole ottenere un fascio chimicamente ed isobaricamente puro. Successivamente, gli ioni vengono post accelerati dal *charge breeder* al livello di energia richiesto dal particolare esperimento.

L'intensità del fascio radioattivo prodotto è usualmente descritta dall'equazione:

$$I = \sigma \cdot \Phi \cdot N \cdot \varepsilon$$

Dove  $\sigma$  è la sezione d'urto per le reazioni nucleari [ $\text{cm}^2$ ],  $\Phi$  è l'intensità del fascio primario,  $N$  è il numero di atomi bersaglio per unità di superficie [ $\text{cm}^{-2}$ ],  $\varepsilon$  è l'efficienza dell'intero processo. Una corretta configurazione del complesso target - sistema di estrazione e ionizzazione è cruciale per un efficiente funzionamento di una *facility* di tipo ISOL. Gli obiettivi che stanno alla base del dimensionamento sono:

- la riduzione del tempo di ritardo, ovvero del tempo che intercorre tra la generazione della particella radioattiva e il suo decadimento;
- la massimizzazione della produzione senza deterioramento della purezza del fascio.

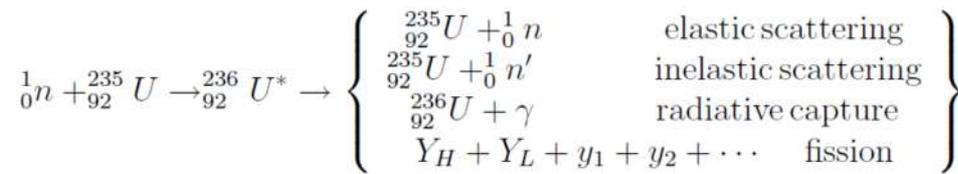
La separazione dei prodotti radioattivi dal substrato del *target* e l'estrazione dei nuclei esotici, sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura; in particolare, all'aumentare del livello termico, la diffusione delle particelle risulta accelerata. Chiaramente, più breve

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.

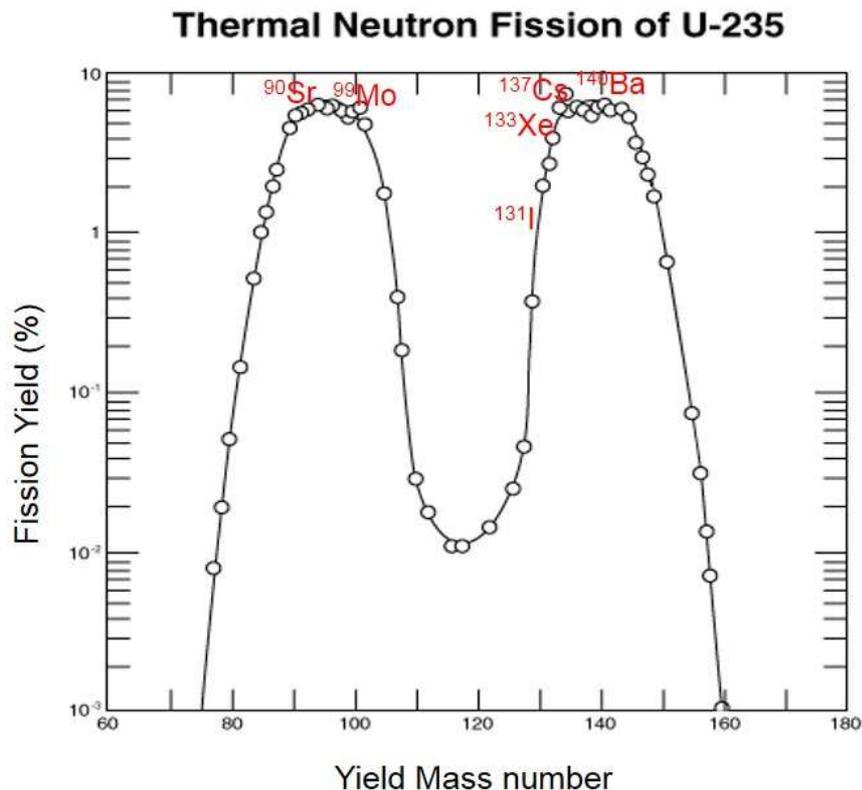
In ambito europeo, le opportunità scientifiche offerte dai RIB ed i notevoli problemi tecnologici ad essi associati, hanno portato la comunità scientifica a proporre la costruzione di una rete di *facility* complementari, definite “di intermedia generazione”, fondamentali per arrivare alla costruzione di un’unica grande *facility* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL tale 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 (*Selective Production of Exotic Species*). Tale programma è coordinato a livello nazionale e prevede la collaborazione tra sei sezioni INFN, l’ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell’Università degli Studi di Padova e, a livello internazionale, strette collaborazioni con il CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

#### Produzione di specie radioattive nel target lamellare SPES mediante fissioni dirette da protoni

La fissione dell’U-235 o del Pu-239 indotta da neutroni termici ( $\bar{E}_n \sim 25 \text{ meV}$ ) è la modalità usata nei reattori nucleari per produrre energia termica. Tale energia viene emessa quando il nucleo si scinde per effetto della repulsione elettrostatica per distanze di separazione dei due lobi del nucleo eccitato deformato tale da annullare l’effetto della forza nucleare forte. Affinché i nuclei si trovino in uno stato eccitato, è necessario irraggiare il materiale creando le condizioni fisiche affinché una particella subatomica, come il neutrone, possa essere catturata dal nucleo e si possa produrre un nucleo composto in uno stato eccitato. Questo nucleo composto può decadere in diversi modi incluso il processo di fissione. Ad esempio se il U-235 è bombardato con neutroni, le possibili reazioni sono:



I prodotti della fissione non sono determinati univocamente e sono possibili diversi modi di ripartire le masse dei frammenti, la probabilità che un prodotto di fissione sia un nuclide di massa A si chiama *fission chain yield*. La distribuzione deve essere simmetrica rispetto al centro, nel senso che per ogni frammento pesante ci deve essere un corrispondente frammento leggero. La fissione in due frammenti di massa simile o quasi ( $A_1 \approx A_2$ ) è circa 600 volte meno probabile della fissione in frammenti con  $A_1=95$  e  $A_2=140$ . La fissione indotta da particelle veloci mostra una distribuzione di massa dei frammenti che favorisce frammenti di ugual massa. Il plot di Figura 1.8 rappresenta i prodotti di fissioni al variare dell'unità di massa atomica, si osserva come siano più probabili le fissioni asimmetriche (le 2 “campane” della curva) rispetto alle fissioni simmetriche (parte centrale del plot).



**Fission Yield as percent of total fission products from  ${}^{235}\text{U}$**

Figura 1.8 - Prodotti di fissione da reattore nucleare dell'U-235

In Figura 1.9 è rappresentato lo spettro atteso della fissione da un fascio di protoni da ciclotrone su un target di  $UC_x$ . Tale spettro è stato ottenuto da simulazioni con il codice di calcolo di tipo Monte Carlo MCNPX 2.7e, che simula il trasporto e l'interazione tra le particelle e i nuclei con la materia. Le interazioni nucleari e le relative funzioni di distribuzione della produzione di isotopi generate da ioni vengono trattate considerando sia funzioni di probabilità delle "sezioni d'urto nucleari" prodotte da modelli di interazione teorici, sia mediante sezioni d'urto sperimentali disponibili nelle librerie di dati. Queste informazioni non sono disponibili per tutti i materiali, energie e reazioni.

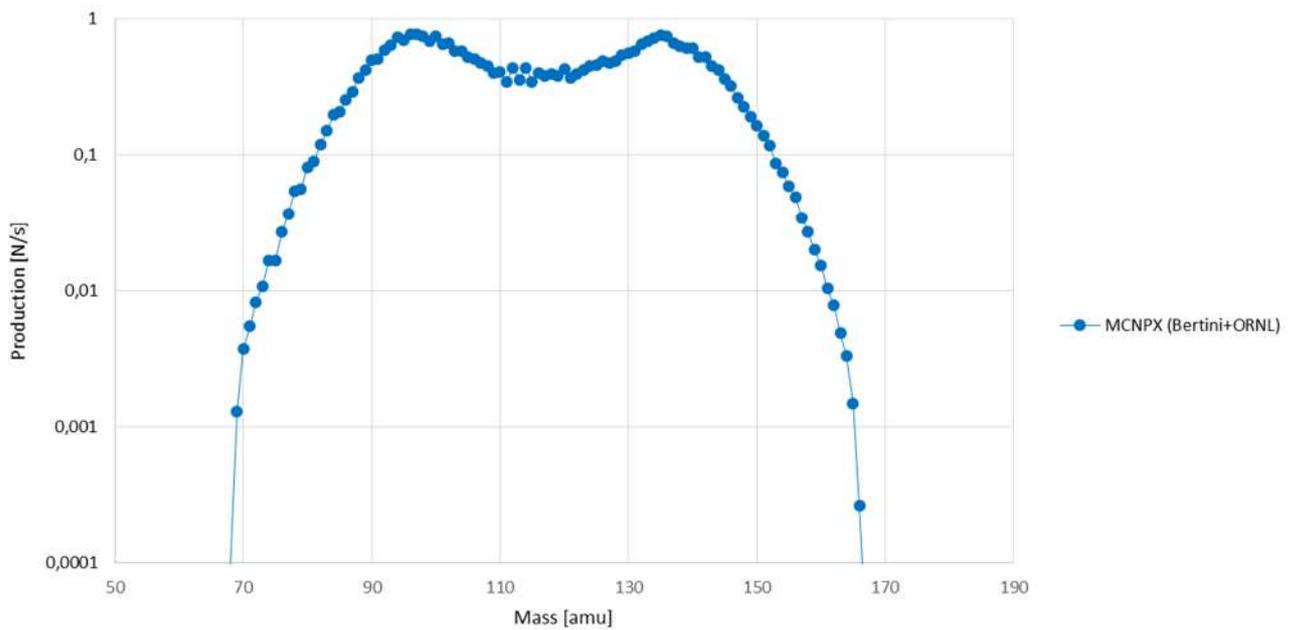


Figura 1.9 - Spettro atteso della fissione di un fascio di protoni da ciclotrone su un target  $UC_x$

Dai risultati attesi della fissione da protoni su un target di  $UC_x$ , risulta come la probabilità di fissioni simmetriche sia più alta rispetto alla fissione dell'U-235 da reattore. Ci si aspetta quindi, che, nella fissione da protoni su target di  $UC_x$  sia più alta la produzione di isotopi con unità di massa atomica tra i 100 e i 135 *amu*. (7)

## 1.2.2. Caratteristiche fisico-ingegneristiche dei target per la produzione di radioisotopi con la facility LARAMED

Come anticipato nel paragrafo 1.1.1, il progetto LARAMED punta a studiare nuovi radioisotopi di interesse per la medicina oltre a produrre in modo innovativo, mediante il ciclotrone installato ai LNL, alcuni già usati attualmente per indagini diagnostiche: Tc-99m, Cu-67, I-124, Sr-82, Ge-68 e Zr-89.

Sono attualmente in fase di studio i target per la produzione di Tc-99m e Cu-67.

Il radiofarmaco marcato Cu-67 e Cu-64 si concentra selettivamente nelle cellule ipossiche di tessuti interessati da vari processi patologici (cellule nelle quali la pressione di O<sub>2</sub> è inferiore alla normalità). In particolare il nuovo radiocomposto si è rivelato particolarmente utile nella diagnosi e nella terapia delle neoplasie prostatiche. Il radionuclide Cu-64 viene attualmente prodotto con un ciclotrone a bassa energia utilizzando complessi moduli di sintesi automatici che consentono di estrarre l'attività dal bersaglio e di trasferirla in una fiala sterile da cui viene prodotto il radiofarmaco. A causa della bassa intensità di corrente, la produzione di Cu-64 con ciclotroni a bassa energia risulta molto limitata; un ciclotrone a energia medio-alta costituisce uno strumento molto più efficace per aumentare le rese di produzione e assicurare una maggiore disponibilità. Uno dei metodi investigati per la produzione del Cu-64 è quello che utilizza ciclotroni a bassa energia su target di Ni elettrodepositato su substrati di oro. (8)

Il radionuclide su cui si stanno svolgendo studi ed esperimenti riguardo al target di riferimento presso i LNL è il Tc-99m. Il bersaglio, sul quale è depositato uno strato sottile del materiale attivo (molibdeno metallico) arricchito isotopicamente in Mo-100, deve essere chimicamente inerte per le condizioni di dissoluzione del target. Inoltre dovrebbe anche essere in grado di dissipare carichi termici elevati di irradiazione e non contaminare il materiale attivo bersaglio con sottoprodotti radionuclidici, infine essere adeguatamente economico. La proposta dei LNL è di utilizzare uno strato sottile di materiale non metallico, inerte chimicamente sia sotto l'azione del fascio, che durante il processo di dissoluzione/separazione/purificazione chimica in modo da evitare impurità di radioisotopi. Inoltre, sia il bersaglio stesso che il supporto di destinazione devono avere la capacità di essere irradiati con un fascio ad alta corrente, e quindi, la peculiarità di dissipare il più possibile il livello di calore di potenza. La soluzione potrebbe essere quella di

utilizzare substrati di Zaffiro e diamante CVD metallizzati e brasati al supporto del target (Diamond Like Carbon, DLC). Il DLC è una classe di materiale carbonio amorfo che mostra alcune delle proprietà tipiche del diamante; una delle molte proprietà notevoli del diamante è la sua insuperabile conducibilità termica: con un valore di 2000 W/(mK) supera quella del rame di un fattore di cinque. (9)

### Modalità di deposizione su substrati per produzione di target

Una delle tecniche maggiormente utilizzate per la deposizione su substrati è lo sputtering: processo in cui atomi di un materiale sono emessi dalla superficie di un solido per effetto del bombardamento di particelle energetiche, tipicamente ioni positivi di un gas inerte.

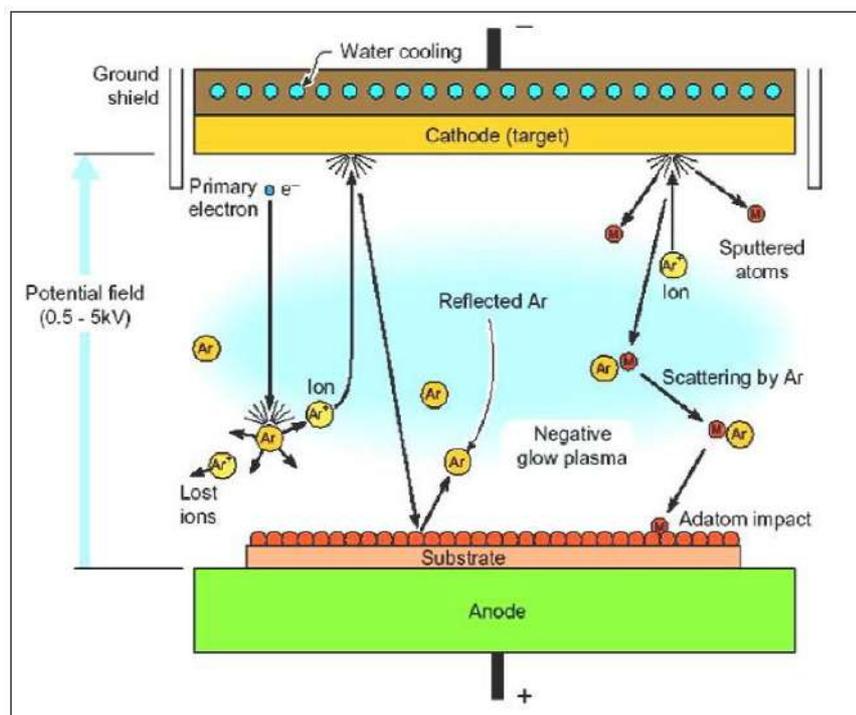


Figura 1.10 - Schematizzazione dello Sputtering catodico

Ci sono diverse tecniche di sputtering, in cui varia la configurazione del campo magnetico. Una tecnica è quella detta sputtering catodico o sputtering DC; è costituita da una coppia di elettrodi metallici paralleli. Il target metallico è ubicato sulla sommità del catodo, il quale è connesso al terminale negativo dell'alimentatore, mentre il substrato è ad esso affacciato per favorire la deposizione del film sottile. L'anodo è collegato elettricamente a terra, unitamente alle pareti della camera di sputtering.

Una volta raggiunti i livelli di vuoto desiderati, viene introdotto il gas di processo (ad esempio Argon) nella camera di sputtering; tale gas costituisce il mezzo attraverso il quale la scarica viene innescata e sostenuta. Gli ioni positivi di Argon, ottenuti per ionizzazione, bombardano il catodo e rilasceranno atomi neutri del target, i quali attraverseranno la regione di scarica e si depositeranno sulla superficie del substrato. Dal target saranno anche rilasciati elettroni secondari, ioni negativi, raggi X e fotoni.

Di fondamentale importanza è saper individuare un range di pressioni nel quale poter lavorare efficacemente in termini di deposizione del particolato sul substrato: per pressioni troppo basse infatti non si ha un sufficiente tasso di ionizzazione che permetta l'autosostentamento della scarica mentre per pressioni relativamente elevate l'eccessiva presenza delle particelle presenti nella camera produce l'effetto contrario ostacolando la deposizione degli atomi a causa dell'eccessivo numero di collisioni.

Lo Sputtering a diodo non è molto efficiente, poiché gli elettroni effettuano un numero limitato di fenomeni di ionizzazione per urto prima di essere assorbiti dall'anodo.

La tecnica del Magnetron Sputtering costituisce la variante al processo di Sputtering DC più largamente utilizzata e prevede la possibilità di allungare, per mezzo di un campo magnetico, il tempo e il tragitto percorso dall'elettrone prima che esso collida con l'anodo o con le pareti della camera. Si tratterà pertanto di creare un'opportuna configurazione di campo magnetico che agisca in prossimità del catodo, in modo tale da aumentare l'efficienza di ionizzazione degli elettroni.

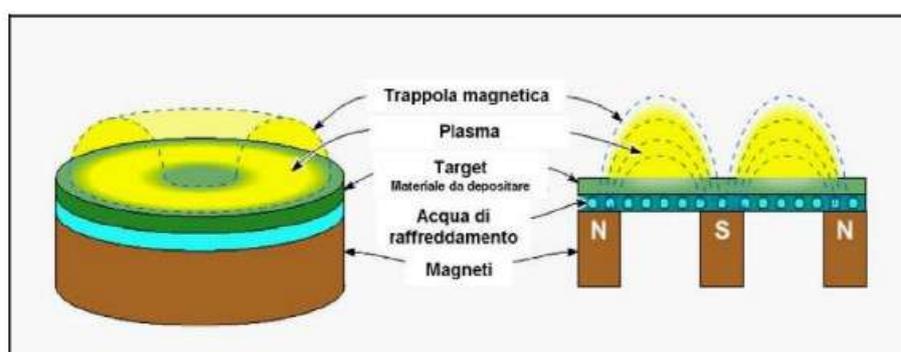


Figura 1.11 - Configurazione del campo magnetico di un Magnetron

La maggiore attività energetica a livello atomico determina un inevitabile innalzamento della temperatura del catodo richiedendo dunque un apposito sistema di raffreddamento dei magneti disposti sotto il catodo, anche nell'ottica di un possibile superamento della temperatura di Curie che renderebbe inefficace i magneti.

L'effetto netto dell'applicazione di un campo magnetico è quello di effettuare lo sputtering a pressioni più basse o, analogamente, di ottenere correnti più elevate (e quindi *deposition rate* maggiori) a parità di pressione rispetto ad un sistema a diodo. (10)

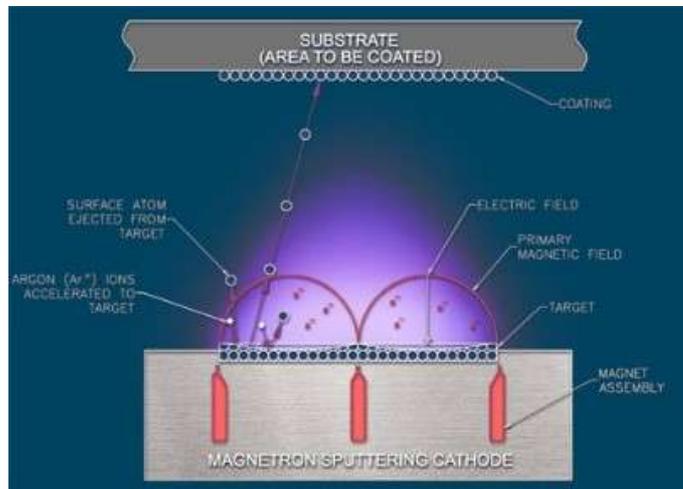


Figura 1.12 - Schematizzazione del Magnetron Sputtering

### Produzione dei target con tecniche Sputtering

Le caratteristiche principali del target per la produzione di Tc-99m sono: alta dissipazione del calore, uniformità di spessore, densità e basso livello di ossidazione. Sono stati testati vari metodi di deposizione del Mo-100, la tecnica proposta dai LNL è quella di deposizione di film sottili di Mo-100 con il magnetron sputtering. Altre tecniche come l'evaporazione termica o a fascio elettronico hanno alcuni svantaggi legati alle differenze della pressione di vapore dei componenti della lega metallica e dei loro punti di fusione. Il magnetron sputtering non presenta queste problematiche e ha altri vantaggi: alto tasso di deposizione, facilità di deposizione per qualunque metallo, lega o composto, film ad alta purezza, adesione alta dei film, eccellente copertura anche in piccoli tratti, possibilità di depositare su substrati altamente termosensibili, uniformità sui substrati di grande area. In ogni caso lo spessore massimo dei film sputterati non deve superare lo spessore di qualche micron. La proposta dei LNL per la preparazione del target consiste in circa 100  $\mu\text{m}$  di spessore di Mo-100 depositato con il magnetron sputtering su un substrato di zaffiro o DLC. La scelta del magnetron sputtering come tecnica di deposizione è giustificata dal fatto che è il metodo che permette di depositare su substrati ceramici film sottili che risultino uniformi, densi e aderenti. L'unico svantaggio da risolvere è l'eliminazione delle tensioni residue sui film sputterati, in quanto queste tensioni residue possono causare deformazioni plastiche e piccole crepe nell'interfaccia tra il substrato e il film depositato. Perciò, queste tensioni

devono essere evitate per garantire determinati standard di sicurezza nella produzione di Tc-99m da ciclotrone.

### **1.3. Analisi della radioattività indotta dall'uso di un fascio di protoni**

Sono stati eseguiti studi e simulazioni inseriti in una “relazione tecnica in materia di radioprotezione” al fine di ottenere le autorizzazioni necessarie da parte dell'ISPRA e degli enti preposti.

In particolare sono di interesse gli aspetti di radioprotezione che riguardano:

- Produzione diretta di neutroni e gamma a seguito dell'interazione del fascio dei protoni con i bersagli e inventario dei radionuclidi prodotti
- Calcolo delle schermature
- Produzione di radionuclidi in aria
- Produzione di radionuclidi nei sistemi di raffreddamento
- Valutazione della radioattività residua nelle strutture schermanti

I principali obiettivi di radioprotezione assunti nel calcolo delle schermature sono stati il mantenimento della dose alle persone del pubblico ovunque inferiore a 0.5 mSv/anno e la dose ai lavoratori classificati come lavoratori esposti non superiore a 5 mSv/anno.

#### **1.3.1 Attivazione delle pareti delle sale di irraggiamento: problematiche radioprotezionistiche**

L'interazione del fascio di protoni da 70 MeV con un bersaglio spesso genera un campo di radiazione misto composto principalmente di neutroni e fotoni: la componente neutronica è la radiazione secondaria più importante per la valutazione delle schermature e i calcoli di attivazione. Una schermatura adeguata a schermare i neutroni è, di norma, idonea a schermare anche le altre componenti secondarie prodotte.

Per il calcolo della produzione neutronica e dello spettro neutronico emergente è stata considerata la geometria reale del bersaglio di UC<sub>x</sub> composta da 7 dischi di carburo di uranio di 4 cm di diametro ognuno, di spessore pari a 13 mm e densità 2,5 gr/cm<sup>3</sup>; dopo il settimo disco sono collocati 3 dischi di grafite (con funzione di dump) del diametro di 4 cm, spessore 1 mm e densità 2,5 gr/cm<sup>3</sup>. Il tutto chiuso in un cilindro di grafite dello spessore di 2,5 mm e della stessa densità dei dischi di dump.

Con il bersaglio in carburo di uranio UC<sub>x</sub> irraggiato per 2 settimane con protoni da 70 MeV alla corrente di 200 µA i nuclidi prodotti sono riportati in tabella:

Nuclide	T <sub>1/2</sub>	Abbondanza isotopica	Attività dopo due settimane di irraggiamento		Attività dopo 1 giorno di raffreddamento
		(nuclei prodotti/protone)	(Bq)	(Bq/g)	(Bq/g)
<sup>230</sup> U	20.8 d	3.8 10 <sup>-7</sup>	2.1 10 <sup>8</sup>	7.2 10 <sup>6</sup>	7.0 10 <sup>6</sup>
<sup>231</sup> U	4.2 d	2.9 10 <sup>-6</sup>	3.4 10 <sup>9</sup>	1.2 10 <sup>8</sup>	1.0 10 <sup>8</sup>
<sup>232</sup> U	68.9 y	3.8 10 <sup>-5</sup>	2.3 10 <sup>7</sup>	7.9 10 <sup>5</sup>	7.9 10 <sup>5</sup>
<sup>233</sup> U	1.592 10 <sup>5</sup> y	1.5 10 <sup>-4</sup>	3.7 10 <sup>4</sup>	1.3 10 <sup>3</sup>	1.3 10 <sup>3</sup>
<sup>234</sup> U	2.455 10 <sup>5</sup> y	2.7 10 <sup>-4</sup>	4.7 10 <sup>4</sup>	1.6 10 <sup>3</sup>	1.6 10 <sup>3</sup>
<sup>235</sup> U	7.038 10 <sup>8</sup> y	3.7 10 <sup>-4</sup>	20.6	0.7	0.7
<sup>236</sup> U	2.342 10 <sup>7</sup> y	5.5 10 <sup>-4</sup>	9.3 10 <sup>2</sup>	32.5	32.6
<sup>237</sup> U	6.75 d	4.1 10 <sup>-4</sup>	4.6 10 <sup>11</sup>	1.6 10 <sup>10</sup>	1.4 10 <sup>10</sup>
<sup>238</sup> U	4.468 10 <sup>9</sup> y	4.3 10 <sup>-4</sup>	3.7	0.1	0.1
<sup>239</sup> U	23.45 m	8.1 10 <sup>-6</sup>	1.2 10 <sup>10</sup>	4.3 10 <sup>8</sup>	-
<sup>236</sup> Pu	2.858 y	-	3.4 10 <sup>8</sup>	1.2 10 <sup>7</sup>	1.2 10 <sup>7</sup>
<sup>238</sup> Pu	87.7 y	-	1.3 10 <sup>7</sup>	4.7 10 <sup>5</sup>	5.1 10 <sup>5</sup>
<sup>239</sup> Pu	24110 y	-	1.0 10 <sup>4</sup>	3.6 10 <sup>2</sup>	3.8 10 <sup>2</sup>

Tabella 1.2 - Nuclidi prodotti dal bersaglio di UC<sub>x</sub> irraggiato per 2 settimane

Le strutture edilizie relative all'acceleratore, alle sale bersaglio e alle aree attigue sono collocate a quota -4 m rispetto al livello del terreno, lo spessore delle schermature è stato valutato assumendo come obiettivi:

- Il non superamento, al di fuori degli schermi in calcestruzzo, di un rateo di equivalente di dose ambientale gamma e neutroni pari a 10  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$  quando l'area dietro gli schermi è il terreno;
- Il non superamento di 5  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$  quando si tratta di aree comunque non accessibili, come il tetto delle sale bersaglio e il tetto del ciclotrone;
- Il non superamento di 5  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$ , nelle peggiori condizioni di utilizzo dell'acceleratore, quando si tratta di aree accessibili per motivi lavorativi a personale classificato come lavoratore esposto e per una permanenza totale in tali aree non superiore a 1000 ore/anno.

Il caso più gravoso per il calcolo delle schermature è quello dell'utilizzo di UCx come target. Inizialmente era stato assunto come spessore della parete tra i locali Bunker (A4 e A6) e il locale A13 uno spessore di 360 cm, con questo spessore il rateo di equivalente di dose ambientale per i neutroni all'esterno della suddetta parete all'altezza del target risulta pari a 25  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$  (valore nettamente al di sopra dei 5  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$  considerati come obiettivo di progetto). Aumentando lo spessore a 400 cm il rateo di dose neutronica risulta pari a 4  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$ .

Nelle seguenti figure si può osservare il calcolo del rateo di equivalente di dose ambientale ( $\mu\text{Sv}/\text{ora}$ ) nella sala target e nelle schermature durante l'irraggiamento del target di UCx; si può anche osservare la variazione della dose neutronica lungo una direzione parallela all'asse z passante per il target.

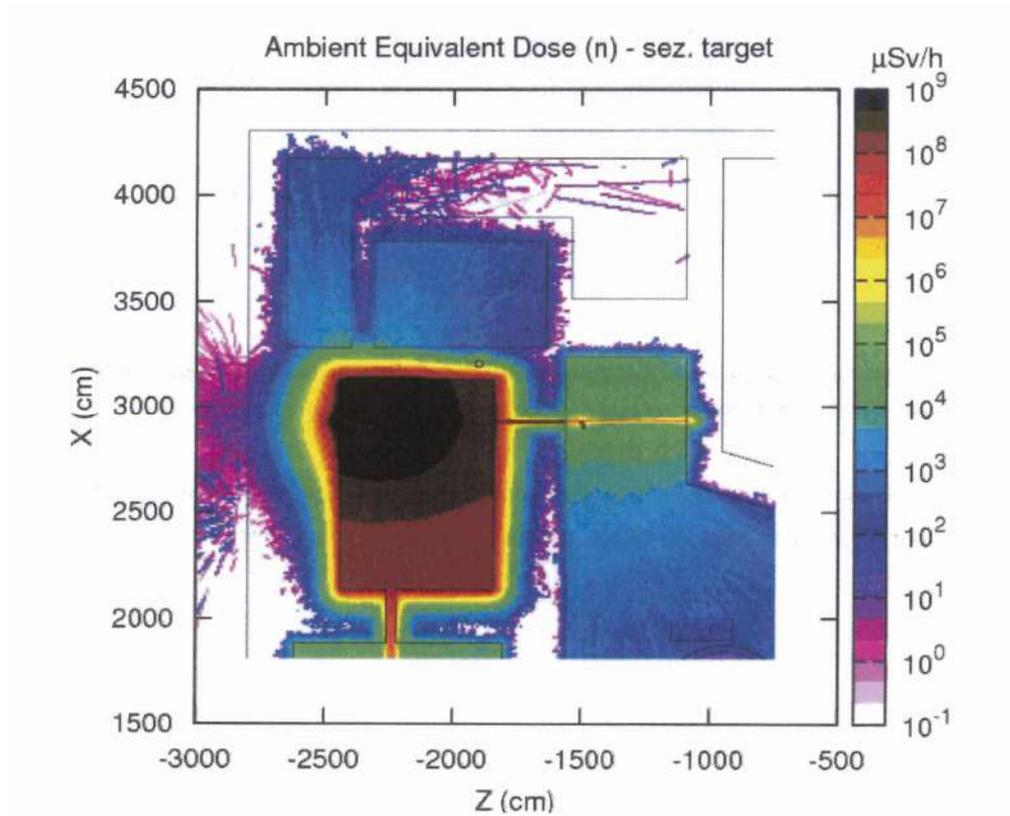


Figura 1.13 - Equivalente di dose ambientale nella sala target e nelle schermature

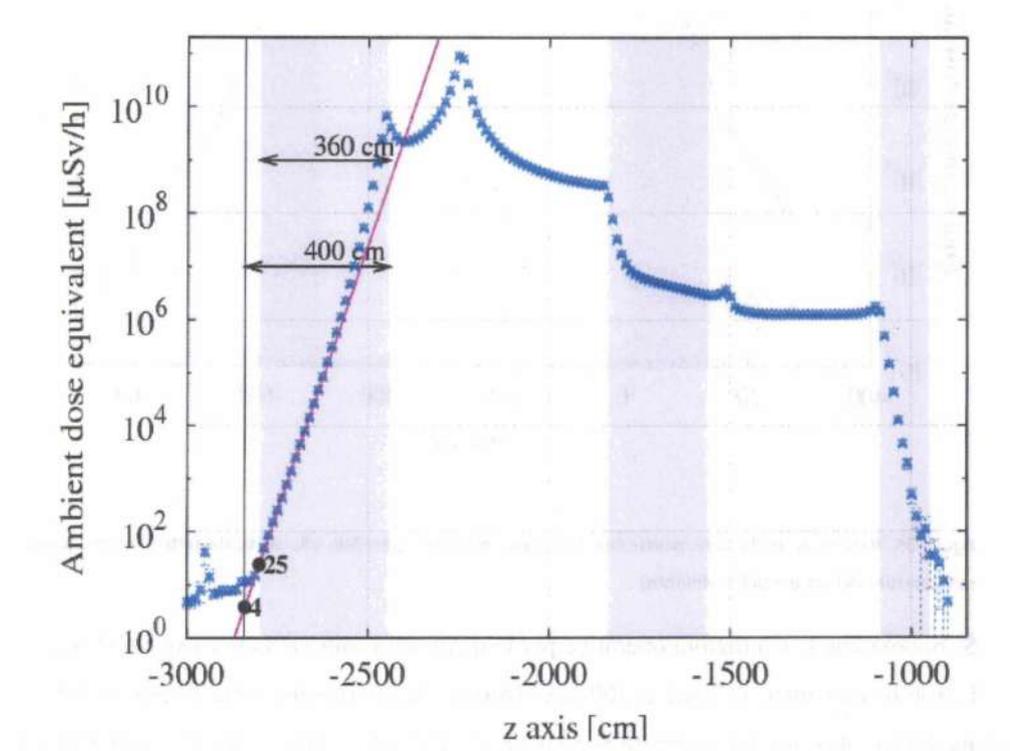


Figura 1.14 - Variazione della dose neutronica lungo una direzione parallela all'asse z passante per il target

Di seguito si può osservare la variazione della dose neutronica lungo una direzione parallela alla verticale (attenuazione lungo le schermature del tetto e del pavimento).

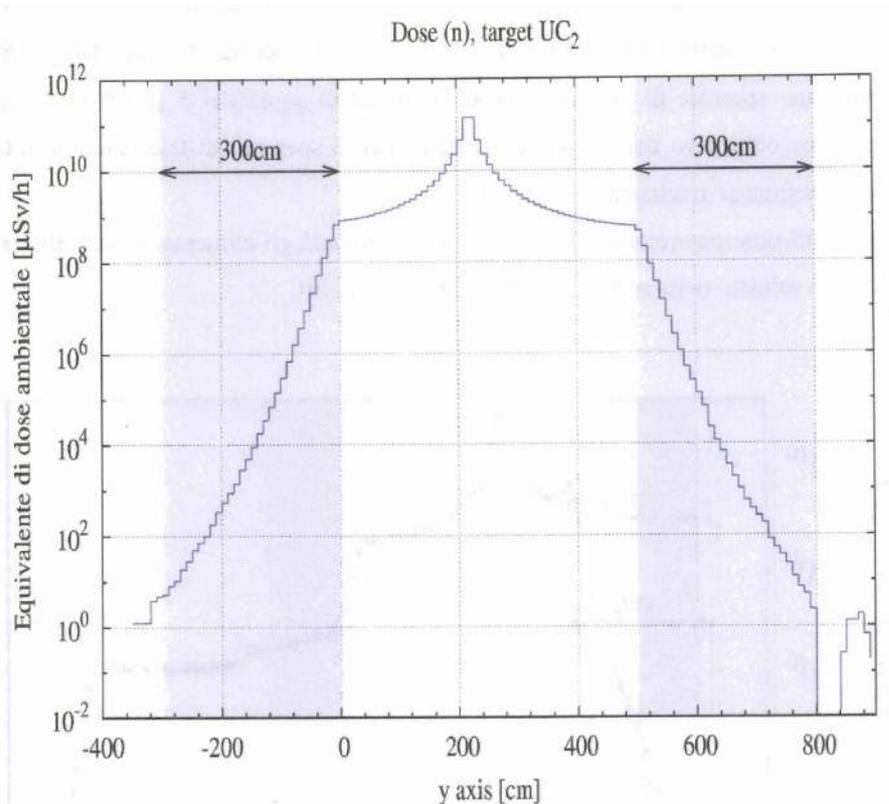


Figura 1.15 - Variazione della dose neutronica lungo una direzione parallela alla verticale (attenuazione lungo le schermature del tetto e del pavimento)

Riassumendo si riportano nella seguente tabella i ratei di equivalente di dose ambientale neutronica per i vari tipi di bersaglio fuori dal muro schermante da 400 cm di spessore per 5 punti indicati nelle figure successive. L'energia di fascio dei protoni è sempre da 70 MeV, 300  $\mu$ A per 2 settimane di irraggiamento continuo.

Punto dose	Posizione		UCx – 300 $\mu$ A
P1	$\varphi = 0^\circ$	$\Theta = 0^\circ$	25 4 (per 400 cm di spessore)
P2	$\varphi = 15^\circ$	$\Theta = 0^\circ$	4.3
P3	$\varphi = -15^\circ$	$\Theta = 0^\circ$	7.2
P4	$\varphi = 0^\circ$	$\Theta = 15^\circ$	5.0
P5	$\varphi = 0^\circ$	$\Theta = -15^\circ$	6.0

Tabella 1.3 - Ratei di equivalente di dose ambientale neutronica fuori dal muro schermante

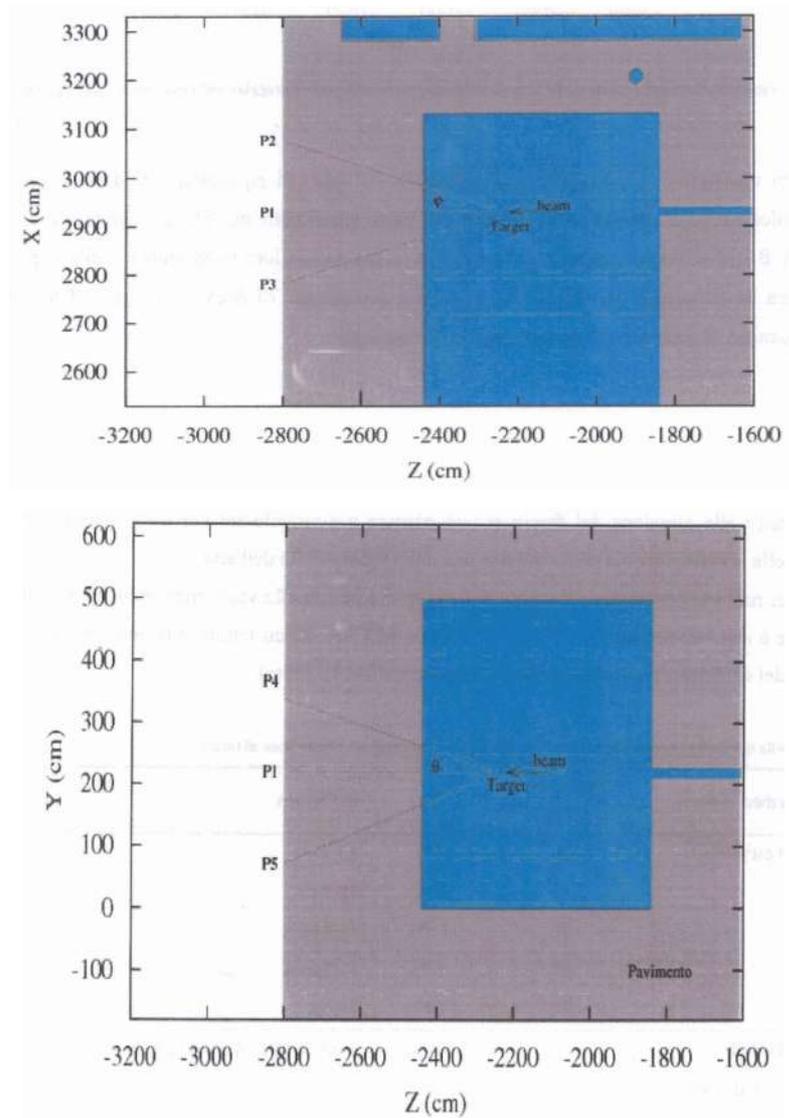


Figura 1.16 - Localizzazione dei punti P di riferimento

Per quanto riguarda il locale del ciclotrone, i campi di radiazione neutronica sono dovuti ad eventuali perdite di fascio di protoni all'interno del ciclotrone o alle perdite sui magneti. Nella seguente tabella sono riassunte le perdite di fascio, in condizioni di funzionamento conservativo teoriche attese durante l'accelerazione e all'estrazione dalla macchina: la percentuale di corrente persa è stata espressa esplicitamente per una corrente nominale di  $750 \mu\text{A}$ .

Perdite di fascio	Energia [MeV]	%	di 750 $\mu$ A
Nel ciclotrone	30	3%	22.5 $\mu$ A
	40	3%	22.5 $\mu$ A
	50	1.5%	11.25 $\mu$ A
	60	1.5%	11.25 $\mu$ A
	70	6%	45 $\mu$ A
Nei dipoli		0.6%	3 $\mu$ A (1 tgt) - 4.5 $\mu$ A (2 tgt)
Nei quadrupoli			
	70	3%	15 $\mu$ A (1 tgt) - 22.5 $\mu$ A (2 tgt)
Linea di fascio			
		0.3%	1.5 $\mu$ A (1 tgt) - 2.25 $\mu$ A (2 tgt)

Tabella 1.4 - Caratteristiche dei protoni persi durante l'accelerazione e all'estrazione dalla macchina

La parete che separa il vano ciclotrone dalle sale sperimentali ha uno spessore di 200 cm; il tetto schermante e il pavimento in calcestruzzo del vano del ciclotrone hanno uno spessore di 300 cm. Tali schermature saranno costruite in modo da contenere il campo di radiazione dovuto alle perdite di corrente riportate.

Nella produzione di neutroni e per la valutazione dell'attivazione delle strutture è stato considerato che i protoni persi durante l'accelerazione interagiscano con la struttura della camera in accelerazione in alluminio (materiale bersaglio presente all'interno del ciclotrone e nelle guide dei dipoli) mentre il fascio secondario (neutroni prodotti) interagisce anche con le parti interne del ciclotrone sostanzialmente in rame. Per le perdite sui dipoli si è considerato un fascio di energia pari a 70 MeV e corrente pari a 3  $\mu$ A che interagisce con un bersaglio di alluminio, materiale di cui sono composte le guide dei magneti.

Dalla distribuzione del rateo di equivalente di dose ambientale neutronica (Figura 1.17), si osserva che il valore massimo si trova nel punto di interazione tra il fascio di protoni e la struttura in alluminio.

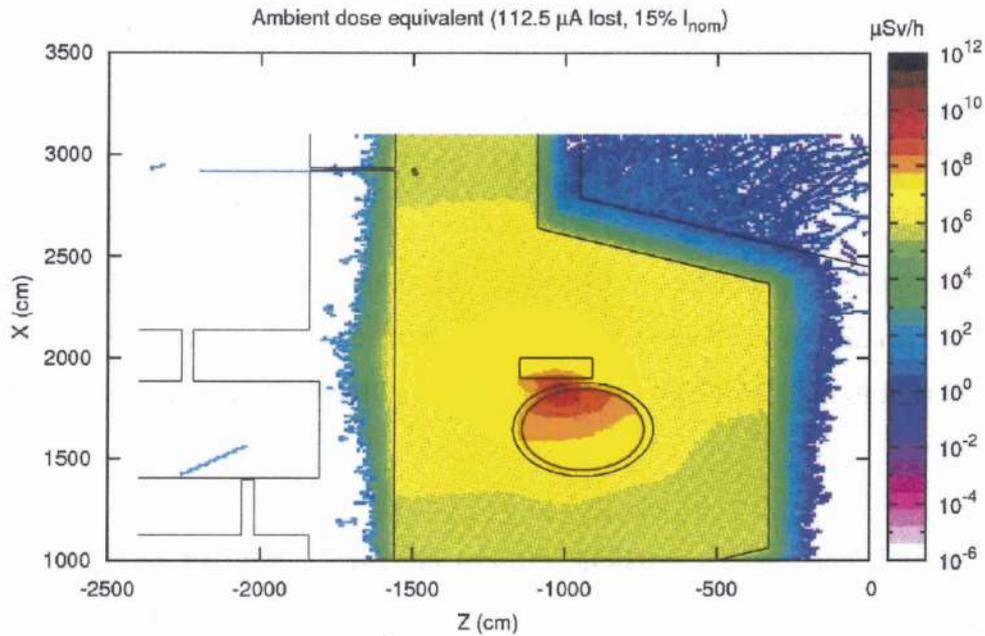


Figura 1.17 - Distribuzione del rateo equivalente di dose ambientale neutronica

Con uno spessore delle pareti di 300 cm e considerando un periodo di funzionamento continuo della macchina (fascio su target) pari a 2 settimane, il rateo di dose neutronica complessivo all'esterno della sala, dovuto sia alle perdite sul ciclotrone sia alle perdite sul magnete, non dovrebbe superare i 2  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$ .

Al termine delle 2 settimane continue di funzionamento del ciclotrone e dell'irraggiamento del bersaglio, l'attivazione creata nelle varie aree, dovuta alle perdite di fascio nella macchina e all'interazione del fascio primario e del fascio secondario (neutroni) con il target, con le strutture limitrofe nonché con le linee di trasporto del fascio, deve essere accuratamente valutata per poter effettuare stime preventive sui tempi e sulle dosi degli interventi di manutenzione. L'ingresso nell'area bunker al termine del periodo di irraggiamento risulta praticamente impossibile in tempi inferiori a mesi, pertanto sia il posizionamento che il ritiro del bersaglio avvengono in modo automatizzato, senza la necessità della presenza umana.

Per quanto riguarda il vano del ciclotrone, al termine delle 2 settimane di funzionamento della macchina, l'equivalente di dose ambientale gamma è di circa 10  $\text{mSv}/\text{ora}$ , nelle vicinanze del ciclotrone si riscontrano ratei di dose che raggiungono 1  $\text{Sv}/\text{h}$ . Al termine di un ciclo di irraggiamento di 2 settimane e dopo 10 giorni di raffreddamento, la dose residua nel vano ciclotrone è inferiore a 10  $\mu\text{Sv}/\text{ora}$ , ad una distanza di circa 5 metri. Considerando un periodo di raffreddamento di 10 giorni si è calcolato che il rateo di dose nel vano

ciclotrone ad una distanza maggiore di 5 metri dal punto di impatto è dell'ordine di 100  $\mu\text{Sv/ora}$ .

### 1.3.2. Radioattività indotta nell'aria: criteri per il controllo dei limiti vigenti

L'interazione di un fascio di protoni, con l'energia e l'intensità considerate, con i target di progetto genera alti flussi di neutroni che a loro volta attivano l'aria presente nei locali.

Per valutare la produzione di attività residua in aria si è ottenuto il rateo di produzione, o attività di saturazione secondo l'equazione:

$$A_s = \frac{N_0 \rho}{W} \int_0^{E_{MAX}} \sigma(E) \cdot \phi(E) dE$$

Con  $N_0$  numero di Avogadro,  $\rho$  e  $W$  rispettivamente la densità e il peso molare dell'aria,  $\sigma(E)$  la sezione d'urto per una data reazione e  $\phi(E)$  è il valor medio volumetrico dello spettro energetico dei neutroni. Supponendo che l'aria all'interno della sala venga ricambiata con un rateo di ventilazione  $R$  (ricambi d'aria al secondo), si può esprimere la condizione di equilibrio come:

$$\lambda N + RN = A_s$$

Ovvero la produzione di nuclidi è bilanciata dalla perdita tramite decadimenti e rimozione con il sistema di ventilazione ( $N$  è la quantità di nuclidi radioattivi). Tenendo conto che  $A = \lambda N$  è il tasso di decadimento (radioattività), l'equazione diventa:

$$A + \frac{R}{\lambda} A = A_s \Rightarrow A = A_s \frac{\lambda}{\lambda + R} \Rightarrow A = \frac{A_s}{1 + \frac{R}{\lambda}}$$

Attività rilasciata al secondo:

$$RA = \frac{A_s}{\frac{1}{R} + \frac{1}{\lambda}} \Rightarrow RA = \frac{A_s}{T + \tau}$$

Con  $T$  tempo di un ricambio di aria del volume considerato e  $\tau$  vita media del radionuclide.

Per valutare l'attivazione dell'aria nella sala bersaglio, i calcoli sono stati effettuati considerando un periodo di irraggiamento del bersaglio di 2 settimane e un rateo di ventilazione  $R = 4.6 \cdot 10^{-5}$  ricambi/sec.

L'attività sui bersagli in UCx utilizza 40 MeV di protoni e 200  $\mu$ A di corrente di fascio. In tabella vengono elencati i principali radionuclidi generati in aria:

Nuclide	$T_{1/2}$	$A_s$	$A_{eq}$	RA	$RA_{cooled}$ (20 min)
		Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g
$^3H$	12,33 y	$6,6 \cdot 10^3$	0,2	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
$^7Be$	53,29 d	$3,6 \cdot 10^3$	11,8	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
$^{10}Be$	$1.51 \cdot 10^6$ y	$2,3 \cdot 10^2$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	-	-
$^{11}C$	20,39 m	$1,5 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	0,6	0,3
$^{14}C$	5730 y	$6,6 \cdot 10^6$	0,5	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
$^{13}N$	9,965 m	$1,0 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	0,5	$1,1 \cdot 10^{-1}$
$^{15}O$	122,24 s	$4,8 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^3$	0,2	$2,5 \cdot 10^{-4}$
$^{35}S$	87,51 d	9,2	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$
$^{41}Ar$	109,34 m	$1,4 \cdot 10^4$	$9,6 \cdot 10^3$	0,4	0,4
<b>TOT</b>		<b><math>6,6 \cdot 10^6</math></b>	<b><math>4,3 \cdot 10^4</math></b>	<b>2,0</b>	<b>0,8</b>

Tabella 1.5 - Principali radionuclidi generati in aria dall'attività sui bersagli in UCx

Nel caso di massima energia dei protoni (70 MeV), corrente massima pari a 300  $\mu$ A, con bersaglio di carburo di uranio e velocità di ventilazione pari a 0.17 ricambi orari, il tempo di attesa e di stoccaggio dell'aria affinché la concentrazione scenda sotto 1Bq/g, è di circa 2 ore. Risulta pertanto necessario un sistema di raccolta dell'aria di ricambio e di stoccaggio per almeno 2 ore prima che venga espulsa all'esterno l'aria contenente i radionuclidi con tempo di dimezzamento inferiore ai 75 giorni. Il rilascio in atmosfera della totalità dei radionuclidi con tempo di dimezzamento superiore ai 75 giorni comporta una dose efficace annua al pubblico pari a  $3 \cdot 10^{-6}$  Sv (3  $\mu$ Sv/anno, molto al di sotto del valore dei 10  $\mu$ Sv/anno considerato come radiologicamente non importante).

Nel vano ciclotrone la presenza di radioattività dell'aria è dovuta all'interazione dei neutroni, prodotti a causa delle perdite di corrente nella macchina durante l'accelerazione e l'estrazione del fascio, nonché alle perdite di corrente sul dipolo, con gli atomi che compongono l'aria. Nella tabella si osservano i principali radionuclidi prodotti in aria nel vano ciclotrone a causa delle perdite di corrente nella macchina e in assenza di ventilazione:

Nuclide	T <sub>1/2</sub>	Attività [Bq]	
		t <sub>cool</sub> = 1 h	t <sub>cool</sub> = 10 d
<sup>3</sup> H	12.33 y	4.6 10 <sup>5</sup>	4.6 10 <sup>5</sup>
<sup>7</sup> Be	53.29 d	8.7 10 <sup>5</sup>	7.6 10 <sup>5</sup>
<sup>11</sup> C	20.39 m	1.3 10 <sup>6</sup>	-
<sup>14</sup> C	5730 y	1.8 10 <sup>6</sup>	1.8 10 <sup>6</sup>
<sup>13</sup> N	9.965 m	1.4 10 <sup>6</sup>	-
<sup>38</sup> Cl	37.24 m	2.8 10 <sup>5</sup>	-
<sup>39</sup> Cl	55.6 m	8.4 10 <sup>5</sup>	-
<sup>37</sup> Ar	35.04 d	5.4 10 <sup>6</sup>	4.4 10 <sup>6</sup>
<sup>41</sup> Ar	109.34 m	5.7 10 <sup>8</sup>	-
<b>TOT</b>		<b>5.8 10<sup>8</sup></b>	<b>7.5 10<sup>6</sup></b>
<b>TOT. [Bq/g]</b>		<b>324.3</b>	<b>4.2</b>

Tabella 1.6 - Principali radionuclidi prodotti in aria nel vano ciclotrone a causa delle perdite di corrente

Dai risultati delle simulazioni risulta che, in assenza di qualsiasi ventilazione, il contributo dell'attività dovuta alle perdite di corrente sul dipolo rispetto al totale è di circa il 15% relativamente ad un tempo di raffreddamento di 10 giorni. Il valore di concentrazione di attività raggiunto dopo 2 settimane di funzionamento continuo del ciclotrone e 10 giorni di raffreddamento, considerando che tutta l'aria del vano risulti perfettamente confinata, è di circa 5 Bq/g. Ne risulta che per poter garantire il valore di concentrazione della radioattività espulsa in aria di 1 Bq/g, per i radionuclidi con tempo di dimezzamento inferiore ai 75 giorni, risulta necessario il ricambio dell'aria anche nel vano ciclotrone. (11) Nei seguenti capitoli sono stati descritti gli impianti di ricambio dell'aria dell'edificio SPES, con particolare dettaglio per quelli a servizio del locale del ciclotrone e dei bunker.



## 2. Edificio SPES e produzione di radiofarmaci da ciclotrone

L'edificio SPES sorge presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) ed è ubicato vicino al complesso ALPI (Figura 2.1), acceleratore lineare in funzione già dagli anni '90.

L'edificio SPES si compone di un piano interrato, dove sono ubicate le sale sperimentali, un piano primo adibito in parte a locali tecnici e in parte a laboratori e un piano secondo che sarà adibito a uffici e laboratori. Al livello terra sono previsti solo gli accessi alle sale sperimentali e ai due gruppi scala/elevatori collocati sui fronti sud e nord dell'edificio. (12)

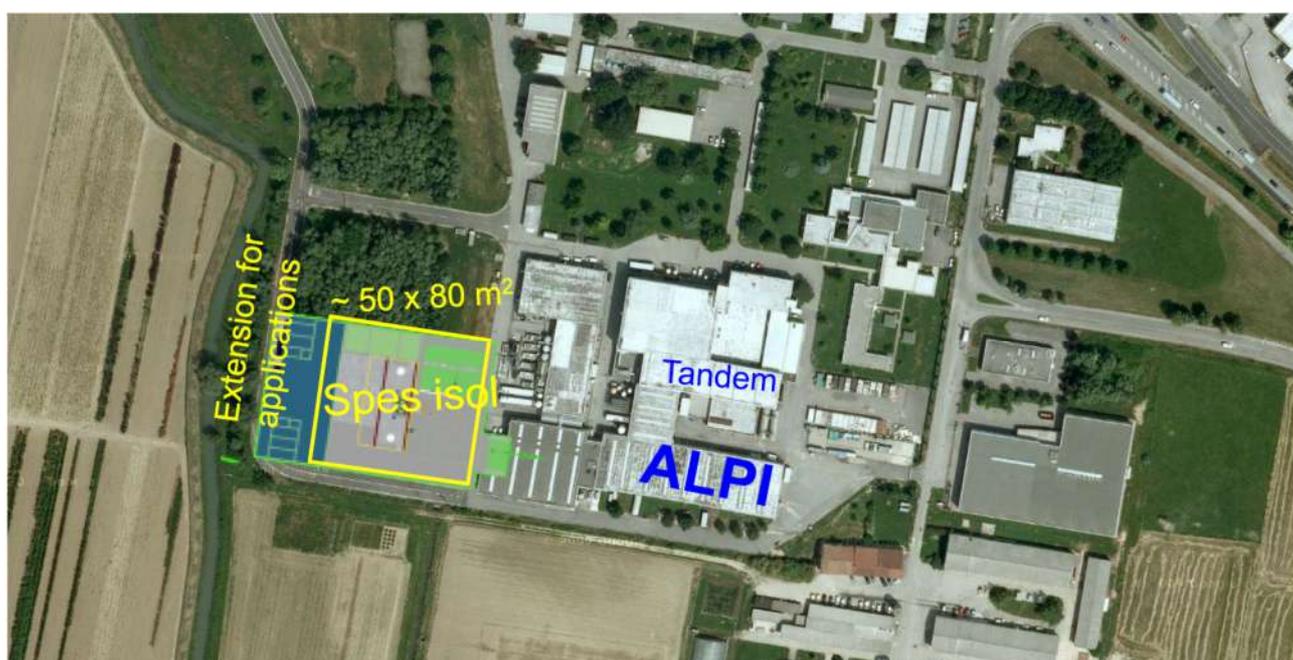


Figura 2.1 - Ubicazione edificio SPES presso i LNL

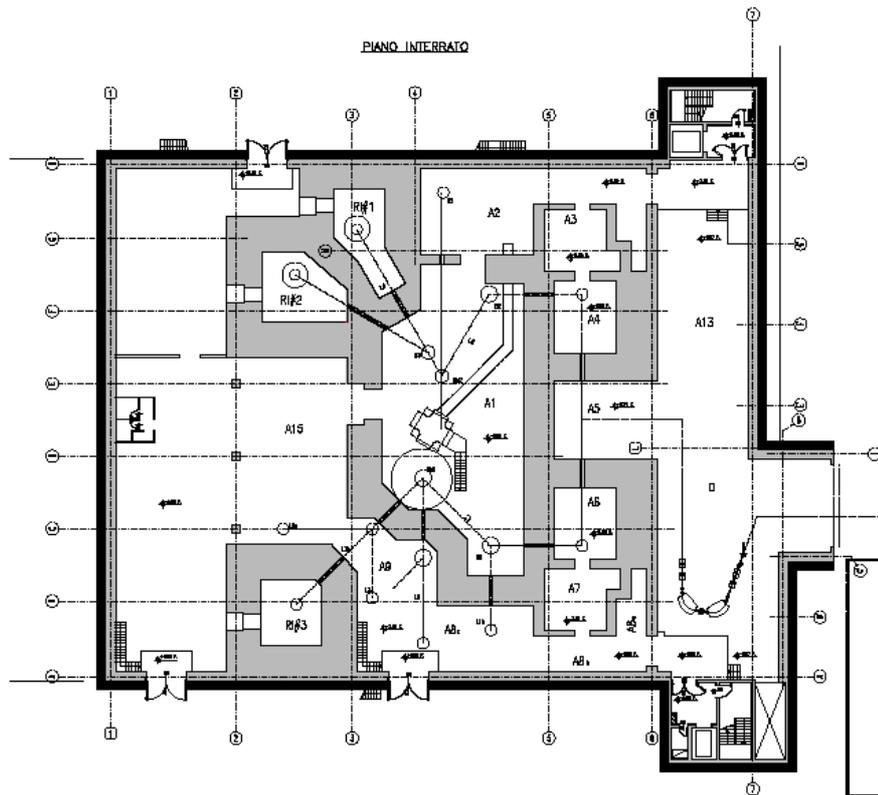


Figura 2.2 - Planimetria piano interrato

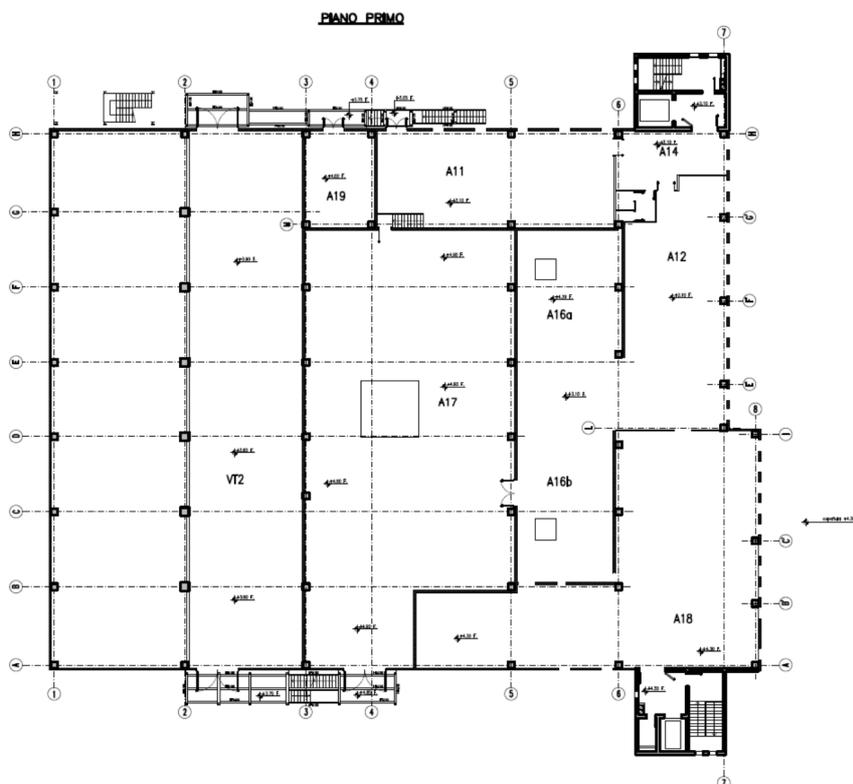


Figura 2.3 - Planimetria piano primo

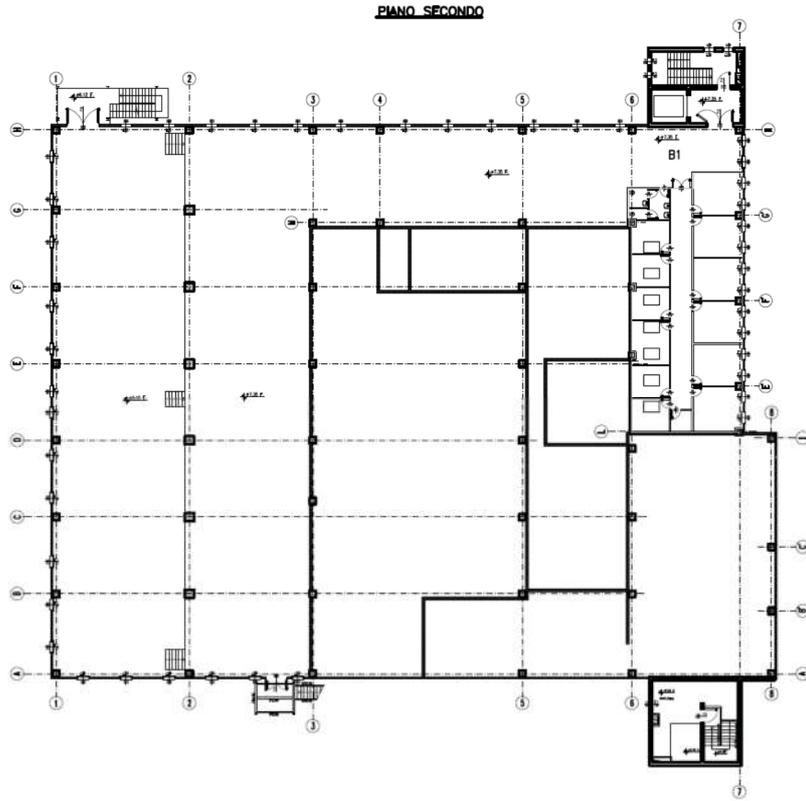


Figura 2.4 - Planimetria piano secondo

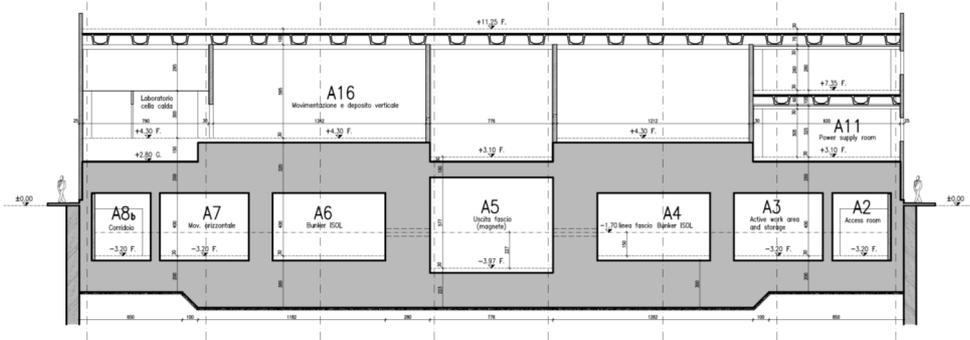


Figura 2.5 - Sezione trasversale

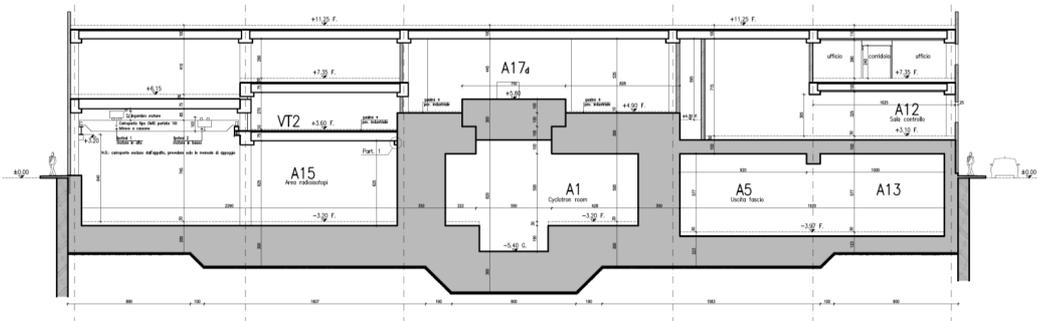


Figura 2.6 - Sezione longitudinale

## 2.1. Descrizione del layout generale delle sale sperimentali

Le sale sperimentali dell'edificio SPES si trovano al piano interrato: per contenere la radioattività che viene prodotta nel locale ciclotrone e nei bunker, le pareti e i solai hanno spessori di 3÷4 m per fare da schermatura. I bunker sono 5 in totale: 2 a servizio di SPES e 3 a servizio di LARAMED.

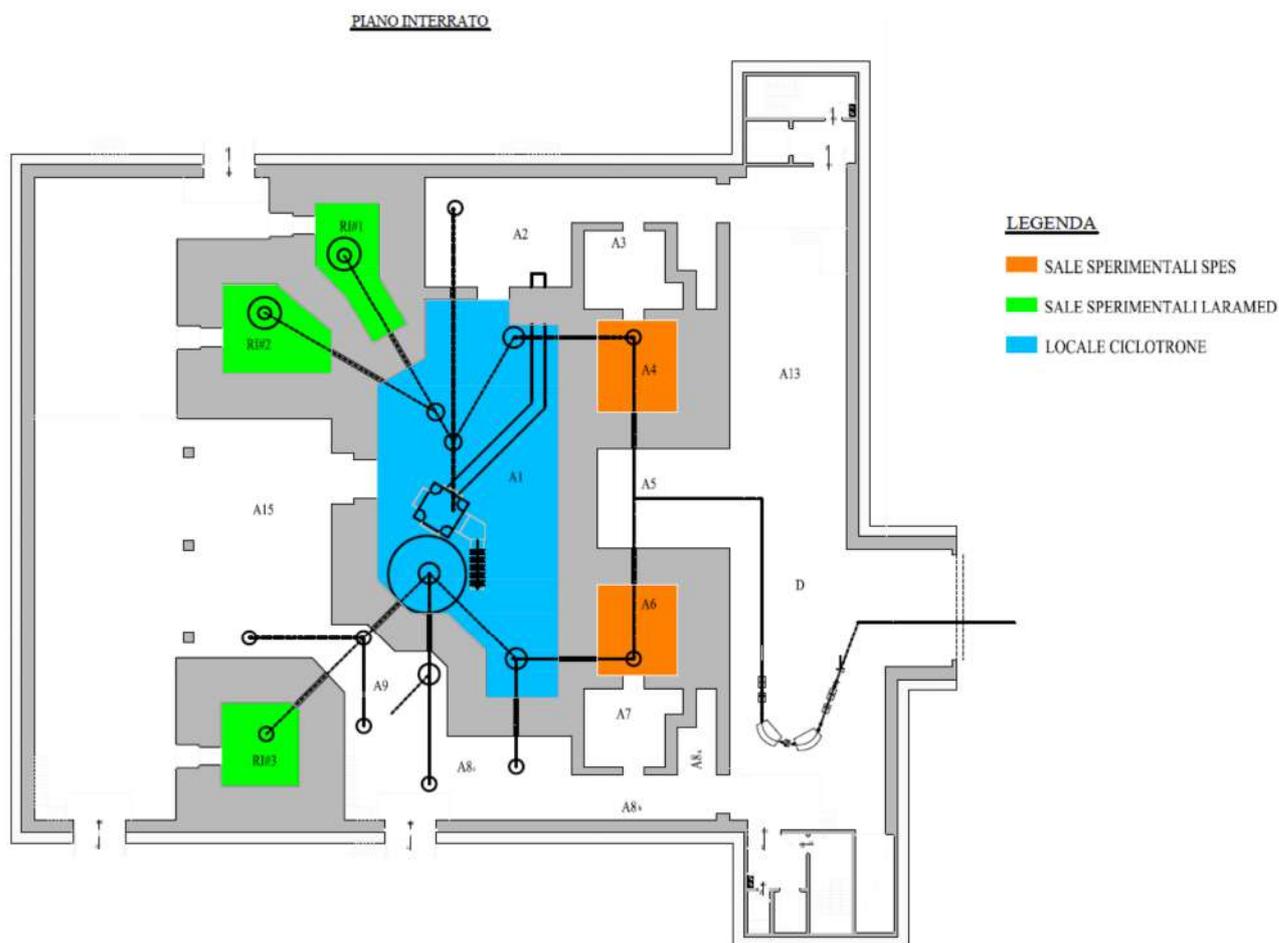


Figura 2.7 - Organizzazione sale sperimentali piano interrato

La sala del ciclotrone e tutti e 5 i bunker hanno un sistema di ventilazione dedicato, che prevede che, durante gli esperimenti, i locali siano in depressione, in modo da non far fuoriuscire dal locale aria potenzialmente contaminata. I 2 bunker di SPES hanno un pre-bunker ciascuno, anch'esso in depressione. Quando il ciclotrone è in funzione, possono essere in funzione al massimo 2 dei 5 bunker. Durante gli esperimenti sarà quindi possibile accedere ai bunker non in funzione per permettere attività di manutenzione.

### 2.1.1. Bunker di irradiazione SPES

Il bunker di SPES ospita un target che produce un fascio esotico che viene poi portato verso il complesso ALPI cui l'edificio SPES è collegato (Figura 2.8)

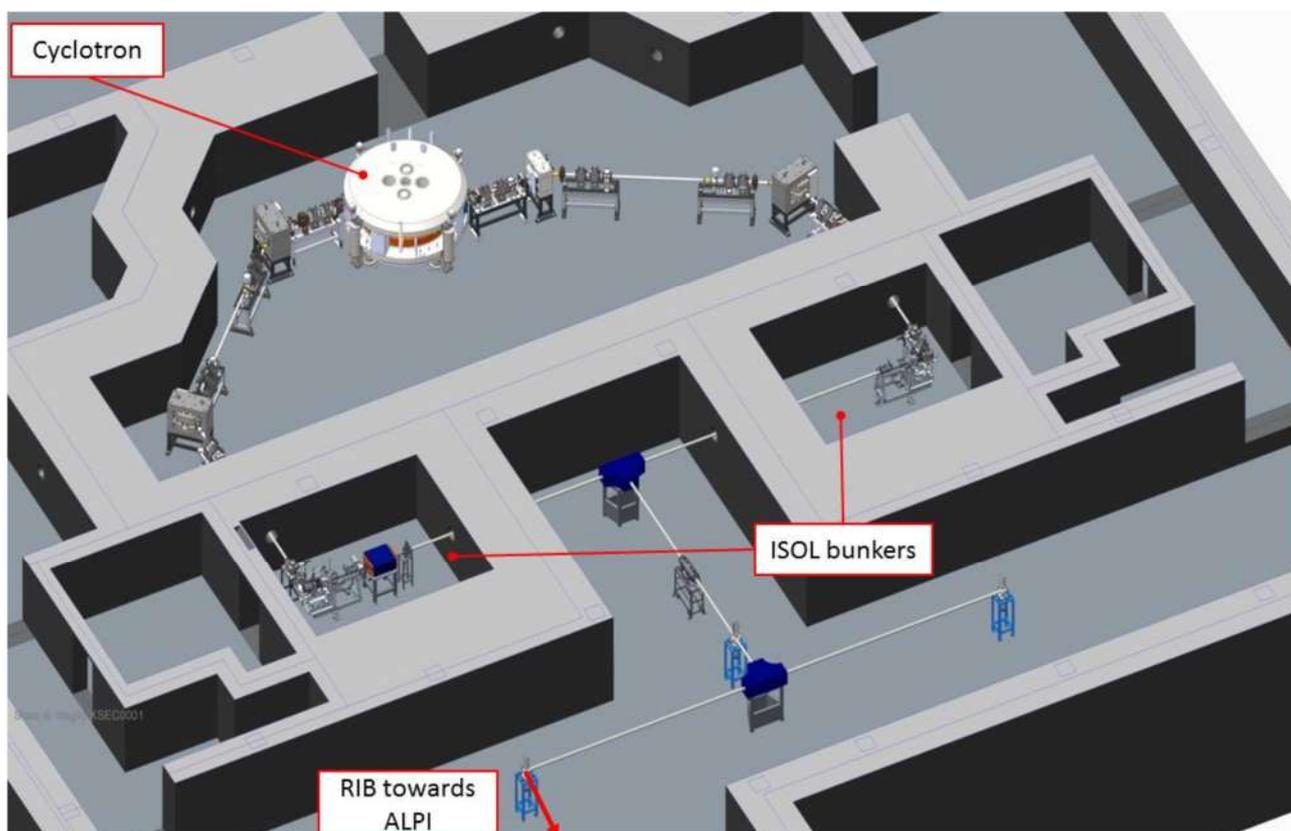


Figura 2.8 - Schema del percorso del fascio che attraversa i bunker del progetto SPES

L'area di produzione del fascio radioattivo si compone essenzialmente di due parti:

- Il Front-end
- La camera target

Il Front-End è l'insieme di più elementi complementari tra loro e aventi ciascuno una specifica funzione: si compone essenzialmente di due parti: il Front-End protonico (FEP), responsabile del trasporto del fascio protonico; il Front-End radioattivo (FER) responsabile del trasporto del fascio radioattivo.

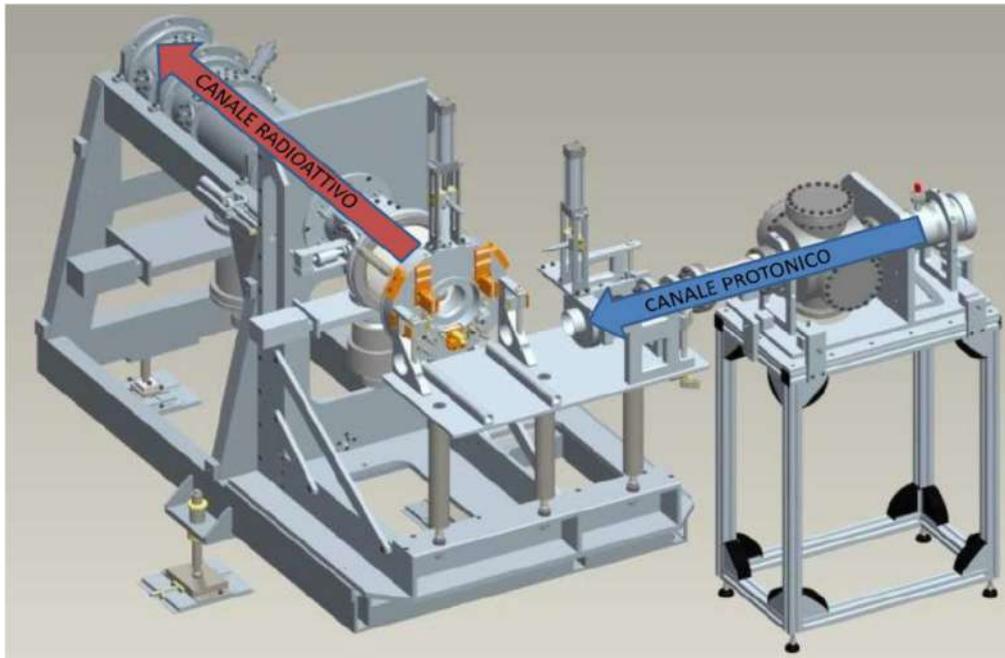


Figura 2.9 - Schematizzazione del Front-End

Il Front-End svolge diverse funzioni: garantisce sostegno e stabilità alla camera target e agli apparati necessari al trasporto del fascio radioattivo; realizza un grado di vuoto sufficientemente spinto per il corretto trasporto del fascio; consente un rapido aggancio della camera target; provvede all'apporto verso la camera target di energia elettrica per il riscaldamento del target e di acqua per il raffreddamento della camera target. L'alto livello di vuoto, dell'ordine di  $10^{-5}$  mbar, facilita il cammino dei due fasci ed evita l'ossidazione dei componenti del target, aspetto di grande importanza dato che la camera target lavora ad alte temperature. Il Front-End protonico collega la linea di fascio proveniente dal ciclotrone alla camera target permettendo l'isolamento elettrico tra le due estremità, in quanto il target si trova in una piattaforma a 40 kV. Prima di entrare nella camera target, il fascio passa per un collimatore, che è il primo elemento della catena ed è formato da una serie di blocchi di grafite con fori coassiali di diverso diametro: i blocchi sono posti in modo tale che il diametro del foro sia decrescente nel verso del fascio, in questo modo riduce l'area d'impatto del fascio stesso adattandola alla dimensione dei dischi di uranio. (13)

Il Front-End radioattivo riceve e trasporta il fascio radioattivo, ed è composto da due parti: parte di telaio fissata con il gruppo di quadripoli che controlla il fascio; parte di telaio removibile che comprende la tavola di ammaraggio che sostiene la camera target e tutti gli oggetti vicini ad essa. Le zone più prossime alla camera target sono soggette a un notevole danneggiamento dovuta all'alta dose radioattiva proveniente dal target. La tavola di ancoraggio accoppia la camera target al Front-End attraverso alcune connessioni

pneumatiche ed elettriche. Questa zona prossima alla camera viene sostituita ogni 7 anni di lavoro, mentre il resto del Front-End (telaio fisso) è a una distanza tale per cui è accettabile pensare un tempo di danneggiamento maggiore. Il telaio fisso è assicurato a terra tramite dei piedini regolabili in altezza che poggiano su basi che consentono un buon allineamento dell'intera struttura al piano di appoggio; qui alloggiavano il gruppo di quadripoli elettrostatici che focalizzano il fascio radioattivo.

Il fascio estratto dalla sorgente di ionizzazione è sottoposto ad una prima fase di purificazione nella quale, attraverso un separatore di massa, viene intrappolata una grande quantità di contaminanti.

Il fascio radioattivo può quindi essere direttamente convogliato alle sale sperimentali ed utilizzato in esperimenti che richiedono fasci radioattivi di bassissima energia, oppure essere post accelerato. La post accelerazione viene ottimizzata mediante l'impiego di un Charge Breeder, un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni prima dell'iniezione del fascio esotico attraverso un RFQ e successivamente attraverso "ALPI" che rappresenta lo stadio di post accelerazione (Figura 2.10). Successivamente il fascio viene portato nelle sale sperimentali dove viene utilizzato. (14)

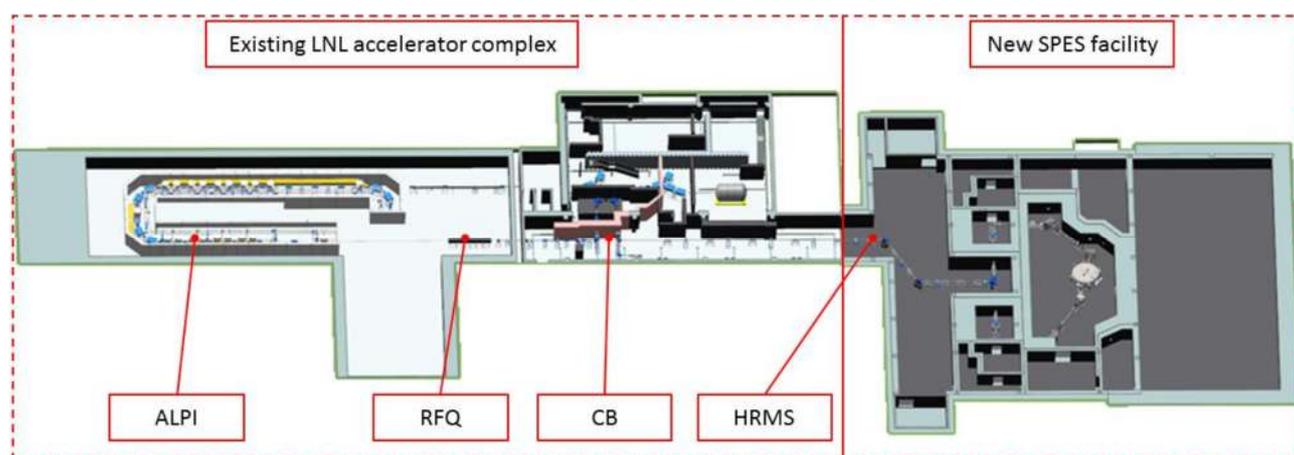


Figura 2.10 - Schema del complesso SPES + ALPI

### 2.1.2. Bunker di irradiazione LARAMED

Il sistema che sostiene i target degli esperimenti LARAMED è ancora in fase di studio. Non esiste ancora un progetto a riguardo, un sistema analogo è quello della IBA (Ion Beam Applications), raffigurato nelle figure Figura 2.11 e Figura 2.12.

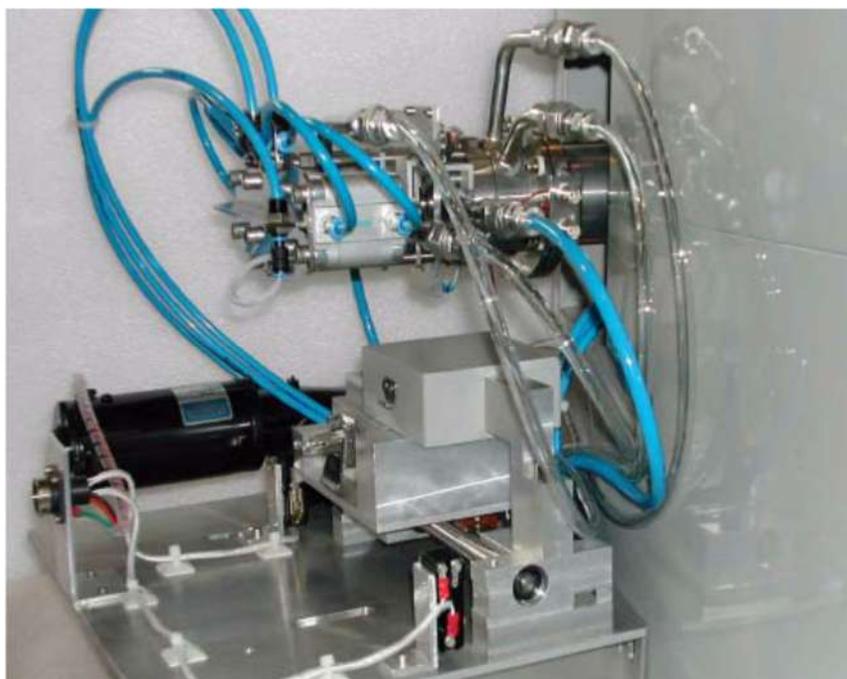


Figura 2.11 - Target solido Nirta standard IBA

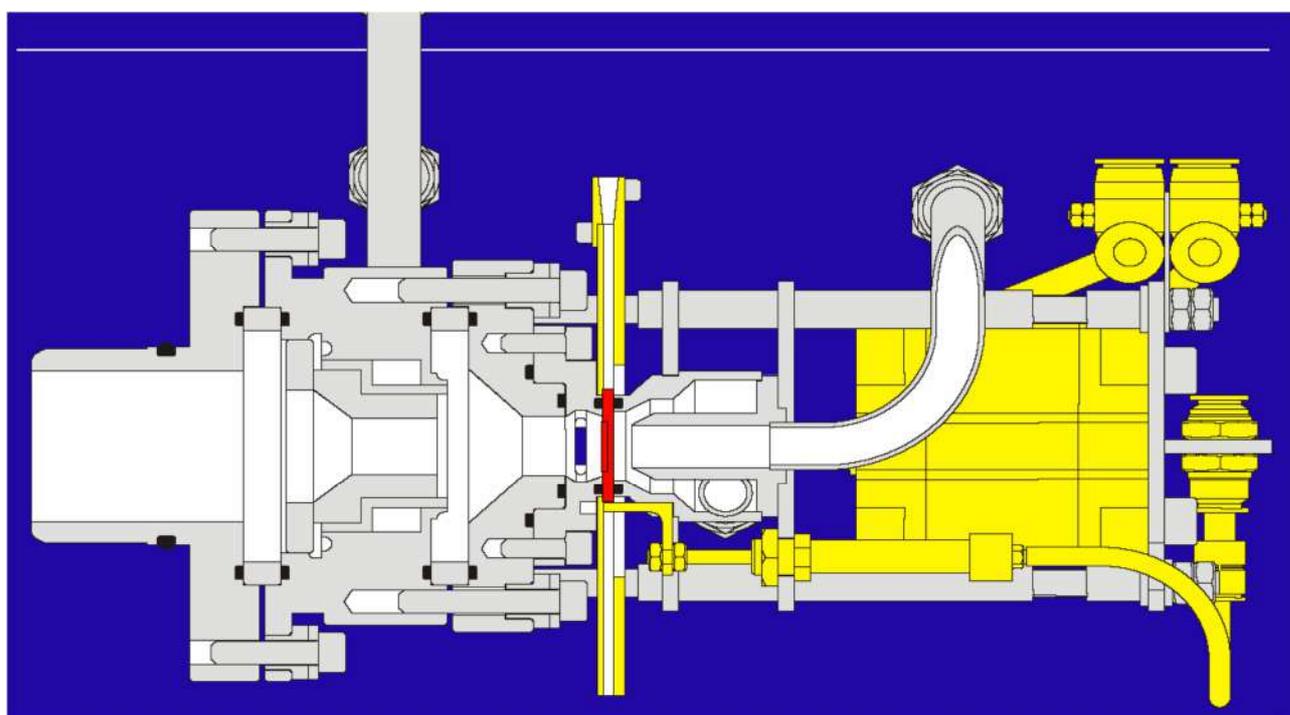


Figura 2.12 - Schematizzazione del target holder standard IBA Nirta

Una schematizzazione dell'idea a cui si sta facendo riferimento per la progettazione del target-holder è raffigurata in Figura 2.13.

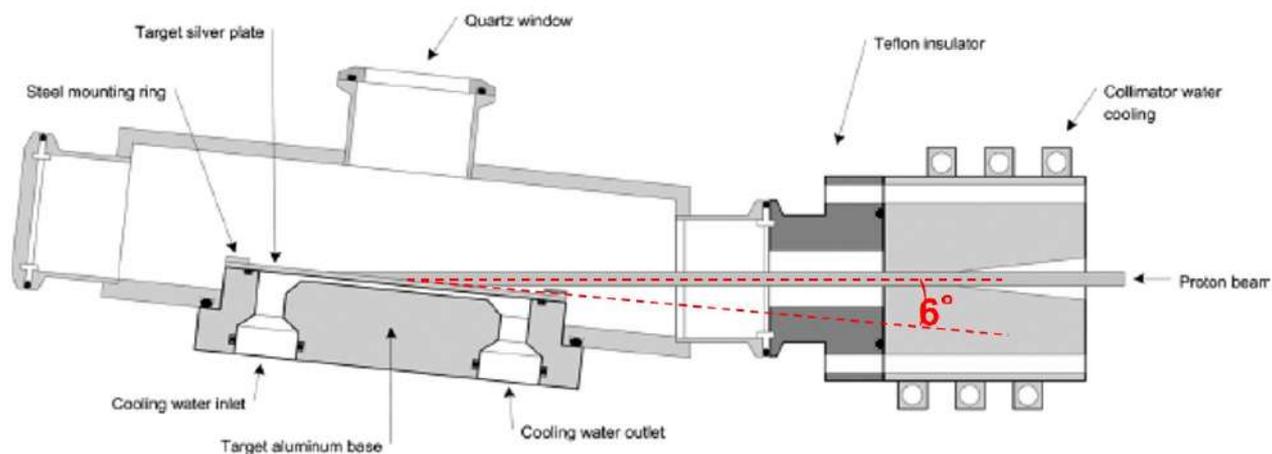


Figura 2.13 - Schematizzazione target-holder LARAMED

Il sistema a sostegno del target LARAMED sarà molto diverso da quello del target SPES, soprattutto per il fatto che i target saranno differenti come geometria e materiali, ma soprattutto come funzionalità: il target SPES produrrà un fascio radioattivo ottenuto dall'interazione tra fascio protonico e il target stesso, tale fascio radioattivo verrà poi condotto agli acceleratori lineari PIAVE-ALPI; il target LARAMED è strutturato per l'interazione tra il fascio del ciclotrone e l'elemento caratteristico del target che si vuole produrre (Mo-100, Cu-64, etc.). Il target-holder sarà quindi un sistema meno complesso di quello presente nei bunker SPES.

### 2.1.3. Normative internazionali di riferimento

La progettazione delle sale sperimentali deve sottostare a determinati standard di sicurezza, in particolare per quanto riguarda la radioattività prodotta e la contaminazione dell'aria. La normativa internazionale è la ISO 17873 "*Criteria for the design and operation of ventilation systems for nuclear installations other than nuclear reactors*" (Criteri per la progettazione e il funzionamento dei sistemi di ventilazione per installazioni nucleari diverse dai reattori). Scopo di questa normativa è quello di descrivere alcuni criteri di utilizzo dei sistemi di ventilazione e filtraggio basati su standard internazionali, che mirano a garantire l'utilizzo in sicurezza dei macchinari e di proteggere i lavoratori dalla

propagazione della contaminazione radioattiva generata dalle attività svolte all'interno della struttura in cui hanno luogo le attività. La ventilazione forzata garantisce diverse funzioni, descritte nell'art. 4:

- Confinamento di eventuali contaminazioni, agendo in maniera dinamica per contrastare eventuali difetti nella tenuta dei contenimenti statici.
- Purificazione dell'aria dei locali, convogliando i gas, incluse polveri e componenti volatili, verso determinate zone, per poi essere filtrati.
- Monitoraggio del funzionamento dei macchinari, predisponendo misure che possano permettere di individuare eventuali fuoriuscite di componenti radioattivi.
- Pulizia e rinnovo dell'aria predisponendo determinati ricambi orari dei volumi d'aria.
- Comfort dei locali dato da un corretto settaggio di temperatura e umidità dell'aria dei locali, in modo da garantire condizioni adatte all'attività lavorativa delle persone al loro interno.

L'art. 6 della norma ISO 17873 definisce i principi base per la prevenzione della propagazione della radioattività nell'aria:

- In situazioni normali, limitare l'uscita del materiale radioattivo fuori dalla facility e mantenere all'interno un livello di contaminazione il più basso possibile;
- In situazioni di emergenza, limitare a livelli accettabili le conseguenze radiologiche per l'ambiente e per il personale direttamente coinvolto nelle operazioni che portano alla diffusione della contaminazione radioattiva e per gli altri operatori nella stessa struttura.

Da questi principi deriva la necessità di predisporre diversi sistemi di contenimento tra gli ambienti e le sostanze radioattive. Ogni sistema di contenimento ha l'obiettivo di mantenere, in ogni situazione, la funzionalità di almeno un sistema di filtrazione tra le aree contaminate e gli ambienti circostanti.

L'art. 8 della normativa 17873 elenca alcune metodologie di dimensionamento dei sistemi di ventilazione. Le aree nelle quali sono presenti materiali radioattivi vengono classificate in base al grado di rischio radioattivo che contengono. La classificazione viene impostata in base alla radiazione diretta e in base al potenziale livello di contaminazione sulle superfici e/o dell'aria. Per ottimizzare il sistema di ventilazione, l'installazione va divisa in

aree separate in base al rischio di diffusione della contaminazione. Una delle classificazioni più usate è quella che utilizza 4 classi di suddivisione.

Classe	Contaminazione normale e/o occasionale
C1	Area libera da contaminazioni radioattive superficiali o dell'aria, in condizioni normali. Può essere accettato un basso livello di contaminazione solo in situazioni eccezionali.
C2	Area sostanzialmente pulita durante normale funzionamento. Solo in circostanze eccezionali, per esempio in caso di incidenti, è accettabile un livello medio di contaminazione, quindi devono essere previsti appropriati sistemi di controllo.
C3	Area in cui possono essere presenti alcune superfici contaminate, ma normalmente libera da aria contaminata. In alcuni casi, per esempio in caso di incidenti, possono esserci superfici o aria con grado di contaminazione superiore a quella del livello C2, vanno, quindi, previsti anche qui appropriati sistemi per il controllo.
C4	Area in cui è presente continuamente aria contaminata a livelli elevati, quindi non deve essere permesso l'accesso da parte del personale, se non con appropriato equipaggiamento di protezione.

Tabella 2.1 - Classificazione aree secondo la norma UNI ISO 17873

Quando si utilizzano classificazioni delle aree di contenimento, si devono adottare alcune precauzioni per garantire alcune garanzie di sicurezza.

- Le varie aree vanno mantenute a diversi livelli di pressione, in particolare le aree con il più elevato livello di contaminazione dell'aria deve essere mantenuto al più alto grado di depressione, rispetto alla pressione delle aree adiacenti. In queste aree adiacenti, la contaminazione potenziale deve essere talmente bassa da non rendere necessario un ulteriore livello di depressione rispetto all'ambiente esterno.
- In caso di rotture accidentali delle barriere strutturali che separano le aree a diversi livelli di contaminazione, il sistema di ventilazione deve essere in grado di mantenere un flusso di aria sufficiente in una direzione preferenziale attraverso le aperture accidentali, in modo da limitare il deflusso dell'aria da una zona contaminata ad una a livello più basso di contaminazione.

- La struttura di involucro attorno all'area C4 che ospita un processo radioattivo sarà la prima barriera di contenimento e avrà integrità e tenuta adeguate all'attività contenuta. Ulteriori barriere di contenimento saranno fornite dalle strutture che limitano le aree circostanti (aree C3, C2 o C1), sia le depressioni che i flussi dovranno essere a livelli coerenti con la qualità di contenimento definita dall'impianto. In casi particolari, come ad esempio in caso di incidente, i livelli di depressione e di flusso verso l'interno vanno aumentati, quindi c'è bisogno di una riserva appropriata da parte degli impianti.

La depressione tra le aree è necessaria per far sì che l'afflusso d'aria attraverso aperture permanenti o accidentali non sia inferiore ad una velocità media specificata in condizioni normali o straordinarie. Il sistema di mandata e aspirazione dell'impianto deve essere opportunamente bilanciato in modo da mantenere le depressioni desiderate. Nella seguente tabella vengono riportati i valori indicati nell'art. 8 della norma ISO 17873.

Descrizione dell'area	Depressione	Classe di contenimento
Locali non controllati o aree non contaminate	Pressione atmosferica o lievi depressioni	Non classificata
Aree supervisionate con bassi livelli di contaminazione	< 60 Pa	C1
La classe C1 può essere contaminata durante normali operazioni		
Aree controllate con contaminazione moderata	80÷100 Pa	C2
Aree controllate con alto livello di contaminazione	120÷140 Pa	C3
Aree controllate con livelli di contaminazione molto alti	220÷300 Pa	C4
Aree non accessibili eccetto per circostanze particolari		

Tabella 2.2 - Valori di depressione indicati nella norma UNI ISO 17873

Oltre al mantenimento in depressione dei locali con contaminazione radioattiva in modo da non far fuoriuscire la contaminazione negli ambienti circostanti, è importante garantire ai locali dei ricambi d'aria. Sempre nell'art. 8 della ISO 17873 vengono date indicazioni sul numero dei ricambi orari da garantire nei locali in relazione alla classe di contenimento.

Il numero dei ricambi d'aria viene determinato dai requisiti necessari alla ventilazione tradizionale di garantire aria fresca, inodore, priva di vapori etc. Inoltre, il numero di ricambi può essere determinato dalla necessità di mantenere il corretto valore di depressione e flusso di aria. (15)

Locale	Ricambi orari	Classe di contenimento
Spogliatoi	4÷5	C1, C2, C3
Corridoi	1÷2	C2
Locali normalmente non attivati	1÷2	C2
Aree controllate a medio potenziale di rischio	2	C2
Aree di manutenzione di contenimento primario degli impianti a rischio moderato	1÷5	C3
Aree controllate ad alto potenziale di rischio	5÷10	C3
Aree di manutenzione a contenimento primario degli impianti di processo ad alto rischio	10	C3
Contenimento primario (chiusure di contenimento, celle schermanti)	1÷30 (dipende interamente dal tipo di processo, dal volume della camera di contenimento e dal grado di pericolo)	C4

Tabella 2.3 - Valori indicati dalla norma ISO 17873 per i ricambi d'aria

## 2.2. Requisiti strutturali e impiantistici

Per rispettare i criteri di sicurezza descritti nei paragrafi precedenti, sono state adottate particolari scelte progettuali, ad esempio riguardo agli spessori delle pareti e al dimensionamento degli impianti.

Le schermature in calcestruzzo delle pareti dei locali in cui c'è possibilità di contaminazione radioattiva (locale ciclotrone e bunker) hanno spessori che variano dai 3 ai 4 metri, mentre il pavimento e il solaio hanno spessori di 3 metri.

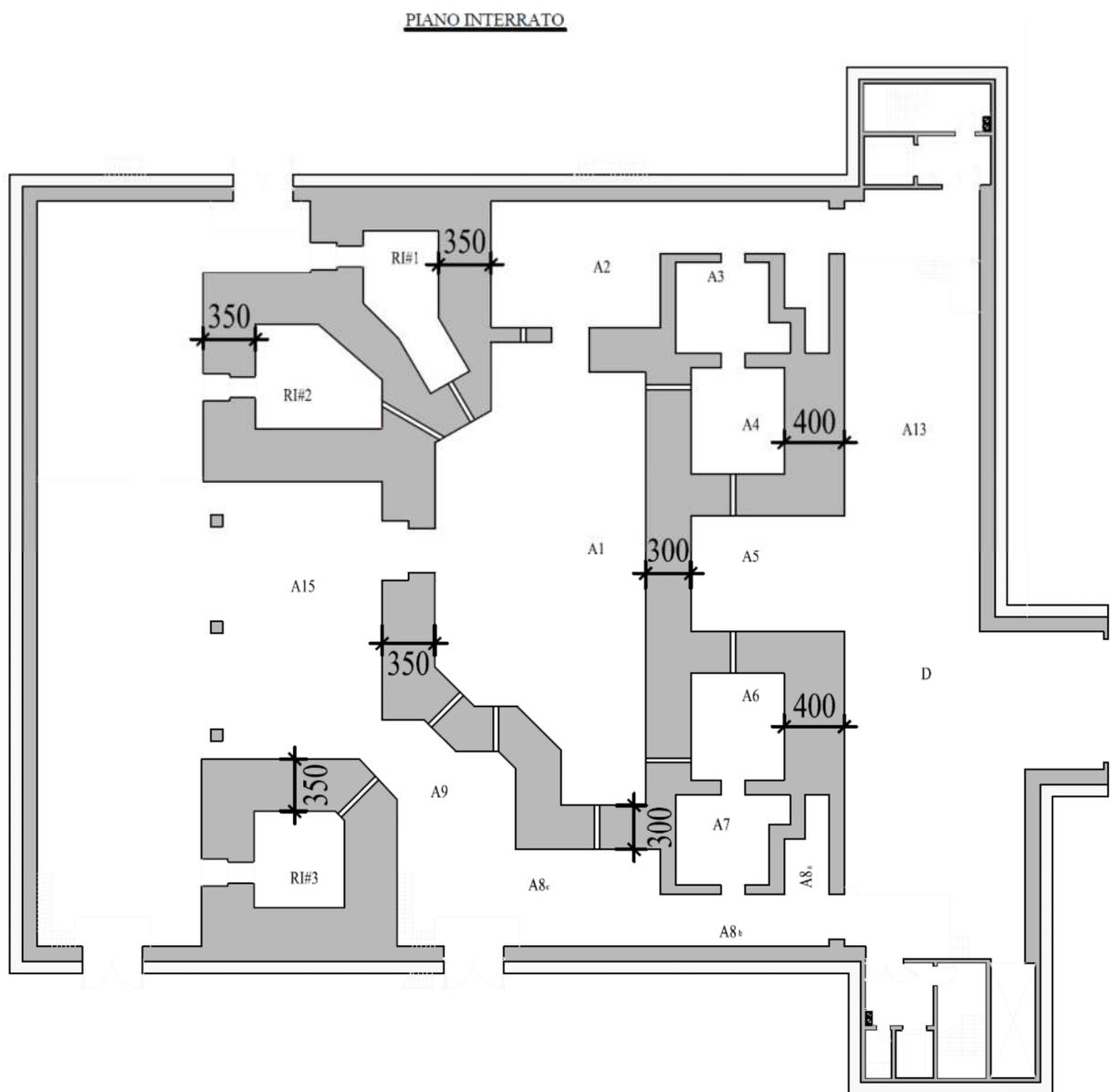


Figura 2.14 - Spessori (in cm) delle pareti al piano interrato

Dal punto di vista impiantistico, gli impianti devono garantire determinate depressioni nei locali in cui c'è attività radioattiva, in particolare dovranno essere garantiti anche determinati standard riguardo ai ricambi d'aria e alla filtrazione dell'aria prelevata dai locali prima di essere immessa in atmosfera. Nel seguente capitolo verranno descritti in maniera più dettagliata gli impianti a servizio del piano interrato e i relativi sistemi di filtrazione. Nella seguente immagine (Figura 2.15) e nella successiva tabella (Tabella 2.4) viene schematizzata la localizzazione dei locali in depressione al piano interrato e la relativa classe di contenimento.

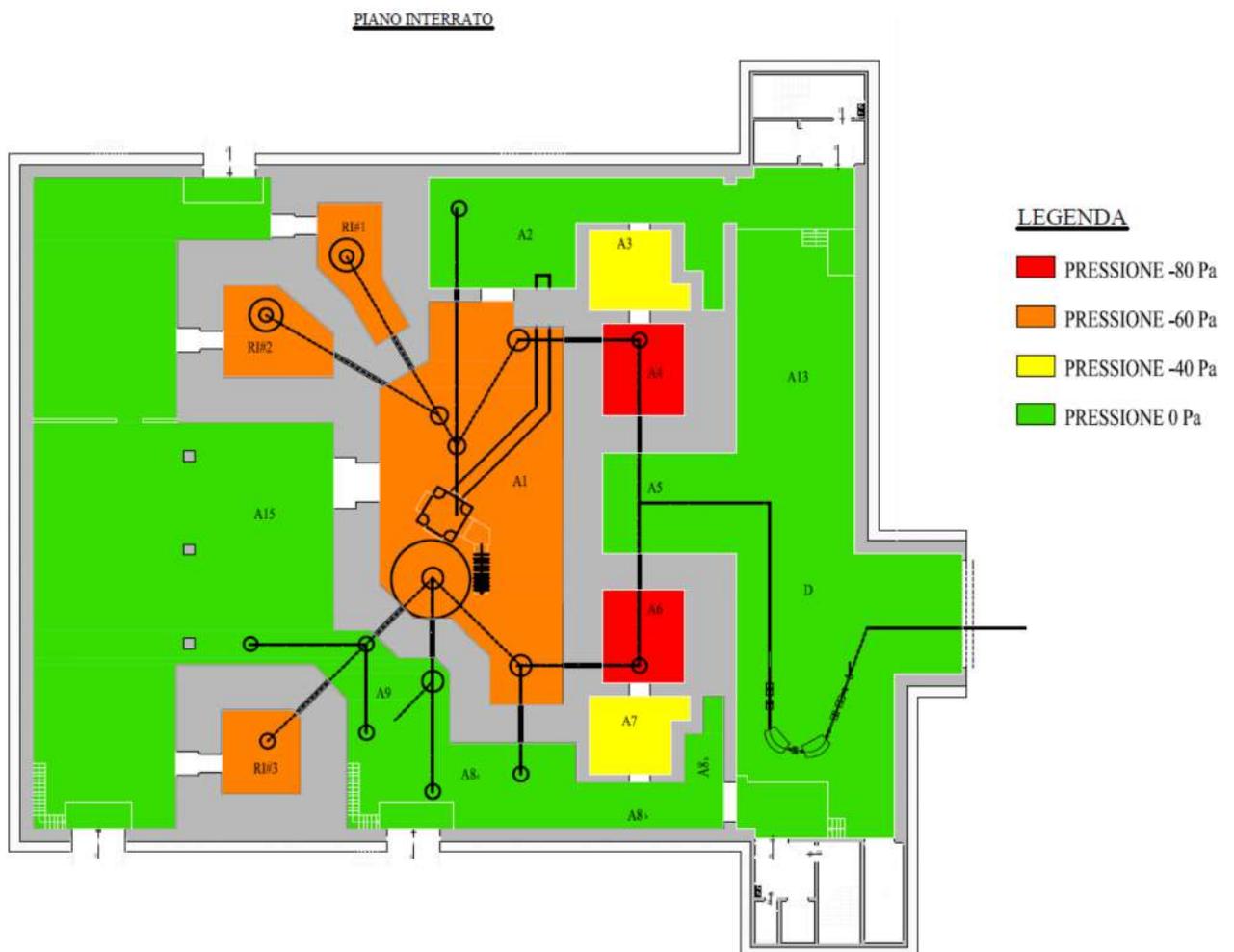


Figura 2.15 - Localizzazione locali in depressione piano interrato

Locale	Classe di contenimento	Pressione
A1	C1	-60
A2	Non classificata	0
A2a	Non classificata	0
A3	C1	-40
A4	C2	-80
A5	Non classificata	0
A6	C2	-80
A7	C1	-40
A8a	Non classificata	0
A8b	C1	0
A8c	Non classificata	0
A9	Non classificata	0
R1	C2	-60
R2	C2	-60
R3	C2	-60
A13	Non classificata	0
A15	C1	0

Tabella 2.4 - Classificazione locali piano interrato

### 2.2.1. Specifiche progettuali

La progettazione deve tenere conto delle specifiche di ogni locale, soprattutto in relazione alle attività svolte al loro interno. Gli impianti devono essere dimensionati in modo da poter garantire le depressioni necessarie alla sicurezza e allo stesso tempo a garantire dei ricambi orari necessari alla pulizia (“lavaggio”) dell’aria del locale. Gli impianti di ventilazione dei locali dove c’è presenza di radioattività sono separati da quelli dove invece viene trattata aria non contaminata. Tali specifiche progettuali sono state richieste dalla committenza in base alla destinazione d’uso dei diversi locali.

Nella Tabella 2.5 vengono riassunti alcuni parametri caratteristici sulle condizioni termoigrometriche di ogni locale oltre ai ricambi d’aria previsti e alla presenza di aria

compressa o azoto tecnico. Il rinnovo d'aria espresso in volumi/ora è variabile in base all'attività svolta nel locale: se c'è un esperimento in corso con produzione di radioattività nel locale, non si considerano ricambi orari minimi, ma si aspira solo il quantitativo necessario a mantenere i locali in depressione, sono invece necessari rinnovi di qualche volume/ora in caso di presenza di personale nel locale (ad esempio se c'è necessità di manutenzione dei macchinari). Si aspira fino ad un massimo di 10 vol/h nel caso sia necessario effettuare un "lavaggio" del locale.

Locale	Pressione [Pa]	Temperatura [°C]	Umidità Relativa	Rinnovo aria	Aria Compressa	Azoto tecnico
A1	-60 ÷ 0	24	60 %	1 ÷ 5 vol/h	Sì	Sì
A2	0	N.C.	N.C.	N.C.	Sì	Sì
A2a	0	N.C.	N.C.	N.C.	-	-
A3	-40 ÷ 0	20 ÷ 24	N.C.	0.7 ÷ 10 vol/h	Sì	Sì
A4	-80 ÷ 0	24	45 %	0.5 ÷ 10 vol/h	Sì	Sì
A5	0	N.C.	N.C.	N.C.	-	-
A6	-80 ÷ 0	24	45 %	0.5 ÷ 10 vol/h	Sì	Sì
A7	-40 ÷ 0	20 ÷ 24	N.C.	0.7 ÷ 10 vol/h	Sì	Sì
A8a	0	20 ÷ 24	N.C.	N.C.	-	-
A8b	0	20 ÷ 24	N.C.	N.C.	-	-
A8c	0	20 ÷ 24	N.C.	N.C.	-	-
A9	0	N.C.	N.C.	N.C.	-	-
R1	-60 ÷ 0	24	N.C.	0.5 ÷ 10 vol/h	Predisp.	Predisp.
R2	-60 ÷ 0	24	N.C.	0.5 ÷ 10 vol/h	Predisp.	Predisp.
R3	-60 ÷ 0	24	N.C.	0.5 ÷ 10 vol/h	Predisp.	Predisp.
A13	0	N.C.	N.C.	N.C.	-	-
A15	0	N.C.	N.C.	N.C.	Sì	Sì

Tabella 2.5 - Dati progettuali dei locali al piano interrato

## 2.2.2. Criteri di dimensionamento impiantistico

Viste le richieste della committenza elencate nel paragrafo precedente, sono stati previsti da progetto i seguenti impianti:

### Centrali termica e frigorifera

La centrale termica a servizio degli impianti in oggetto è di tipo prefabbricato, con struttura in pannelli in lamiera di tipo sandwich (lamiera, isolamento termico, lamiera), in classe 0 di reazione al fuoco e REI 60 di resistenza al fuoco. È costituita da due caldaie ad acqua a condensazione, funzionanti a gas metano, con bruciatori modulanti da 210 kW cad., dimensionate entrambe per il 70% della potenza necessaria agli impianti, in modo da garantire una riserva di potenza a disposizione in caso di guasto e/o manutenzione. La centrale frigorifera è costituita essenzialmente da due gruppi refrigeratori d'acqua (uno dei quali di completa riserva) con condensazione ad aria, ventilatori assiali e compressori a vite semiermetici, fluido frigorifero R134 a, con una potenza di 600 kW frigoriferi cad. I refrigeratori (in versione super silenziosa) sono ubicati all'esterno dell'edificio, in apposita piazzola in prossimità della centrale termica.

### Centrale idrica

L'alimentazione della rete idrica (acqua di consumo) dell'edificio avviene dall'esistente centrale tecnologica, è prevista una nuova derivazione dal collettore "di smistamento" esistente con tubazione in acciaio inox AISI 316 L per il tratto a vista e in polietilene AD per fluidi in pressione PN16 per il tratto interrato dalla centrale tecnologica fino all'ingresso alla nuova centrale idrica, e da qui sono utilizzate nuovamente tubazioni inox per realizzare l'intera distribuzione. La centrale idrica è allestita nel vano tecnico A17 al piano primo, subito sopra la cyclotron room, dove sono collocate anche le unità di trattamento aria e gli estrattori, i sistemi di pompaggio primari acqua refrigerata e secondari dei vari circuiti della sottocentrale termofrigorifera. La centrale idrica è costituita essenzialmente da:

- Due filtri micrometrici autopulenti;
- Un collettore di smistamento (alimentazione impianti, utilizzi sanitari, riserve, etc.);
- Un addolcitore generale del tipo a doppia colonna;
- Due complessi di dosaggio di additivi;
- Un sistema di demineralizzazione del tipo ad osmosi inversa a letti misti per l'alimentazione sia degli impianti di raffreddamento apparati sia dei sistemi di

umidificazione ad acqua atomizzata a servizio delle UTA (due per ogni macchina, di cui uno di riserva);

- Un serbatoio di accumulo acqua demineralizzata;
- Elettropompe di circolazione;
- Due demineralizzatori a cartuccia a letti misti (acqua demineralizzata a 0,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a servizio dei circuiti di raffreddamento apparati.

Tutte le reti di distribuzione sono realizzate con tubazioni in acciaio inox AISI 316 L, e isolate termicamente (con finitura in lamierino di alluminio) per evitare la formazione di condensa.

### Sottocentrale termofrigorifera

La sottocentrale termofrigorifera a servizio dell'edificio si suddivide in 2 collettori primari: un collettore per il circuito freddo e uno per il circuito caldo. I due circuiti sono chiusi su se stessi e da ogni circuito partono gli spillamenti per portare l'acqua di raffreddamento o riscaldamento alle varie utenze.

### Raffreddamento

Dal collettore generale di raffreddamento l'acqua viene convogliata ai gruppi frigoriferi dove viene raffreddata a 8°C e mandata nel circuito secondario da dove partono gli stacchi che convogliano l'acqua fredda alle varie utenze, per le UTA sono predisposte tre elettropompe (delle quali una di riserva) ad inverter a portata variabile in serie che prendono l'acqua raffreddata e la convogliano in una sola tubazione alle UTA. La portata varia in base alla pressione nei tubi, che a sua volta varia per azione delle valvole nelle UTA che, in base alla temperatura che l'aria deve raggiungere all'interno della batteria di raffreddamento, si apre o si chiude in modo da far abbassare o alzare la pressione; l'inverter delle pompe legge queste variazioni di pressione e fa pompare più o meno acqua nel circuito. L'acqua del circuito, una volta uscita dalla batteria di raffreddamento della UTA torna nel collettore generale di raffreddamento dove viene nuovamente raffreddata e rimessa in circolo.

### Riscaldamento

Dal collettore generale di riscaldamento l'acqua viene convogliata alla caldaia dove viene riscaldata a 55°C e mandata nel circuito secondario da dove partono gli stacchi che convogliano l'acqua calda alle varie utenze, per le UTA sono predisposte tre elettropompe

(delle quali una di riserva) ad inverter a portata variabile in serie che prendono acqua calda e la convogliano in una sola tubazione alle UTA. La portata varia in base alla pressione nei tubi, che a sua volta varia per azione delle valvole nelle UTA che, in base alla temperatura che l'aria deve raggiungere all'interno delle batterie di pre e post-riscaldamento, si apre o si chiude in modo da far abbassare o alzare la pressione; l'inverter delle pompe legge queste variazioni di pressione e fa pompare più o meno acqua nel circuito. L'acqua del circuito, una volta uscita dalla batteria di raffreddamento della UTA torna nel collettore generale di riscaldamento dove viene nuovamente riscaldata e rimessa in circolo.

### Impianti di climatizzazione e raffreddamento apparati

Per la climatizzazione degli ambienti sono previsti circuiti separati per aree con presenza di radioattività ed aree con assenza di radioattività.

La climatizzazione del locale ciclotrone sarà effettuata con l'impiego di condizionatori di precisione con doppia batteria (quattro tubi), installati direttamente in ambiente lungo la parete divisoria verso i locali Bunker. I condizionatori previsti sono quattro, di cui uno di riserva; è comunque previsto il funzionamento contemporaneo di tutti e quattro i condizionatori in modo parzializzato, in caso di guasto ad uno di essi i rimanenti provvederanno (attraverso il sistema di regolazione) ad aumentare la potenza erogata in modo da mantenere la temperatura ambiente ai valori prefissati. Le temperature dell'acqua (demineralizzata a  $0,5 \mu S/cm$ ) di alimentazione delle batterie calde sarà mantenuta a  $50^{\circ}C$ , e quella refrigerata a  $15^{\circ}C$  per evitare la formazione di condensa.

La climatizzazione dei locali bunker SPES è effettuata con l'impiego di condizionatori con doppia batteria (quattro tubi) di precisione, installati nell'adiacente locale movimentazione orizzontale (A7), e collegati ai bunker attraverso condotti in acciaio inox di mandata e di ripresa dell'aria. Nel canale di ripresa subito fuori dal locale bunker è prevista l'installazione di un canister con filtro assoluto U15 e filtro molecolare a carboni attivi impregnato con idrossido di potassio. I condizionatori previsti sono due, di cui uno di riserva, è comunque previsto il funzionamento contemporaneo di tutti e due i condizionatori in modo parzializzato, in caso di guasto ad uno di essi il secondo provvederà (attraverso il sistema di regolazione) ad aumentare la potenza erogata in modo da mantenere la temperatura ambiente ai valori prefissati.

La climatizzazione del corridoio (A8) sarà effettuata con un condizionatore ambiente (ventilconvettore) del tipo a parete a doppia batteria (quattro tubi). La climatizzazione del locale Power Supply Room (A11) sarà effettuata con l'impiego di condizionatori di precisione con doppia batteria (quattro tubi), installati direttamente in ambiente lungo la parete esterna. I condizionatori previsti sono cinque, di cui uno di riserva; è comunque previsto il funzionamento contemporaneo di tutti e cinque i condizionatori in modo parzializzato, in caso di guasto ad uno di essi i rimanenti provvederanno (attraverso il sistema di regolazione) ad aumentare la potenza erogata in modo da mantenere la temperatura ambiente ai valori prefissati.

La climatizzazione della Control Room (A12) sarà effettuata con tre condizionatori ambiente (ventilconvettori) del tipo a parete a doppia batteria (quattro tubi).

Per il raffrescamento del locale UPS (con un carico generato in ambiente stimato di 4kW) sono previsti due impianti (uno a completa riserva) autonomi di raffrescamento, costituiti da condizionatori autonomi split, con unità interne da parete o da soffitto ed unità esterne moto condensanti collocate sulla terrazza di copertura. Per dare un minimo di rinnovo aria al locale UPS sono previsti due condotti in PVC (rivestiti con pannelli REI nell'attraversamento del locale tecnico per il raggiungimento della copertura) e idonee griglie di transito in materiale plastico.

### Impianti aeraulici

Sono previsti i seguenti impianti aeraulici, che verranno descritti più dettagliatamente nel capitolo seguente:

- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Cyclotron Room (A1);
- Impianto di depressurizzazione a servizio della Cyclotron Room (A1);
- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio del Bunker Isol (A4/A6);
- Impianto di ricircolazione aria a servizio dei Bunker Isol (A4/A6)
- Impianto di depressurizzazione a servizio del Bunker Isol (A4/A6);
- Impianto di depressurizzazione a servizio dei Bunker Isol (R1/R2/R3);
- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio del locale tecnico (A17);
- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Control Room (A12);
- Impianti di rinnovo forzato aria a servizio del secondo piano.

### Impianti di distribuzione gas tecnici

Sono previsti impianti di stoccaggio e distribuzione gas tecnici quali:

- Aria compressa;
- Azoto.

L'aria compressa per utilizzi di laboratorio viene prodotta da due compressori (del tipo rotativo a vite) posti nel locale tecnico A17. L'aria compressa prodotta (a 8 bar) viene distribuita attraverso reti in rame fino agli utilizzatori nei locali al piano interrato. La rete di distribuzione è realizzata in acciaio inossidabile AISI 316. La rete di distribuzione di azoto per utilizzi di laboratorio ha origine dall'apposito box di contenimento delle bombole situato in apposita area esterna (in prossimità della centrale termica) in aderenza alla sala A15. Il box è realizzato in lamiera di acciaio zincato e verniciato, ha porte anteriori per l'accesso alle bombole (chiudibili con chiave) con griglie di ventilazione sulla parte superiore ed inferiore, e ha dimensioni tali da consentire l'alloggiamento di due rampe da quattro bombole ciascuna, i riduttori di pressione ed il quadro di scambio automatico. Dal box bombole si diparte la rete di distribuzione in rame fino agli utilizzatori nei locali al piano interrato.

### Impianto idrosanitario e di scarico

L'acqua calda sanitaria viene prodotta localmente (all'interno del gruppo di servizi) tramite scaldacqua elettrico a piccolo accumulo (15 litri). La rete di distribuzione acqua fredda (dalla centrale idrica fino al servizio igienico) è realizzata in acciaio inox, mentre la distribuzione all'interno del servizio (acqua fredda e calda) è effettuata attraverso un collettore e tubazioni in multistrato. È prevista anche l'installazione di docce di emergenza con serbatoio di alimentazione e serbatoio di raccolta dello scarico (situato sotto il piatto doccia stesso), installate al piano interrato. Le reti di scarico sono realizzate in polietilene ad alta densità, mentre le colonne di scarico e ventilazione sono realizzate con tubazione in polietilene silenziato.

### Impianti elettrici a servizio dei termotecnici

Gli impianti elettrici completi a servizio degli impianti termotecnici sono composti da:

- quadro elettrico della centrale termica con relative linee a valle (potenza - comando - segnali - terra) fino alle varie utenze;

- quadro elettrico della sottocentrale termofrigorifera e trattamento aria con relative linee a valle (potenza - comando - segnali - terra) fino alle varie utenze;

Gli impianti elettrici generali dell'edificio sono, invece, composti da:

- linee di alimentazione di potenza (e terra) dei predetti quadri;
- linee di alimentazione dei condizionatori ambiente;
- linee di alimentazione dei condizionatori autonomi a servizio del locale UPS;
- linee di alimentazione dello scaldacqua dei servizi igienici;

### Regolazione automatica

A fianco dei quadri di potenza (o in apposita sezione dei quadri stessi) di cui al punto precedente sono installati dei quadretti contenenti le centraline a microprocessore a Controllo Digitale Diretto (D.D.C.) programmabili, che provvedono allo svolgimento delle seguenti funzioni:

- regolazione automatica dei vari circuiti, delle unità di trattamento aria, etc.;
- avviamento-arresto a tempo programmato delle varie utenze (caldaie, refrigeratori, pompe, unità T.A., etc.) che peraltro potranno essere azionate in modo manuale;
- segnalazioni di stato delle varie utenze;
- segnalazioni di situazioni di allarme (es. intervento protezione termica di un motore);
- procedure su evento (esempio: arresto ventilatori della U.T.A. in caso di allarme-incendio proveniente dall'impianto di rivelazione fumi).

Le varie centraline D.D.C. sono collegate per poter “colloquiare” fra loro e per poter essere collegate al sistema centralizzato computerizzato di supervisione; è inoltre prevista la fornitura di un terminale portatile dall'operatore.



### **3. Descrizione del sistema di aeroventilazione**

Nel precedente capitolo sono stati elencati tutti gli impianti richiesti per l'edificio SPES. In questo capitolo verranno descritti in maniera più dettagliata i sistemi di aeroventilazione, che si possono suddividere in:

- Impianto di rinnovo forzato aria;
- Impianto di depressurizzazione;
- Impianto di ricircolazione aria.

La funzione dell'impianto è quella di trattare l'aria in modo da garantire che l'aria in mandata nei locali abbia i requisiti termo-igrometrici richiesti, e inoltre che l'aria in aspirazione dai locali e immessa in atmosfera dalla ciminiera rispetti gli standard di sicurezza e quindi venga adeguatamente filtrata.

#### **3.1. Tecniche di trattamento aria**

Come già precedentemente accennato, l'aria nei locali dell'edificio SPES viene trattata prima di essere immessa nei locali e prima di essere espulsa in atmosfera.

Il "trattamento" vero e proprio dell'aria avviene in appositi impianti definiti, appunto, Unità di Trattamento dell'Aria (UTA).

Un'unità di trattamento dell'aria è un dispositivo che serve per cambiare le caratteristiche dell'aria ambientale e le adatta a degli standard produttivi; contiene l'insieme dei componenti deputati al trattamento del fluido termovettore aria, al fine di operare le necessarie trasformazioni termodinamiche per un'opportuna immissione in ambiente. Generalmente i componenti di una UTA si possono riassumere con il seguente elenco (Figura 3.1):

- un ventilatore di ripresa ed uno di mandata;
- sezioni filtranti sull'aria di ripresa e sull'aria esterna;
- una camera di miscela;

- tre serrande di regolazione;
- una batteria a tubi alettati per il pre-riscaldamento dell'aria;
- una batteria a tubi alettati per il raffreddamento e la deumidificazione dell'aria;
- una sezione di umidificazione e separatore di gocce;
- una batteria a tubi alettati per il post-riscaldamento dell'aria.

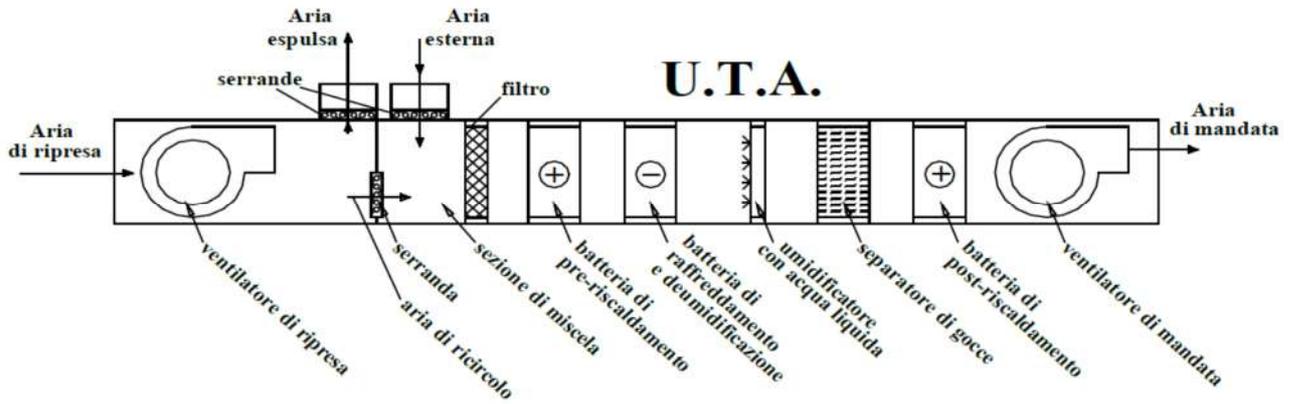


Figura 3.1 - Schema tipico di una UTA

Solitamente si fa un parziale ricircolo dell'aria ripresa dall'ambiente: per creare un circuito bilanciato, le unità di trattamento presentano quasi sempre anche ventilatori di ripresa. Qualora non vi fosse ricircolo, la ripresa dell'aria può essere realizzata o mediante estrattori (valvole di estrazione) localizzati in ambiente, deputati all'espulsione dell'aria esausta all'esterno, oppure mediante canalizzazione di espulsione e ventilatore centralizzato.

Le batterie di scambio termico sono scambiatori di calore, solitamente a tubi alettati, del tipo aria/acqua. La batteria di preriscaldamento è una batteria calda utilizzata soltanto nella climatizzazione invernale. Tale scambiatore opera un riscaldamento sensibile dell'aria di immissione, aumentando la temperatura di questa e mantenendo l'umidità specifica costante. In uscita, l'aria risulterà calda ma secca, quindi non ancora buona da immettere in ambiente. La batteria fredda viene utilizzata durante la climatizzazione estiva. Opera due trasformazioni: raffredda l'aria in ingresso e la deumidifica; in uscita dalla batteria l'aria non può essere ancora immessa. Il post-riscaldamento può essere attivato sia d'estate che d'inverno.

Le usuali batterie di scambio termico sono costituite da scambiatori di calore a contatto indiretto, in cui avviene un trasferimento di energia termica tra l'aria umida (veicolata da

un ventilatore) ed un mezzo, che può essere acqua in fase liquida, fluido refrigerante, o vapor d'acqua, con lo scopo di riscaldare, raffreddare e deumidificare l'aria.

La sezione umidificante è adoperata in regime invernale per umidificare l'aria in uscita dal pre-riscaldamento. L'obiettivo è aumentare l'umidità specifica della portata di aria trattata. Dopo la sezione di umidificazione, il separatore di gocce, solitamente realizzato in acciaio, separa dalla corrente di aria trattata le particelle di liquido rimaste in sospensione.

Alla fine del percorso, l'aria avrà assunto le caratteristiche termoigrometriche richieste per essere immessa nel locale.

Nei locali tecnici dell'edificio SPES, oltre al trattamento dell'aria, deve essere garantito anche un certo grado di depressurizzazione, gli impianti aeraulici previsti saranno quindi:

- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Cyclotron Room (A1);
- Impianto di depressurizzazione a servizio della Cyclotron Room (A1);
- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio del Bunker Isol (A4/A6);
- Impianto di ricircolazione aria a servizio dei Bunker Isol (A4/A6)
- Impianto di depressurizzazione a servizio del Bunker Isol (A4/A6);
- Impianto di depressurizzazione a servizio dei Bunker Isol (R1/R2/R3);
- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio del locale tecnico (A17);
- Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Control Room (A12);
- Impianti di rinnovo forzato aria a servizio del secondo piano.

### 3.1.1. Sistemi di depressurizzazione

Il piano interrato dell'edificio SPES ospita il ciclotrone e i locali bunker target. Questi e altri locali sono tenuti in depressione dagli impianti di depressurizzazione, in particolare:

- Locali A1, R1, R2, R3: pressione di -60 Pa
- Locali A3, A7: pressione di -40 Pa
- Locali A4, A6: pressione di -80 Pa
- Locali A2, A5, A8, A9, A13, A15: Pressione atmosferica

### Impianto di depressurizzazione a servizio della Cyclotron Room (A1)

Per il mantenimento dei valori di depressione del locale (-60 Pa) è prevista l'installazione di due testate ventilanti in parallelo (una di riserva) dotate di filtrazione assoluta (classe di filtrazione U15 più filtri a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio) in espulsione.

La portata d'aria di espulsione viene controllata dal sistema di regolazione automatica attraverso la modulazione dell'inverter dei ventilatori con controllo tramite le sonde di pressione in ambiente e nei locali adiacenti.

La sezione di ripresa/espulsione aria (EXP 02 e EXP 03) è costituita essenzialmente da:

- Sezione di ripresa aria con serranda a tenuta;
- Sezione di filtrazione assoluta – classe di efficienza U15;
- Sezione di filtrazione - filtri molecolari a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio;
- Sezione ventilante di ripresa/espulsione aria (doppio ventilatore) Plug-fan con inverter;
- Sezione plenum di espulsione con serranda a tenuta.

La sezione ventilante è inoltre adatta a sopportare le differenti pressioni richieste (-60 Pa rispetto alla pressione atmosferica).

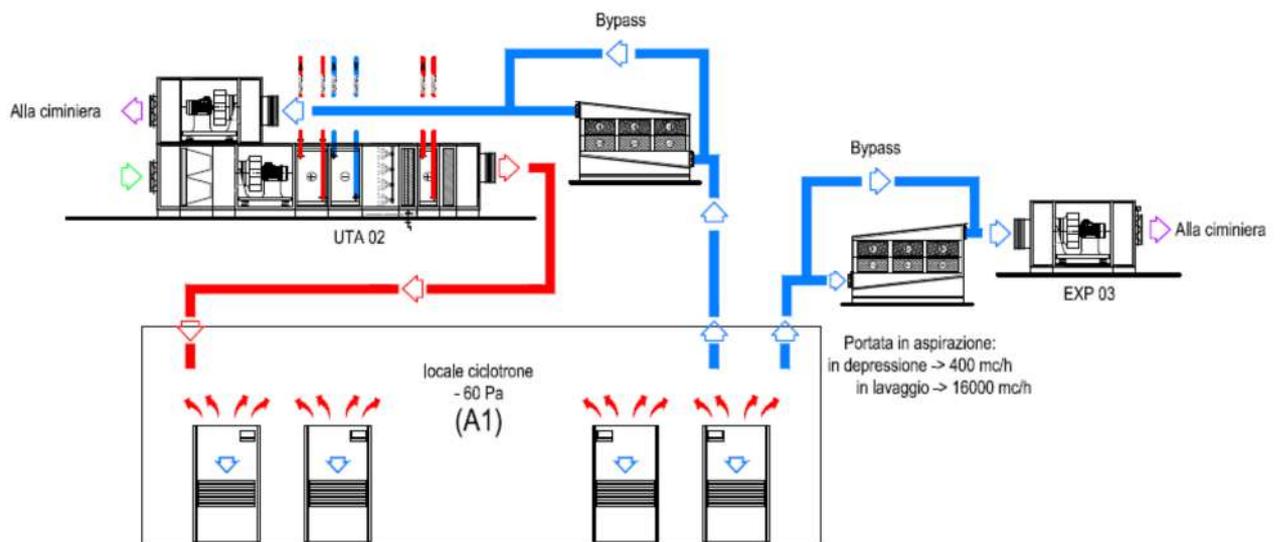


Figura 3.2 - Schema dell'impianto a servizio del locale ciclotron

### Impianto di depressurizzazione a servizio dei Bunker Isol (A4/A6)

Per il mantenimento dei valori di depressione del locale (-80 Pa) è stata prevista l'installazione di due testate ventilanti in parallelo (una di riserva) dotate di filtrazione assoluta (classe di filtrazione U15 più filtri a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio) in espulsione.

La portata d'aria di espulsione viene controllata dal sistema di regolazione automatica attraverso la modulazione dell'inverter dei ventilatori con controllo tramite le sonde di pressione in ambiente e nei locali adiacenti.

La sezione di ripresa/espulsione aria (EXP 01/EXP 02) è costituita essenzialmente da:

- Sezione di ripresa aria con serranda a tenuta;
- Sezione di filtrazione assoluta – classe di efficienza U15;
- Sezione di filtrazione - filtri molecolari a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio;
- Sezione ventilante di ripresa/espulsione aria (doppio ventilatore) Plug-fan con inverter, in acciaio inox;
- Sezione plenum di espulsione con serranda a tenuta.

La sezione ventilante è inoltre adatta a sopportare le differenti pressioni richieste (-80 Pa rispetto alla pressione atmosferica).

La portata d'aria di estrazione dal locale (A4/A6) nelle condizioni di funzionamento con porta di accesso chiusa viene garantita da: una parte d'aria di "trafilamento" attraverso la porta di accesso al locale (benché a tenuta); una parte (regolabile con flange tarate) attraverso un condotto (con conformazione a "collo d'oca") diametro 100 mm installato sulla parete, in modo da regolare la depressione tra i locali A4/A6 (con depressione -80 Pa), A3/A7 in cui l'aria viene transitata da A2/A8 a A4/A6 (con depressione -40 Pa), e A2A8 in cui l'aria viene immessa (sempre in pressione positiva verso i locali s.d.).

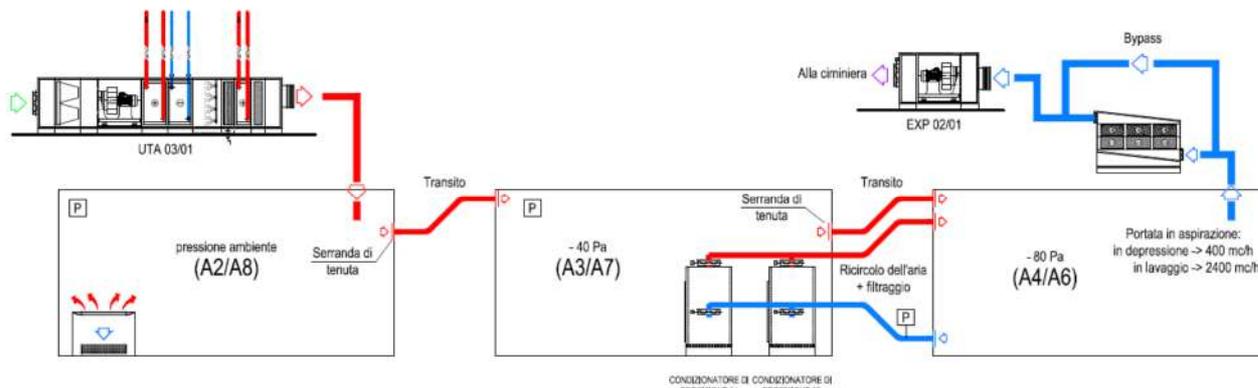


Figura 3.3 - Schema dell'impianto a servizio dei locali bunker A4 e A6

### Impianto di depressurizzazione a servizio dei Bunker Isol (R1/R2/R3)

Per il mantenimento dei valori di depressione del locale (-60 Pa) è stata prevista l'installazione di due testate ventilanti in parallelo (una di riserva) dotate filtrazione assoluta (classe di filtrazione U15 più filtri a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio) in espulsione.

La portata d'aria di espulsione viene controllata dal sistema di regolazione automatica attraverso la modulazione dell'inverter dei ventilatori con controllo tramite le sonde di pressione in ambiente e nei locali adiacenti.

La sezione di ripresa/espulsione aria (EXP 04/EXP 05/EXP 06) è costituita essenzialmente da:

- Sezione di ripresa aria con serranda a tenuta;
- Sezione di filtrazione assoluta – classe di efficienza U15;
- Sezione di filtrazione - filtri molecolari a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio;
- Sezione ventilante di ripresa/espulsione aria (doppio ventilatore) Plug-fan con inverter, in acciaio inox;
- Sezione plenum di espulsione con serranda a tenuta.

La sezione ventilante è inoltre adatta a sopportare le differenti pressioni richieste (-60 Pa rispetto alla pressione atmosferica).

La portata d'aria di estrazione dal locale (R1/R2/R3) nelle condizioni di funzionamento con porta di accesso chiusa viene garantita da: una parte d'aria di "trafilamento" attraverso la porta di accesso al locale (benché a tenuta); una parte (regolabile con flange tarate)

attraverso un condotto (con conformazione a “collo d’oca”) diametro 100 mm installato sulla parete, in modo da permettere il passaggio dell’aria.

Per i bunker R1, R2 e R3 non è previsto il rinnovo forzato dell’aria né il sistema di ricircolo dell’aria.

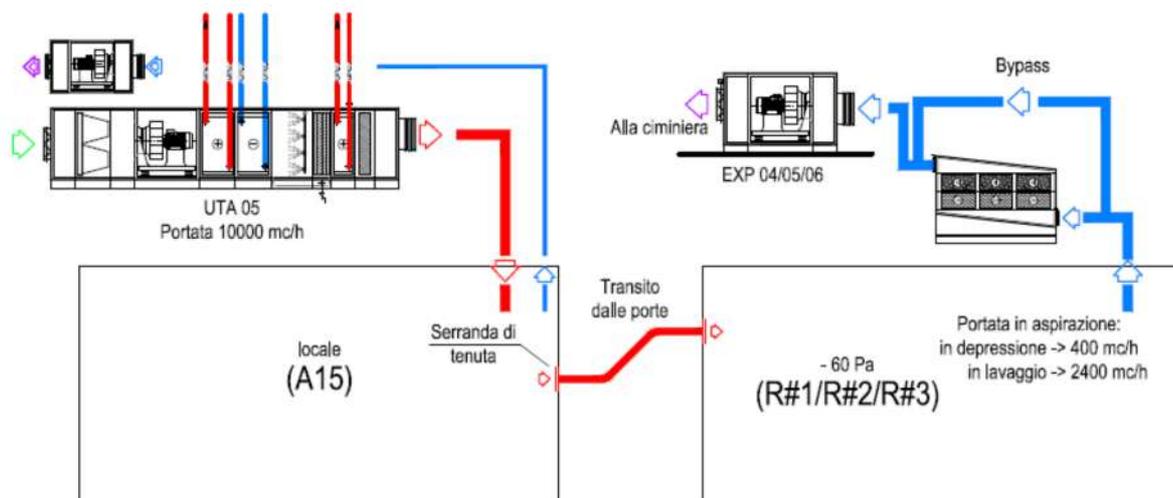


Figura 3.4 - Schema impianto a servizio dei bunker R1, R2 e R3

### 3.1.2. Unità di Trattamento Aria (UTA)

Nel paragrafo 3.1 è stata data una descrizione generica di come funzionano le Unità di Trattamento Aria (UTA), di seguito vengono descritte nel dettaglio gli impianti scelti per i diversi locali dell’edificio SPES. In particolare oltre alle UTA vengono descritti gli impianti di ricircolo dell’aria necessari per alcuni locali.

Nel paragrafo 3.2.2 verranno, invece, descritte le logiche di funzionamento delle UTA, definite in base ai vari parametri ambientali e tecnici di progetto (temperatura, attività svolte nel locale...).

### Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Cyclotron Room (A1)

L'unità di trattamento aria (UTA 02) a servizio della cyclotron room è ubicata in apposita area nel vano tecnico (A17) al piano primo. L'aria viene aspirata dall'esterno del fabbricato da una griglia posizionata in copertura, filtrata in macchina con adeguati filtri, trattata termoigrometricamente e immessa in ambiente. Viene poi ripresa ed espulsa all'esterno dal camino di espulsione con una griglia collocata sulla copertura dell'edificio, tale camino di espulsione è stata posta ad adeguata distanza ed altezza dalle griglie di presa aria in modo da impedire alcuna possibilità di cortocircuitazione tra l'aria prelevata dall'esterno e l'aria espulsa dai vari impianti.

L'aria proveniente dal locale A1, è filtrata con filtri assoluti U15 e filtri molecolari a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio, contenuti entro appositi canister, che consentano la sostituzione delle celle filtranti in sicurezza, senza venire a diretto contatto con il filtro.

La filtrazione dell'aria di mandata consente di immettere negli ambienti aria trattata e pulita. La UTA è del tipo con pannellatura sandwich con le superfici esterne in acciaio zincato verniciato e quelle interne in acciaio inox AISI 316L, perfettamente pulibili; l'isolamento termico in poliuretano espanso è posto all'interno delle due pareti in lamiera, e pertanto non a contatto con l'aria. Lo spessore dei pannelli è di 60 mm minimo ed è inoltre adatto a sopportare le differenti pressioni richieste (-60 Pa rispetto alla pressione atmosferica). La UTA è dotata di doppi ventilatori (uno di riserva) del tipo plug-fan sia di mandata che di ripresa.

Le canalizzazioni di aspirazione esterna fino alle UTA sono in poliuretano espanso rigido rivestito con una lamina di alluminio goffrata, le canalizzazioni di mandata dell'aria sono in acciaio zincato non saldato fino ai tratti interni ai muri, che sono in acciaio inox AISI 304 con giunzioni saldate; i tratti seguenti in uscita dai locali e fino ai filtri, sono in acciaio zincato con giunzioni saldate. Le tubazioni dai filtri fino alla ciminiera sono in acciaio zincato non saldato, con giunzioni a tenuta a bicchiere.

E' stata prevista la coibentazione (esterna ai canali), per evitare dispersioni termiche e/o formazione di condensa, delle canalizzazioni di mandata, ripresa e presa aria esterna poste all'interno del vano tecnico, eseguita con materassino di lana di vetro e finitura in lamierino di alluminio.

Anche le tubazioni di alimentazione batterie calde e fredda, come del resto tutte le valvole, gli accessori e le elettropompe sono isolate termicamente, in osservanza della Legge 10/91.

L'umidificazione dell'aria avviene mediante l'impiego di umidificatori ad acqua nebulizzata ad alta pressione (con riserva); per l'alimentazione di tutti i sistemi di umidificazione dell'aria viene usata acqua demineralizzata osmotizzata.

L'unità di trattamento aria (UTA 02) è costituita essenzialmente da:

#### *Sezione di mandata aria*

- Sezione di presa aria esterna con serranda a tenuta;
- Sezione di filtrazione a tasche morbide – classe di efficienza F9;
- Sezione ventilante di mandata (doppio ventilatore) Plug-fan con inverter, in acciaio inox;
- Batteria di preriscaldamento, in acciaio inox;
- Batteria di raffreddamento, in acciaio inox;
- Sezione di umidificazione, ad acqua nebulizzata ad alta pressione;
- Separatore di gocce, in acciaio inox;
- Batteria di postriscaldamento, in acciaio inox;
- Sezione di filtrazione assoluta – classe di efficienza H14;
- Sezione plenum di mandata.

#### *Sezione di ripresa aria/espulsione*

- Sezione plenum di ripresa aria;
- Sezione di filtrazione assoluta – classe di filtrazione U15;
- Sezione di filtrazione – filtri molecolari a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio;
- Sezione ventilante di ripresa/espulsione aria (doppio ventilatore) Plu-fan con inverter, in acciaio inox;
- Sezione plenum di espulsione con serranda a tenuta.

L'aria viene immessa nel locale A1 attraverso apposite griglie inserite in un condotto collocato a soffitto del locale.

Gli attraversamenti delle pareti e/o soffitto con canalizzazioni sono state realizzate a “collo d’oca”, in modo da contenere le radiazioni; nelle canalizzazioni sia di mandata che di ripresa sono state inoltre installate idonee serrande a tenuta.

E’ prevista anche la funzione lavaggio dei locali. La portata d’aria del ventilatore nella modalità di “lavaggio” dell’ambiente si porta a 10 vol/h ambiente, con una velocità dell’aria nell’attraversamento della porta del locale pari a circa 0,5 m/sec. Durante la modalità lavaggio non ci sono esperimenti in corso, l’aria quindi è pulita; data la portata consistente necessaria durante il lavaggio, l’aria non passa per i filtri ma per un bypass, andando direttamente dall’estrattore in ciminiera.

#### Impianto di rinnovo forzato aria a servizio dei bunker Isol (A4/A6)

L’unità di trattamento aria (UTA 01) è ubicata in apposita area nel vano tecnico (A17) al piano primo accanto alla UTA02. L’aria viene aspirata dall’esterno del fabbricato da una griglia posizionata in copertura, filtrata in macchina con adeguati filtri, trattata termoigrometricamente, immessa in ambiente nel locale A8, transitata attraverso il locale A7 e ripresa ed espulsa all’esterno dalla testata ventilante di ripresa/espulsione EXP 01.

L’aria viene aspirata dall’esterno del fabbricato da una griglia posizionata in copertura, filtrata in macchina con adeguati filtri, trattata termoigrometricamente e immessa in ambiente. Viene poi ripresa ed espulsa all’esterno dal camino di espulsione con una griglia collocata sulla copertura dell’edificio, tale camino di espulsione è stata posta ad adeguata distanza dalle griglie di presa aria in modo da impedire alcuna possibilità di cortocircuitazione tra l’aria prelevata dall’esterno e l’aria espulsa dai vari impianti.

La filtrazione assoluta dell’aria di mandata consente di immettere negli ambienti aria trattata e pulita. La UTA è del tipo con pannellatura sandwich con le superfici esterne in acciaio zincato verniciato e quelle interne in acciaio inox AISI 316L, perfettamente pulibili; l’isolamento termico in poliuretano espanso è stato posto all’interno delle due pareti in lamiera, e pertanto non a contatto con l’aria. Lo spessore dei pannelli è di 60 mm minimo, è inoltre adatto a sopportare le differenti pressioni richieste (-80 Pa rispetto alla pressione atmosferica).

La UTA è dotata di doppi ventilatori (uno di riserva) del tipo plug-fan.

Le canalizzazioni di aspirazione esterna fino alle UTA sono in poliuretano espanso rigido rivestito con una lamina di alluminio gofrata, le canalizzazioni di mandata dell'aria sono in acciaio zincato non saldato fino ai tratti interni ai muri, che sono in acciaio inox AISI 304 con giunzioni saldate; i tratti seguenti in uscita dai locali e fino ai filtri, sono in acciaio zincato con giunzioni saldate. Le tubazioni dai filtri fino alla ciminiera sono in acciaio zincato non saldato, con giunzioni a tenuta a bicchiere.

E' stata prevista la coibentazione (esterna ai canali), per evitare dispersioni termiche e/o formazione di condensa, delle canalizzazioni di mandata e presa aria esterna poste all'interno del vano tecnico, eseguita con materassino di lana di vetro e finitura in lamierino di alluminio.

Anche le tubazioni di alimentazione batterie calde e fredda, come del resto tutte le valvole, gli accessori e le elettropompe sono isolate termicamente, in osservanza della Legge 10/91.

L'umidificazione dell'aria avviene mediante l'impiego di umidificatori ad acqua nebulizzata ad alta pressione; per l'alimentazione di tutti i sistemi di umidificazione dell'aria viene usata acqua demineralizzata osmotizzata.

L'unità di trattamento aria (UTA 01) è costituita essenzialmente da:

- Sezione di presa aria esterna con serranda a tenuta;
- Sezione di filtrazione a tasche morbide – classe di efficienza F9;
- Sezione ventilante di mandata (doppio ventilatore) Plu-fan con inverter, in acciaio inox;
- Batteria di preriscaldamento, in acciaio inox;
- Batteria di raffreddamento, in acciaio inox;
- Sezione di umidificazione, ad acqua nebulizzata ad alta pressione;
- Separatore di gocce, in acciaio inox;
- Batteria di postriscaldamento, in acciaio inox;
- Sezione di filtrazione assoluta – classe di efficienza H14;
- Sezione plenum di mandata.

Gli attraversamenti delle pareti e/o soffitto con canalizzazioni sono state realizzate a “collo d'oca”, in modo da contenere le radiazioni; nelle canalizzazioni sia di mandata che di ripresa sono state inoltre installate idonee serrande a tenuta.

E' prevista anche la funzione lavaggio dei locali. La portata d'aria del ventilatore nella modalità di "lavaggio" dell'ambiente si porta a 10 vol/h ambiente, con una velocità dell'aria nell'attraversamento della porta del locale pari a circa 0,5 m/sec. in modo da evitare moti turbolenti che potrebbero portare a reflussi d'aria dal locale Bunker Isol al locale A7. Durante la modalità lavaggio non ci sono esperimenti in corso, l'aria quindi è pulita; data la portata consistente necessaria durante il lavaggio, l'aria non passa per i filtri ma per un bypass, andando direttamente dall'estrattore in ciminiera.

#### Impianto di ricircolazione aria a servizio dei Bunker Isol (A4/A6)

Nei bunker A4 e A6 sono previste soltanto le bocchette di aspirazione dell'aria. La mandata viene garantita dal transito dell'aria attraverso 2 serrande di tenuta poste una tra il locale ingresso del laboratorio (a pressione atmosferica) e il locale di contenimento (pre-bunker A3, A7), l'altra tra il pre-bunker e il bunker. Il locale pre-bunker ospita anche i filtri e condizionatori di precisione che operano il ricircolo dell'aria del bunker: l'aria all'interno del bunker viene aspirata, filtrata, controllata in temperatura e infine re-immessa nel bunker. La temperatura dell'acqua nei condizionatori di precisione avrà una temperatura tale da non creare condensa né nella tubazioni né nelle macchine.

#### Impianto di rinnovo forzato aria a servizio del locale tecnico (A17/VT2)

Per il "lavaggio" dell'aria del locale tecnico è stato previsto un sistema di ricambio dell'aria ambiente costituito da due ventilatori (uno di riserva) di ripresa/espulsione e due griglie di presa aria esterna (provviste di serranda a tenuta) posizionate ai lati opposti del locale tecnico. In caso di rilevamento di valori di temperatura in ambiente superiori a quelli di setpoint, il sistema di regolazione attiva i ventilatori e apre le serrande di presa aria, effettuando un "lavaggio" del locale con un flusso di 5 vol/h di aria esterna, fino al ripristino delle condizioni di sicurezza.

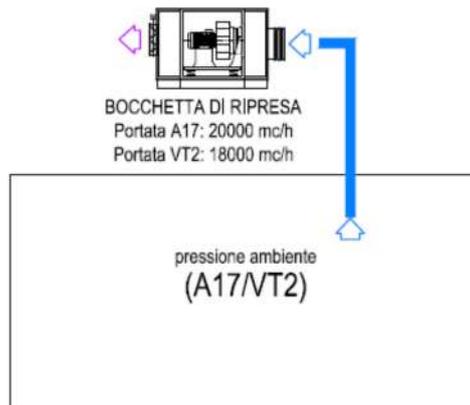


Figura 3.5 - Schema impianto a servizio dei locali tecnici A17/VT2

### Impianto di rinnovo forzato aria a servizio della Control Room (A12)

Per il rinnovo forzato dell'aria nella sala Control Room, dove è prevista la presenza continuativa di persone, è stato previsto un impianto con unità di trattamento aria di tipo piatto, da controsoffitto, a pompa di calore, con recuperatore di calore, installata a soffitto del locale stesso.

L'aria di rinnovo viene immessa in ambiente tramite condotte in lamiera di acciaio zincato (poste in controsoffitto) e diffusori ad alta induzione, mentre la ripresa viene effettuata (sempre attraverso canalizzazioni in lamiera di acciaio zincato collocate in controsoffitto) da una griglia posta direttamente in ambiente e da una valvola anemostatica nel servizio igienico, così da mantenerlo in depressione ed evitare la propagazione di odori. Pertanto l'aria aspirata non va in ciminiera ma viene direttamente espulsa all'esterno.

Le canalizzazioni di mandata e di espulsione sono state opportunamente coibentate.

### Impianti di rinnovo forzato aria a servizio del secondo piano

Al secondo piano saranno ubicati uffici e laboratori.

Verranno installate 3 UTA (05b, 06, 07). L'aria viene aspirata dall'esterno del fabbricato da una griglia posizionata in copertura, filtrata in macchina con adeguati filtri, trattata termoigrometricamente e immessa negli ambienti; viene in seguito ripresa ed espulsa all'esterno dalla testata ventilante di ripresa/espulsione.

L'aria viene aspirata dall'esterno del fabbricato da una griglia posizionata in copertura, filtrata in macchina con adeguati filtri, trattata termoigrometricamente e immessa in

ambiente. Viene poi ripresa ed espulsa all'esterno dal camino di espulsione con una griglia collocata sulla copertura dell'edificio, tale camino di espulsione è stata posta ad adeguata distanza dalle griglie di presa aria in modo da impedire alcuna possibilità di cortocircuitazione tra l'aria prelevata dall'esterno e l'aria espulsa dai vari impianti.

La filtrazione dell'aria di mandata consente di immettere negli ambienti aria trattata e pulita. La UTA è del tipo con pannellatura sandwich con le superfici esterne in acciaio zincato verniciato e quelle interne in acciaio inox AISI 316L, perfettamente pulibili; l'isolamento termico in poliuretano espanso è stato posto all'interno delle due pareti in lamiera, e pertanto non a contatto con l'aria. Lo spessore dei pannelli è di 60 mm minimo, è inoltre adatto a sopportare le differenti pressioni richieste (-80 Pa rispetto alla pressione atmosferica).

La UTA è dotata di doppi ventilatori (uno di riserva) del tipo plug-fan.

E' stata prevista la coibentazione (esterna ai canali), per evitare dispersioni termiche e/o formazione di condensa, delle canalizzazioni di mandata e presa aria esterna poste all'interno del vano tecnico, eseguita con materassino di lana di vetro e finitura in lamierino di alluminio.

Anche le tubazioni di alimentazione batterie calde e fredda, come del resto tutte le valvole, gli accessori e le elettropompe sono isolate termicamente, in osservanza della Legge 10/91.

L'umidificazione dell'aria avviene mediante l'impiego di umidificatori ad acqua nebulizzata ad alta pressione; per l'alimentazione di tutti i sistemi di umidificazione dell'aria viene usata acqua demineralizzata. (16)

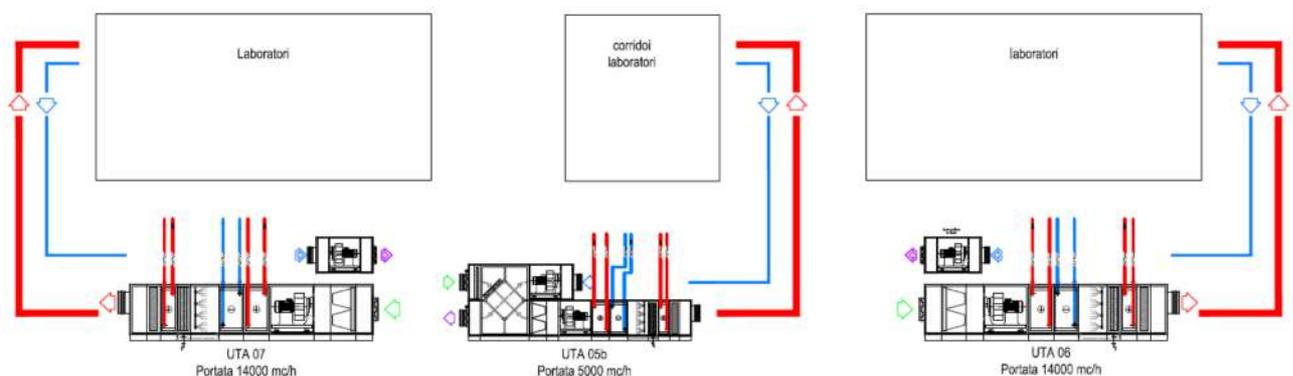


Figura 3.6 - Schema impianti di trattamento aria per i locali al secondo piano

### 3.1.3. Sistemi di filtrazione dell'aria

I filtri vengono installati sia in mandata dell'aria con lo scopo di filtrare l'aria presa dall'esterno, che in ripresa, in quanto, come si è già detto, nelle sale sperimentali l'aria sarà potenzialmente attivata, di conseguenza i filtri hanno lo scopo di bloccare il particolato radioattivo presente nell'aria aspirata.

I filtri installati sono di 2 tipi:

- Filtrazione assoluta – classe di efficienza U15;
- Filtrazione - filtri molecolari a carbone attivo impregnato con idrossido di potassio.

#### Filtrazione assoluta

I filtri assoluti sono composti da foglietti filtranti di microfibre assemblati in più strati, separati da setti in alluminio. I foglietti filtranti in microfibra hanno il compito di bloccare le particelle solide inquinanti (o particolato) presenti nella corrente fluida da trattare.

I filtri HEPA (*High Efficiency Particulate Air filter*) e i filtri ULPA (*Ultra Low Penetration Air*) fanno parte della categoria dei cosiddetti "filtri assoluti". Il termine "filtro assoluto" è giustificato dal fatto che i filtri HEPA e ULPA hanno una elevata efficienza di filtrazione. In particolare i filtri ULPA presentano un'efficienza di filtrazione tra il 99,9995% (U15) e il 99,999995% (U17).

Vengono classificati in base all'efficienza di filtrazione delle particelle di 0.3  $\mu\text{m}$ .

Classe del filtro	Valore integrale		Valore locale	
	Efficienza (%)	Penetrazione (%)	Efficienza (%)	Penetrazione (%)
<b>H 10</b>	85	15	---	---
<b>H 11</b>	95	5	---	---
<b>H 12</b>	99,5	0,5	---	---
<b>H 13</b>	99,95	0,05	99,75	0,25
<b>H 14</b>	99,995	0,005	99,975	0,025
<b>U 15</b>	99,999 5	0,000 5	99,997 5	0,002 5
<b>U 16</b>	99,999 95	0,000 05	99,999 75	0,000 25
<b>U 17</b>	99,999 995	0,000 005	99,999 9	0,000 1

Figura 3.7 - Classi di efficienza di filtrazione

### Filtrazione a carboni attivi

La filtrazione sui carboni attivi è una tecnologia di depurazione dell'aria per mezzo della quale una corrente gassosa viene privata degli elementi inquinanti facendola passare attraverso un filtro che contiene carbone attivo. L'operazione si basa sulla capacità del carbone attivo di adsorbire, grazie alla sua porosità, la maggior parte delle sostanze organiche e sulla conseguente possibilità di estrarle utilizzando un "veicolo" che generalmente è vapore o azoto.

L'adsorbimento è un fenomeno prevalentemente fisico, in cui le molecole delle sostanze adsorbite vengono trattenute sul carbone da forze deboli tipo Van der Waals. Al contempo vi è una parziale deposizione delle particelle colloidali sulla superficie del carbone. Mediante il trattamento a carboni attivi la corrente aeriforme, contenente inquinanti aerodispersi, viene aspirata da uno o più ventilatori, a valle dei quali può essere installato un filtro a protezione del carbone e una batteria di condizionamento (per ottimizzare umidità e temperatura). Il carbone è contenuto negli assorbitori, di cui almeno uno in fase di rigenerazione. L'aeriforme inquinato, attraversando il carbone, deposita gli organici e viene direttamente espulso depurato al camino.

Il carbone esausto deve essere estratto dai filtri per poi essere smaltito in idonea discarica.

I filtri assoluti di classe U15 hanno il telaio in lamiera d'acciaio, con sigillante poliuretano bicomponente e guarnizione di tenuta colata (senza giunzioni).

I filtri a carboni attivi sono invece in lamiera d'acciaio saldata a tenuta stagna, protetta da verniciatura epossidica a forno, pannello frontale asportabile, con guarnizione di tenuta perimetrale e chiusura mediante tiranti ribaltabili con serraggio a volantino.

## **3.2. Schemi di funzionamento degli impianti**

Gli impianti a servizio dell'edificio SPES devono seguire delle precise logiche di funzionamento, in quanto in base alle diverse attività che possono svolgersi nei locali (in particolare quelli al piano interrato), sarà necessario un diverso apporto di ventilazione.

Le macchine vengono quindi settate per 3 principali schemi di funzionamento:

- Esperimento in corso: il ciclotrone è a regime e di conseguenza sono in funzione anche 2 bunker (in ogni caso almeno uno). Ne consegue che questi 3 locali saranno in depressione.
- Allestimento esperimento: nel locale ciclotrone c'è presenza di personale, quindi il locale sarà a pressione atmosferica con tutti i ventilatori in funzione in modo da garantire i ricambi d'aria necessari.
- Lavaggio aria locali: al termine di un esperimento si impostano gli impianti in maniera da garantire un ricambio di 10 volumi/ora in modo da “pulire” il più possibile l'aria dalla contaminazione.

Al fine di poter impostare i macchinari su tutti e 3 gli schemi di funzionamento, sono necessarie delle prove per settare tutte le UTA per i vari schemi.

Tali prove sono tutt'ora *in progress*, verranno riportate quindi le metodologie generali di settaggio, le prove delle UTA 1, 2 e 3 e le logiche di funzionamento di tutte le UTA.

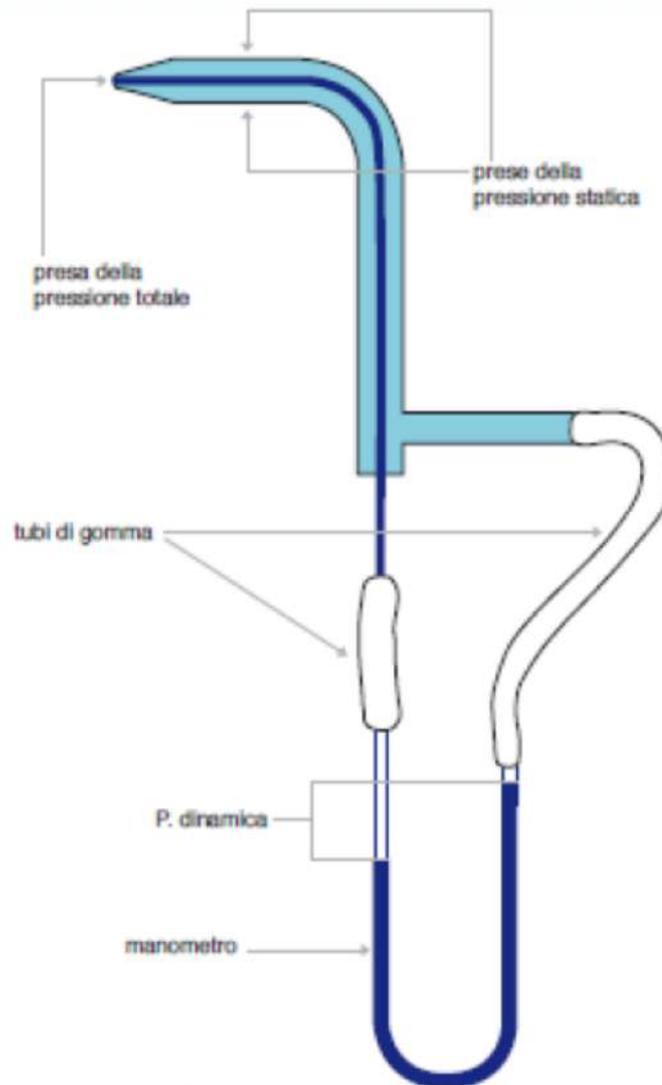
### 3.2.1. Metodo di settaggio delle UTA

Le UTA vanno settate in modo da garantire le portate richieste in base alla destinazione d'uso e all'attività prevista nella stanza (maggiori dettagli nel paragrafo successivo). Per definire dei valori di set point vengono eseguite delle prove dirette sui macchinari.

Tali prove consistono in letture dirette delle pressioni dell'aria nei canali di ventilazione e in letture tramite le sonde interne alle macchine.

Le prove dirette vengono eseguite con il tubo di Pitot.

### Rappresentazione schematica del tubo di Pitot



Il tubo di Pitot è costituito da due tubi coassiali non in comunicazione tra loro. Il tubo centrale, orientato verso la direzione del flusso d'aria, è sottoposto alla Pressione totale, mentre i fori radiali in comunicazione con il tubo esterno sono esposti alla sola pressione statica. I due tubi sono collegati per mezzo di raccordi di gomma alle prese di Pressione di un manometro differenziale e con questo si rileva la differenza tra Pressione totale e Pressione statica.

Dalla differenza tra Pressione totale e Pressione statica si ottiene la Pressione dinamica, dalla quale si può calcolare la velocità dell'aria all'interno del canale. La portata è data da:

$$Q[m^3 / h] = V[m / s] \times S[m^2] \times 3600$$

La portata dipende solo dalla velocità dell'aria nell'ipotesi di densità costante e supponendo nota l'eventuale presenza di altri gas o vapori.

La prima fase del settaggio della macchina consiste in prove di lettura diretta della pressione con il tubo di Pitot: vengono praticati dei fori alle canalizzazioni sui quali vengono eseguite misure di pressione ripetute, un software dedicato calcola la velocità del flusso da cui, nota la sezione, si ricava la portata. La media aritmetica dei valori della portata ottenuti dalle misure ripetute sarà il valore di riferimento. Si deve trovare un valore di portata che abbia all'incirca un 10% di scarto con quello richiesto da progetto. Una volta trovato il valore più coerente con quello richiesto, si leggono i valori registrati dalla sonda interna alla macchina, in particolare la potenza e la frequenza degli inverter che azionano i motori dei ventilatori. Tali valori saranno registrati nel software di funzionamento della macchina come valori di set point; avendo le singole macchine diverse modalità di funzionamento (a seconda dell'attività svolta nel locale servito dalla macchina) è necessario registrare i relativi parametri per tutte le modalità previste. (17)

Le prove di settaggio sono state, per il momento, effettuate solo per le UTA 1, 2 e 3.

Per ogni foro praticato sulla tubazione (Figura 3.8) viene inserito il tubo Pitot a diverse profondità, in modo da registrare un valore di portata circa ogni 15 cm. Figura 3.8



Figura 3.8 - Fori sulle canalizzazioni per settaggio UTA

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i dati registrati durante le prove.

UTA 1	MANDATA																			
Situazione di allestimento esperimento																				
Portata richiesta da progetto:		1200	[mc/h]																	
N° ventilatori in funzione:		1																		
Sezione	800x350	[mmq]								Misure con Tubo Pitot:										
SET 1				SET 2				MISURA 1				MISURA 2								
Q=	2288	[mc/h]		Q=	1647	[mc/h]		3629	2722	2822		2485	1940	1755						
v=	2,27	[m/s]		v=	1,64	[m/s]		3024	2117	2218		1907	1766	1912						
P=	8,8	[Pa]		P=	5,6	[Pa]		2318	1714	1915		1568	1355	1434						
Frequenza=	50	[Hz]		Frequenza=	40	[Hz]		2016	1512	1814		1657	1140	1416						
								2218	1714	2419		1704	1132	1534						
Set point macchina								Qmedia= 2278,133				Qmedia= 1647								
Potenza=	80	%																		
Pr. Statica=	10	[Pa]																		
Frequenza=	40	[Hz]																		

Figura 3.9 - Mandata UTA 1 - Allestimento esperimento

In Figura 3.9 vengono riportati i valori letti dal tubo Pitot e i valori di settaggio della macchina (potenza, pressione statica e frequenza) della UTA 1 in modalità “allestimento esperimento”.

UTA 1		MANDATA							
Situazione di lavaggio locale									
Portata richiesta da progetto:		2400		[mc/h]					
N° ventilatori in funzione:		2							
Sezione	800x350	[mmq]						Misure con Tubo Pitot:	
SET 1				MISURA 1					
Q=	2431	[mc/h]		4040	3087	2749			
v=	2,38	[m/s]		3142	2150	2630			
P=	9,3	[Pa]		2567	1933	2235			
Frequenza=	50	[Hz]		2280	1791	2026			
				2055	1906	1973			
Set point macchina				Qmedia=		2437,6			
Potenza=	100	%							
Pr. Statica=	23,5	[Pa]							
Frequenza=	50	[Hz]							

Figura 3.10 - Mandata UTA 1 - Lavaggio locale

In Figura 3.10 vengono riportati i valori letti dal tubo Pitot e i valori di settaggio della macchina (potenza, pressione statica e frequenza) della UTA 1 in modalità “lavaggio locale”.

UTA 2		MANDATA													
Situazione di allestimento esperimento															
Portata richiesta da progetto:		8000		[mc/h]											
N° ventilatori in funzione:		1													
Sezione	1200x500	[mmq]													
SET 1		SET 2		MISURA 1				MISURA 2							
Q=	11144	[mc/h]		Q=	9697	[mc/h]		12944	11806	11725	11731	10720	10546	10459	9928
v=	5,17	[m/s]		v=	4,49	[m/s]		12656	11960	11717	11569	10173	10569	10433	10048
P=	17	[Pa]		P=	12	[Pa]		12195	11860	11439	12211	9897	10477	11134	10813
Frequenza=	45	[Hz]		Frequenza=	40	[Hz]		11810	11768	12567	12489	9020	10233	10643	11259
								11538	11713	12826	10536	9562	10208	9394	11265
								10679	7779	7582	5847	6870	5993	7571	5955
Set point macchina				Qmedia=		11289,46				Qmedia= 9715,417					
Potenza=	77	%													
Pr. Statica=	20	[Pa]													
Frequenza=	40	[Hz]													

Figura 3.11 - Mandata UTA 2 - Allestimento esperimento

UTA 2		MANDATA	
Situazione di lavaggio locale			
Portata richiesta da progetto:	16000	[mc/h]	
N° ventilatori in funzione:	2		
Sezione	1200x500	[mmq]	
SET 1		SET 2	
Q=	18203	Q=	16358
	[mc/h]		[mc/h]
v=	8,83	v=	7,66
	[m/s]		[m/s]
P=	60	P=	47
	[Pa]		[Pa]
Frequenza=	50	Frequenza=	45
	[Hz]		[Hz]
MISURA 1		MISURA 2	
21014	22891	19885	20325
18917	20762	23655	20623
18810	19091	21970	23567
19084	23612	21605	21906
20679	17207	20594	15575
2142	5898	11515	6204
Qmedia= 18230,46		Qmedia= 16437,38	
Set point macchina			
Potenza=	100	%	
Pr. Statica=	80	[Pa]	
Frequenza=	50	[Hz]	

Figura 3.12 - Mandata UTA 2 - Lavaggio locale

Per quanto riguarda la UTA 2, le misure per i settaggi in modalità “allestimento esperimento” e “lavaggio locale” sono state eseguite prima che venissero montati i filtri, una volta montati è stata settata la frequenza dei ventilatori in modo da garantire la stessa pressione statica misurata senza filtri.

UTA 3		MANDATA	
Situazione di allestimento esperimento			
Portata richiesta da progetto:	1200	[mc/h]	
N° ventilatori in funzione:	1		
Sezione	400x400	[mmq]	
SET 1		MISURA 1	
Q=	1546	1282	1264
	[mc/h]	1792	
v=	2,7	1356	1406
	[m/s]	1825	
P=	-13,5	1600	1548
	[Pa]	1840	
Frequenza=	40		
	[Hz]		
Set point macchina		Qmedia= 1545,889	
Potenza=	80	%	
Pr. Statica=	22	[Pa]	
Frequenza=	40	[Hz]	

Figura 3.13 - Mandata UTA 3 - Allestimento esperimento

UTA 3	MANDATA								
Situazione di lavaggio locale									
Portata richiesta da progetto:	2400	[mc/h]							
N° ventilatori in funzione:	2								
Sezione	400x400	[mmq]							
SET 1						MISURA 1			
Q=	2556	[mc/h]				2005	2212	2570	
v=	4,44	[m/s]				2318	2229	2687	
P=	-31,5	[Pa]				2972	2982	3030	
Frequenza=	40	[Hz]							
Set point macchina						Qmedia= 2556,111			
Potenza=	80	%							
Pr. Statica=	50	[Pa]							
Frequenza=	40	[Hz]							

Figura 3.14 - Mandata UTA 3 - Lavaggio locale

Per quanto riguarda la UTA 3, le misure di pressione statica, per questioni pratiche che rendevano difficoltoso l'uso del tubo di Pitot sulla tubazione di mandata, sono state fatte sulla tubazione di aspirazione, motivo per cui la pressione ha segno negativo.

### 3.2.2. Logiche di regolazione delle UTA

#### UTA 1 – UTA 3

Le UTA 1 e 3 a servizio, rispettivamente, dei locali A8 e A2, hanno lo stesso schema di funzionamento e sono a servizio di locali uguali per dimensioni e destinazione d'uso. Le loro logiche di funzionamento sono, pertanto, le stesse e verranno descritte di seguito in un'unica volta.

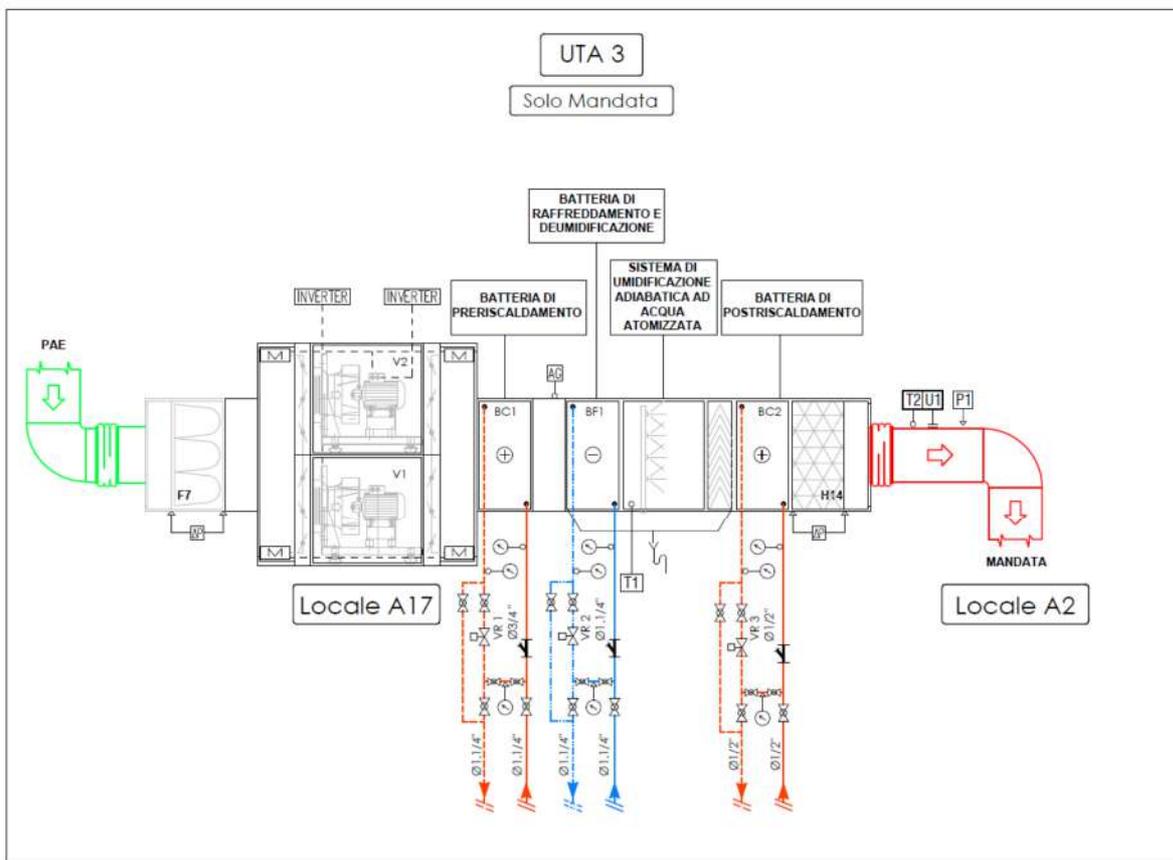
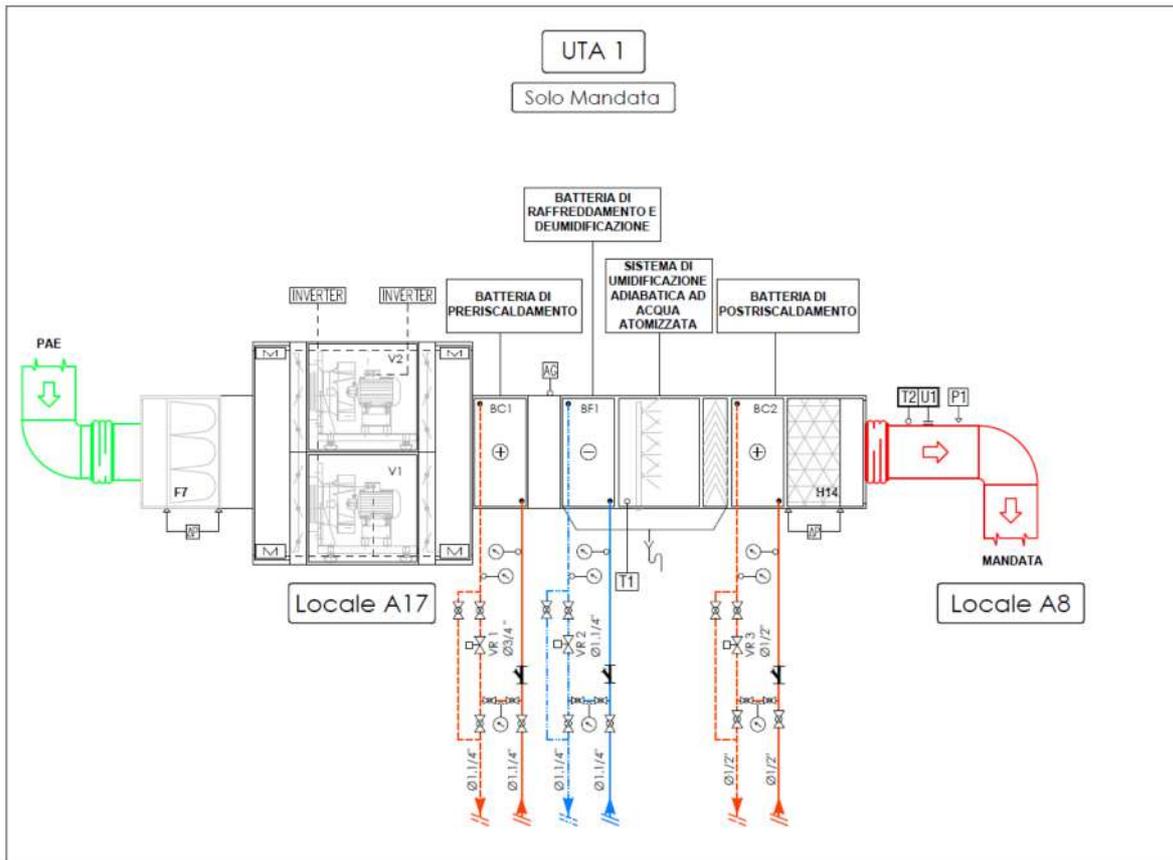


Figura 3.15 - Schema di funzionamento UTA 1 e UTA 3

- **MODALITA' DI ESERCIZIO DEL LOCALE SERVITO**

Le apparecchiature funzionano con le seguenti contemporaneità per le diverse condizioni operative:

APPARECCHIATURA	OFF	NORMALE ESERCIZIO	LAVAGGIO LOCALE
UTA Mandata	OFF	N° 1 Ventilatore ON	N° 2 Ventilatori ON

La regolazione di portata e temperatura viene garantita dal funzionamento di valvole e trasmettitori:

Trasmettitori e valvole	Funzione
$\Delta P$	Pressostato differenziale, dà informazioni sullo stato di pulizia dei filtri.
VR1	Valvola posta sul circuito di acqua di preriscaldamento, viene completamente aperta in caso di funzionamento in azione antigelo, mentre i ventilatori di mandata vengono fermati.
VR2	Valvola posta sul circuito di acqua di raffreddamento e umidificazione, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a monte della batteria di postriscaldamento e in base all'umidità ambiente.
VR3	Valvola posta sul circuito di acqua di postriscaldamento, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a valle della batteria di postriscaldamento.
U1	Trasmettitore per la regolazione dell'umidità ambiente; mantiene il valore di setpoint (45% in inverno e 80% in estate) agendo sulla valvola VR2.
T1	Trasmettitore di temperatura a monte della batteria di postriscaldamento, mantiene il valore di setpoint (15° in estate e 18° in inverno) agendo sulle valvole VR1 e VR2.
T2	Trasmettitore di temperatura posto sul canale di mandata, mantiene il valore di setpoint (18° in estate e 18° in inverno) agendo sulla valvola VR3.
P1	Trasmettitore per la regolazione della portata dell'aria, mantiene il valore di setpoint (1200 mc/h in modalità "normale esercizio" e 2400

	mc/h in modalità “lavaggio locale”) agendo sulla velocità dei ventilatori di mandata.
--	---

La modalità operativa e la stagione corrente (estate/inverno) sono selezionabili dall’operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

- Ogni sezione ventilante funziona asservita all’apertura della serranda relativa, installata a monte del ventilatore. Il sistema di regolazione, in modalità “Normale Esercizio”, provvederà alla rotazione dei ventilatori per alternanza (in base ad un numero di ore impostabile) o avaria.
- **REGOLAZIONE DELLA PORTATA ARIA**  
Il Trasmettitore “P1” mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità del/dei ventilatore/i di mandata:
  - In Modalità “Normale Esercizio” con un ventilatore in funzione
  - In Modalità “Lavaggio” con due ventilatori in funzione
- **PRESENZA DI FLUSSO D’ARIA NEI CANALI**  
Il Trasmettitore di pressione “P1” segnala l’allarme se, con ventilatore in funzione, non raggiunge il valore di setpoint impostato. Lettura ritardata rispetto al comando di accensione del ventilatore. Il sistema provvede ad inserire il ventilatore di scorta.
- **PROTEZIONE ANTIGELO**  
Il termostato Antigelo segnala l’intervento al sistema, ferma il ventilatore di Mandata ed apre la valvola “VR1”. Con la fermata dei ventilatori si chiudono le serrande asservite.
- **STATO SPORCAMENTO FILTRI**  
I pressostati differenziali “ΔP” segnalano il raggiungimento della soglia impostata sul dispositivo relativo.
- **REGOLAZIONE UMIDITA’ AMBIENTE**
  - Esercizio Invernale: Il Trasmettitore “U1” mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sul sistema di umidificazione
  - Esercizio Estivo: Il Trasmettitore “U1” mantiene il valore di Set-Point desiderato (80% impostabile), con azione sulla valvola “VR2”. Al superamento di tale valore, la valvola “VR2” sarà mandata in completa apertura, per poi riprendere il Suo normale funzionamento al rientro del valore.

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI SATURAZIONE**

Il Trasmittitore di Temperatura “T1” mantiene il valore di Setpoint desiderato con azione sulle valvole VR1 e VR2. Il valore di Setpoint è impostabile (di default, 15°C in estate e 18°C in inverno).

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI MANDATA**

Il Trasmittitore di Temperatura “T2” (in mandata) mantiene il valore di Setpoint desiderato con azione sulle valvola VR3. Il valore di Setpoint è impostabile (di default, 18°C in estate e 18°C in inverno).

- **MODALITA' DI LAVAGGIO DEL LOCALE**

- Entrambe le sezioni ventilanti si portano alla velocità desiderata.
- Il sistema di Umidificazione è spento
- I set-Point di Saturazione e Mandata rimangono gli stessi della modalità “Normale Esercizio”

# UTA 2

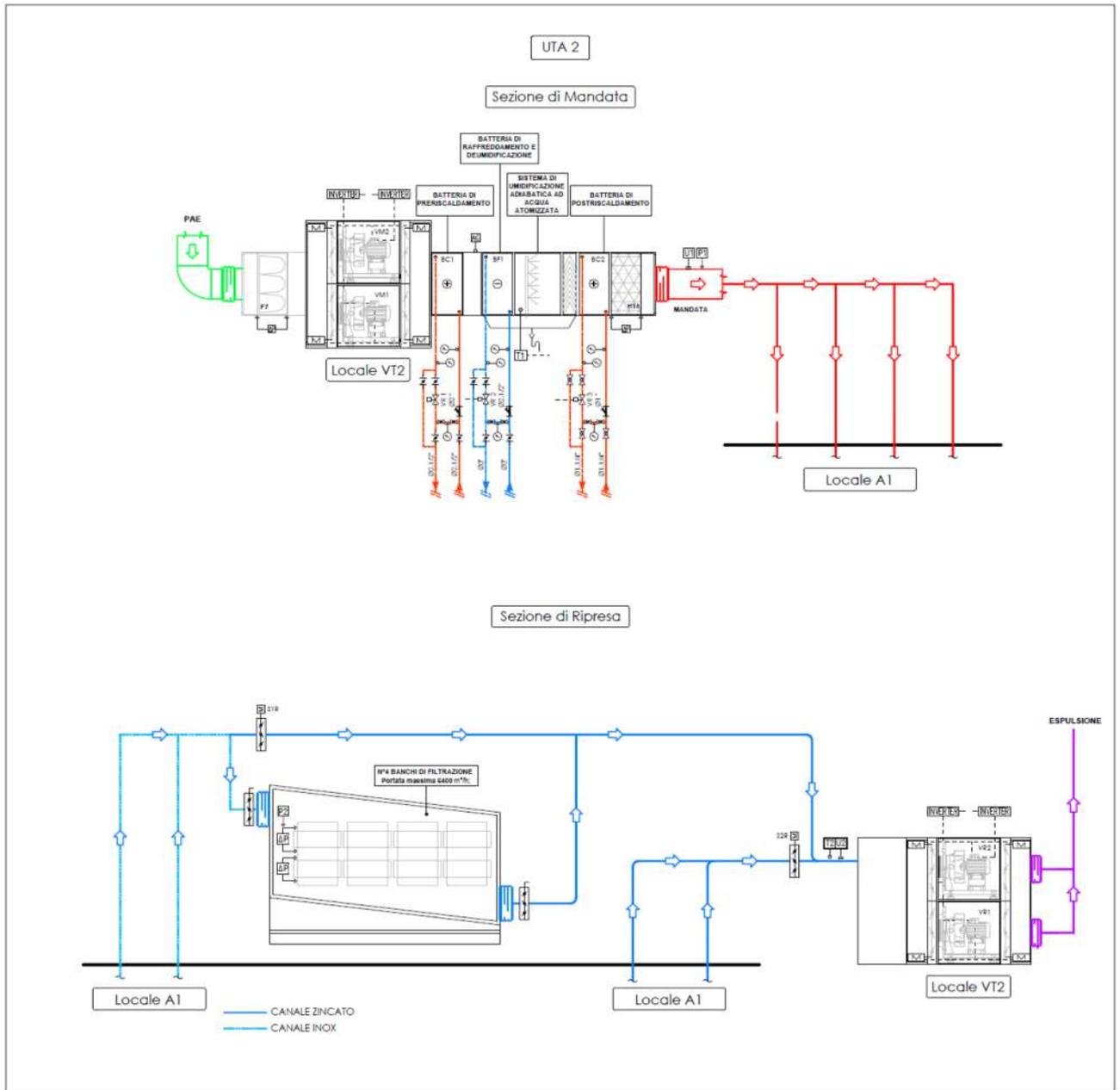


Figura 3.16 - Schema di funzionamento UTA 2

- **MODALITA' DI ESERCIZIO DEL LOCALE A1**

Le apparecchiature a corredo del locale A1 funzionano con le seguenti contemporaneità per le diverse condizioni operative:

APPARECCHIATURA	OF F	ALLESTIMENT O ESPERIMENTO (Presenza di Persone)	ESPERIMENT O IN CORSO (Assenza di Persone)	LAVAGGI O LOCALE
UTA 2 Mandata	OF F	N° 1 Ventilatore ON	OFF	N° 2 Ventilatori ON
UTA 2 Ripresa	OF F	N° 1 Ventilatore ON	OFF/Supputo all'estrattore EXP03 N° 1-2 Ventilatori ON	N° 2 Ventilatori ON

La regolazione di portata e temperatura viene garantita dal funzionamento di valvole e trasmettitori:

Trasmettitori e valvole	Funzione
$\Delta P$	Pressostato differenziale, dà informazioni sullo stato di pulizia dei filtri.
VR1	Valvola posta sul circuito di acqua di preriscaldamento, viene completamente aperta in caso di funzionamento in azione antigelo, e vengono fermati i ventilatori di mandata e di ripresa, si chiudono inoltre le serrande asservite.
VR2	Valvola posta sul circuito di acqua di raffreddamento e umidificazione, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a monte della batteria di postriscaldamento e in base all'umidità ambiente.
VR3	Valvola posta sul circuito di acqua di postriscaldamento, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a valle della batteria di postriscaldamento.
U1	Trasmettitore per la regolazione dell'umidità ambiente; limita il valore massimo in mandata (80%) agendo sulla valvola VR2.

U2	Trasmittitore per la regolazione dell'umidità ambiente in aspirazione; mantiene il valore di setpoint (45%).
T1	Trasmittitore di temperatura a monte della batteria di postriscaldamento, mantiene il valore di setpoint (14° in estate e 33° in inverno) agendo sulle valvole VR1 e VR2.
T2	Trasmittitore di temperatura posto sul canale di ripresa, mantiene il valore di setpoint (17° in estate e 33° in inverno) agendo sulla valvola VR3.
P1	Trasmittitore per la regolazione della portata dell'aria in mandata, mantiene il valore di setpoint (8000 mc/h in modalità "allestimento esperimento" e 16000 mc/h in modalità "lavaggio locale") agendo sulla velocità dei ventilatori di mandata.
P2	Trasmittitore per la regolazione della portata dell'aria in ripresa, mantiene il valore di setpoint (8000 mc/h in modalità "allestimento esperimento" e 16000 mc/h in modalità "lavaggio locale") agendo sulla velocità dei ventilatori di ripresa. In modalità "esperimento in corso" può far funzionare uno o due ventilatori come supporto all'estrattore EXP-03.
S1R	Serranda posta sul bypass in aspirazione; resta chiusa in modalità OFF e in modalità "esperimento in corso", resta aperta in modalità "allestimento esperimento" e in modalità "lavaggio". In modalità "allarme antincendio" tutte le serrande restano chiuse e i ventilatori spenti.
S2R	Serranda posta in aspirazione in corrispondenza degli aspiratori che vanno direttamente nella UTA senza passare per i filtri. Resta chiusa in modalità OFF, in modalità "esperimento in corso" e in modalità "allestimento esperimento"; resta aperta in modalità "lavaggio". In modalità "allarme antincendio" tutte le serrande restano chiuse e i ventilatori spenti.

La modalità operativa è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

La stagione corrente (Estate/Inverno) è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

- Ogni sezione ventilante funziona asservita all'apertura della serranda relativa, installata a monte del ventilatore. Il sistema di regolazione, in modalità "Allestimento Esperimento", provvederà alla rotazione dei ventilatori per alternanza (in base ad un numero di ore impostabile) o avaria.

**In modalità OFF le serrande saranno tutte chiuse e i motori spenti**

- **REGOLAZIONE DELLA PORTATA ARIA**

Il Trasmettitore “P1” mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità del/dei ventilatore/i di mandata:

- In Modalità “Allestimento Esperimento” con un ventilatore in funzione
- In Modalità “Lavaggio” con due ventilatori in funzione

Il Trasmettitore “P2” mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità del/dei ventilatore/i di ripresa:

- In Modalità “Allestimento Esperimento” con un ventilatore in funzione
- In Modalità “Lavaggio” con due ventilatori in funzione
- In Modalità “Esperimento in Corso” come supporto all’estrattore EXP-03 con uno/due ventilatori in funzione.

- **PRESENZA DI FLUSSO D’ARIA NEI CANALI**

I Trasmettitori di pressione “P1” e “P2” segnalano l’allarme se, con ventilatore in funzione, non raggiungono il valore di setpoint impostato. Lettura ritardata rispetto al comando di accensione del ventilatore. Il sistema provvede ad inserire il ventilatore di scorta.

- **PROTEZIONE ANTIGELO**

Il termostato Antigelo segnala l’intervento al sistema, ferma il ventilatore di Mandata e quello di Ripresa (non in modalità “Esperimento in corso”) ed apre la valvola “VR1”. Con la fermata dei ventilatori si chiudono le serrande asservite.

- **STATO SPORCAMENTO FILTRI**

I pressostati differenziali “ $\Delta P$ ” segnalano il raggiungimento della soglia impostata sul dispositivo relativo.

- **REGOLAZIONE UMIDITA’ AMBIENTE**

- Esercizio Invernale: Il Trasmettitore “U2” mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sul sistema di umidificazione. Il Trasmettitore “U1” limita il valore massimo in mandata (80% impostabile).

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI SATURAZIONE**

Il Trasmettitore di Temperatura “T1” mantiene il valore di Set-point desiderato con azione sulle valvole VR1 e VR2. Il valore di Set-point è impostabile (di default, 14°C in estate e 33°C in inverno).

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI MANDATA**

Il Trasmettitore di Temperatura “T2” (in mandata) mantiene il valore di setpoint desiderato con azione sulle valvola VR3. Il valore di setpoint è impostabile (di default, 17°C in estate e 33°C in inverno).

- **MODALITA' DI LAVAGGIO DEL LOCALE**

- Entrambe le sezioni ventilanti si portano alla velocità desiderata.
- Il sistema di Umidificazione è spento
- I set-Point di Saturazione e Mandata rimangono gli stessi della modalità “Allestimento Esperimento”

- **GESTIONE SERRANDE S1R E S2R**

- In modalità “OFF” le serrande risulteranno Chiuse.
- In modalità “Allestimento Esperimento” la serranda S1R risulterà Aperta mentre la S2R risulterà Chiusa.
- In modalità “Esperimento” le serrande risulteranno Chiuse
- In modalità “Lavaggio” le serrande risulteranno Aperte.
- In modalità “Allarme antincendio” le serrande risulteranno chiuse e i ventilatori spenti.

## UTA 5

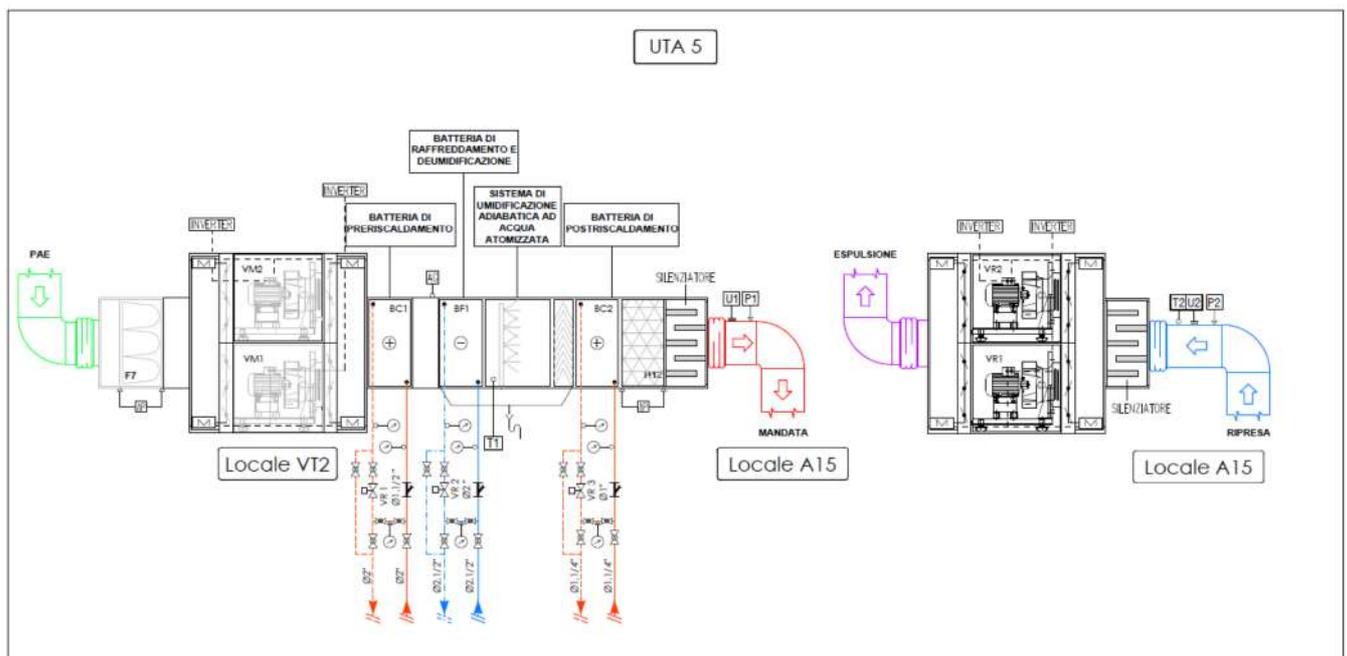


Figura 3.17 - Schema di funzionamento UTA 5

- **MODALITA' DI ESERCIZIO DEL LOCALE A15**

Le apparecchiature a corredo del locale A15 funzionano con le seguenti contemporaneità per le diverse condizioni operative:

APPARECCHIATURA	OFF	NORMALE ESERCIZIO
UTA 5 Mandata	OFF	N° 1 Ventilatore ON
UTA 5 Ripresa	OFF	N° 1 Ventilatore ON

La regolazione di portata e temperatura viene garantita dal funzionamento di valvole e trasmettitori:

Trasmettitori e valvole	Funzione
$\Delta P$	Pressostato differenziale, dà informazioni sullo stato di pulizia dei filtri.
VR1	Valvola posta sul circuito di acqua di preriscaldamento, viene completamente aperta in caso di funzionamento in azione antigelo, e vengono fermati i ventilatori di mandata e di ripresa, si chiudono inoltre le serrande asservite.
VR2	Valvola posta sul circuito di acqua di raffreddamento e umidificazione, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a monte della batteria di postriscaldamento e in base all'umidità ambiente.
VR3	Valvola posta sul circuito di acqua di postriscaldamento, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a valle della batteria di postriscaldamento.
U1	Trasmettitore per la regolazione dell'umidità ambiente; limita il valore massimo in mandata (80%) agendo sulla valvola VR2.
U2	Trasmettitore per la regolazione dell'umidità ambiente in aspirazione; mantiene il valore di setpoint (45%).
T1	Trasmettitore di temperatura a monte della batteria di postriscaldamento, mantiene il valore di setpoint (14° in estate e 33° in inverno) agendo sulle valvole VR1 e VR2.

T2	Trasmittitore di temperatura posto sul canale di ripresa, mantiene il valore di setpoint (17° in estate e 33° in inverno) agendo sulla valvola VR3.
P1	Trasmittitore per la regolazione della portata dell'aria in mandata, mantiene il valore di setpoint (10000 mc/h) agendo sulla velocità del ventilatore di mandata.
P2	Trasmittitore per la regolazione della portata dell'aria in ripresa, mantiene il valore di setpoint (10000 mc/h) agendo sulla velocità del ventilatore di ripresa.

La modalità operativa è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

La stagione corrente (Estate/Inverno) è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

- Ogni sezione ventilante funziona asservita all'apertura della serranda relativa, installata a monte del ventilatore. Il sistema di regolazione, in modalità "Normale Esercizio", provvederà alla rotazione dei ventilatori per alternanza (in base ad un numero di ore impostabile) o avaria.
- **REGOLAZIONE DELLA PORTATA ARIA**  
 Il Trasmittitore "P1" mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità del/dei ventilatore/i di mandata:
  - In Modalità "Normale Esercizio" con un ventilatore in funzione
 Il Trasmittitore "P2" mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità del/dei ventilatore/i di ripresa:
  - In Modalità "Normale Esercizio" con un ventilatore in funzione
- **PRESENZA DI FLUSSO D'ARIA NEI CANALI**  
 I Trasmittitori di pressione "P1" e "P2" segnalano l'allarme se, con ventilatore in funzione, non raggiungono il valore di setpoint impostato. Lettura ritardata rispetto al comando di accensione del ventilatore. Il sistema provvede ad inserire il ventilatore di scorta.
- **PROTEZIONE ANTIGELO**

Il termostato Antigelo segnala l'intervento al sistema, ferma il ventilatore di Mandata e quello di Ripresa ed apre la valvola "VR1". Con la fermata dei ventilatori si chiudono le serrande asservite.

- **STATO SPORCAMENTO FILTRI**

I pressostati differenziali "ΔP" segnalano il raggiungimento della soglia impostata sul dispositivo relativo.

- **REGOLAZIONE UMIDITA' AMBIENTE**

- Esercizio Invernale: Il Trasmittitore "U2" mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sul sistema di umidificazione. Il Trasmittitore "U1" limita il valore massimo in mandata (80% impostabile).
- Esercizio Estivo: Il Trasmittitore "U2" mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sulla valvola "VR2". Al superamento di tale valore, la valvola "VR2" sarà mandata in completa apertura, per poi riprendere il Suo normale funzionamento al rientro del valore.

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI SATURAZIONE**

Il Trasmittitore di Temperatura "T1" mantiene il valore di Set-point desiderato con azione sulle valvole VR1 e VR2. Il valore di Set-point è impostabile (di default, 14°C in estate e 33°C in inverno).

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI MANDATA**

Il Trasmittitore di Temperatura "T2" (in mandata) mantiene il valore di setpoint desiderato con azione sulle valvole VR3. Il valore di setpoint è impostabile (di default, 17°C in estate e 33°C in inverno).

## UTA 5a

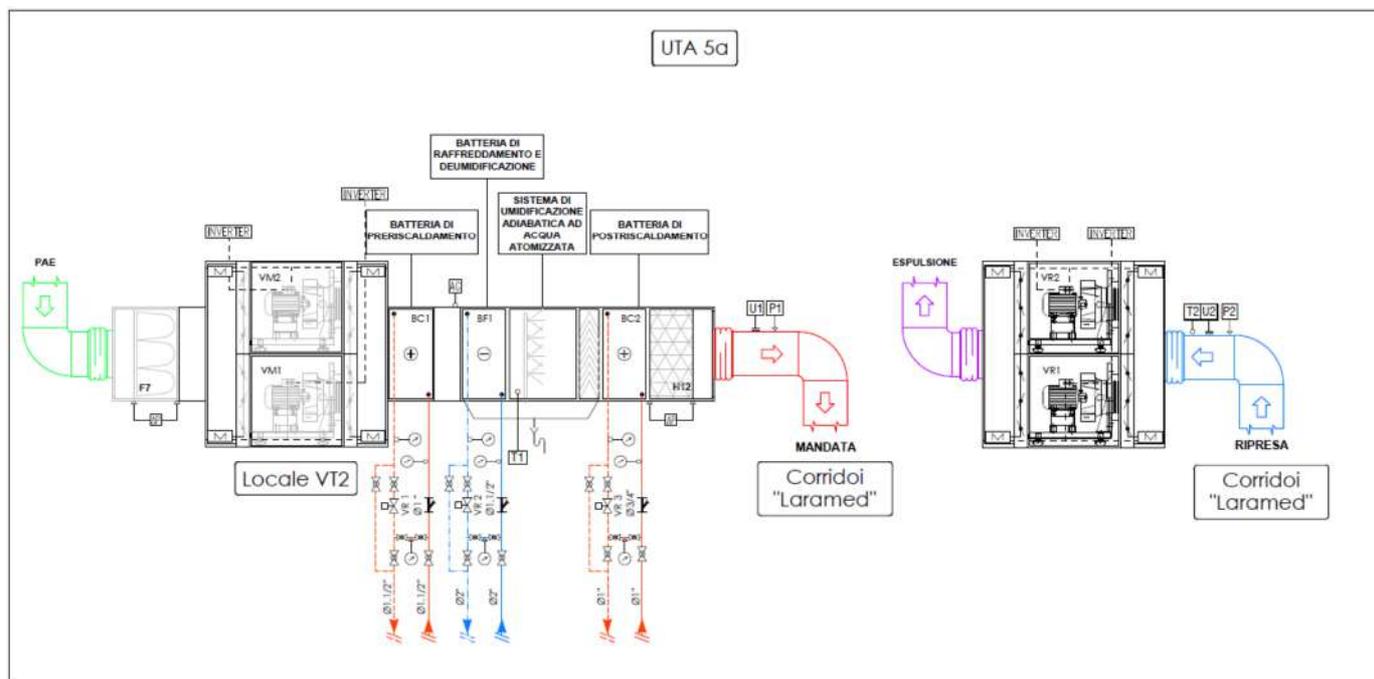


Figura 3.18 - Schema di funzionamento UTA 5a

- **MODALITA' DI ESERCIZIO DEL LOCALE CORRIDOI "LARAMED"**

Le apparecchiature a corrido del locale Corridoi "Larmed" funzionano con le seguenti contemporaneità per le diverse condizioni operative:

APPARECCHIATURA	OFF	NORMALE ESERCIZIO
UTA 5a Mandata	OFF	N° 1 Ventilatore ON
UTA 5a Ripresa	OFF	N° 1 Ventilatore ON

La regolazione di portata e temperatura viene garantita dal funzionamento di valvole e trasmettitori:

Trasmettitori e valvole	Funzione
$\Delta P$	Pressostato differenziale, dà informazioni sullo stato di pulizia dei filtri.
VR1	Valvola posta sul circuito di acqua di preriscaldamento, viene completamente aperta in caso di funzionamento in azione antigelo, e

	vengono fermati i ventilatori di mandata e di ripresa, si chiudono inoltre le serrande asservite.
VR2	Valvola posta sul circuito di acqua di raffreddamento e umidificazione, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a monte della batteria di postriscaldamento e in base all'umidità ambiente.
VR3	Valvola posta sul circuito di acqua di postriscaldamento, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a valle della batteria di postriscaldamento.
U1	Trasmittitore per la regolazione dell'umidità ambiente; limita il valore massimo in mandata (80%) agendo sulla valvola VR2.
U2	Trasmittitore per la regolazione dell'umidità ambiente in aspirazione; mantiene il valore di setpoint (45%).
T1	Trasmittitore di temperatura a monte della batteria di postriscaldamento, mantiene il valore di setpoint (14° in estate e 33° in inverno) agendo sulle valvole VR1 e VR2.
T2	Trasmittitore di temperatura posto sul canale di ripresa, mantiene il valore di setpoint (17° in estate e 33° in inverno) agendo sulla valvola VR3.
P1	Trasmittitore per la regolazione della portata dell'aria in mandata, mantiene il valore di setpoint (5000 mc/h) agendo sulla velocità del ventilatore di mandata.
P2	Trasmittitore per la regolazione della portata dell'aria in ripresa, mantiene il valore di setpoint (5000 mc/h) agendo sulla velocità del ventilatore di ripresa.

La modalità operativa è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

La stagione corrente (Estate/Inverno) è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

- Ogni sezione ventilante funziona asservita all'apertura della serranda relativa, installata a monte del ventilatore. Il sistema di regolazione, in modalità "Normale Esercizio", provvederà alla rotazione dei ventilatori per alternanza (in base ad un numero di ore impostabile) o avaria.
- **REGOLAZIONE DELLA PORTATA ARIA**

Il Trasmettitore “P1” mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità del/dei ventilatore/i di mandata:

- In Modalità “Normale Esercizio” con un ventilatore in funzione

Il Trasmettitore “P2” mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità del/dei ventilatore/i di ripresa:

- In Modalità “Normale Esercizio” con un ventilatore in funzione

- **PRESENZA DI FLUSSO D’ARIA NEI CANALI**

I Trasmettitori di pressione “P1” e “P2” segnalano l’allarme se, con ventilatore in funzione, non raggiungono il valore di setpoint impostato. Lettura ritardata rispetto al comando di accensione del ventilatore. Il sistema provvede ad inserire il ventilatore di scorta.

- **PROTEZIONE ANTIGELO**

Il termostato Antigelo segnala l’intervento al sistema, ferma il ventilatore di Mandata e quello di Ripresa ed apre la valvola “VR1”. Con la fermata dei ventilatori si chiudono le serrande asservite.

- **STATO SPORCAMENTO FILTRI**

I pressostati differenziali “ $\Delta P$ ” segnalano il raggiungimento della soglia impostata sul dispositivo relativo.

- **REGOLAZIONE UMIDITA’ AMBIENTE**

- Esercizio Invernale: Il Trasmettitore “U2” mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sul sistema di umidificazione. Il Trasmettitore “U1” limita il valore massimo in mandata (80% impostabile).
- Esercizio Estivo: Il Trasmettitore “U2” mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sulla valvola “VR2”. Al superamento di tale valore, la valvola “VR2” sarà mandata in completa apertura, per poi riprendere il suo normale funzionamento al rientro del valore.

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI SATURAZIONE**

Il Trasmettitore di Temperatura “T1” mantiene il valore di setpoint desiderato con azione sulle valvole VR1 e VR2. Il valore di setpoint è impostabile (di default, 14°C in estate e 33°C in inverno).

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI MANDATA**

Il Trasmettitore di Temperatura “T2” (in mandata) mantiene il valore di setpoint desiderato con azione sulle valvola VR3. Il valore di setpoint è impostabile (di default, 17°C in estate e 33°C in inverno).

### UTA 6 – UTA 7

Le UTA 6 e 7 a servizio, rispettivamente, dei laboratori Laramed e GMP, hanno lo stesso schema di funzionamento e sono a servizio di locali uguali per dimensioni e destinazione d’uso. Le loro logiche di funzionamento sono, pertanto, le stesse e verranno descritte di seguito in un’unica volta.

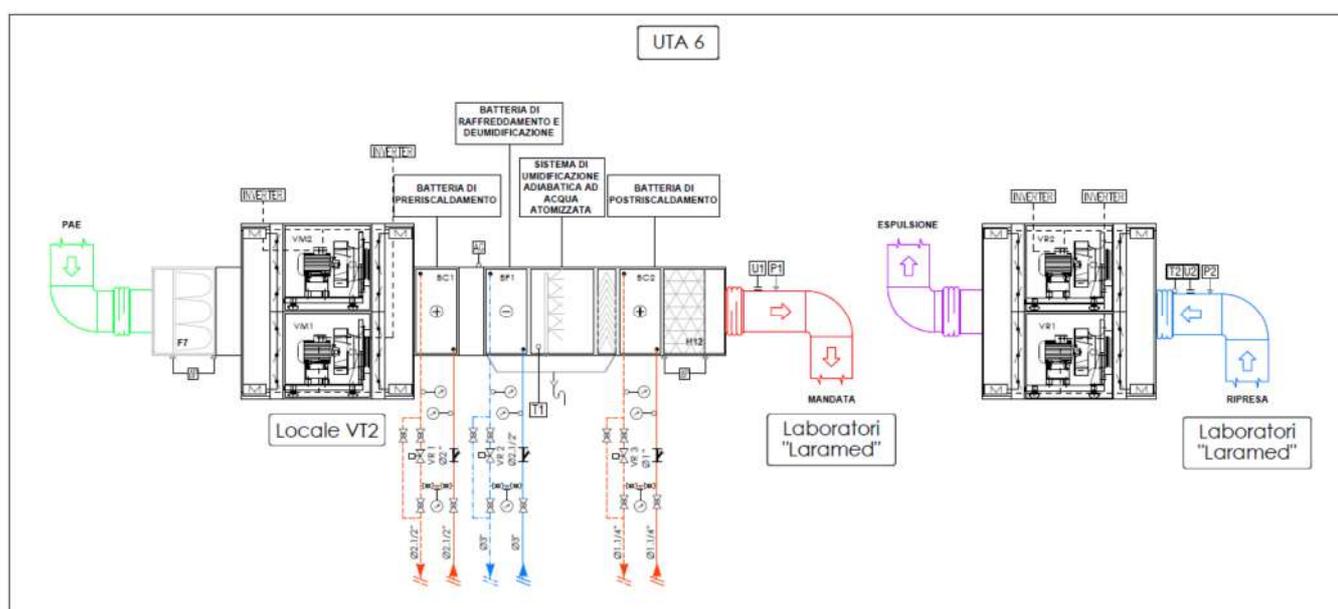


Figura 3.19 - Schema di funzionamento UTA 6 e UTA 7

- **MODALITA' DI ESERCIZIO DEL LOCALE LABORATORI "LARAMED"**

Le apparecchiature funzionano con le seguenti contemporaneità per le diverse condizioni operative:

APPARECCHIATURA	OFF	NORMALE ESERCIZIO
UTA 6-7 Mandata	OFF	N° 2 Ventilatori ON
UTA 6-7 Ripresa	OFF	N° 2 Ventilatori ON

La regolazione di portata e temperatura viene garantita dal funzionamento di valvole e trasmettitori:

Trasmettitori e valvole	Funzione
$\Delta P$	Pressostato differenziale, dà informazioni sullo stato di pulizia dei filtri.
VR1	Valvola posta sul circuito di acqua di preriscaldamento, viene completamente aperta in caso di funzionamento in azione antigelo, e vengono fermati i ventilatori di mandata e di ripresa, si chiudono inoltre le serrande asservite.
VR2	Valvola posta sul circuito di acqua di raffreddamento e umidificazione, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a monte della batteria di postriscaldamento e in base all'umidità ambiente.
VR3	Valvola posta sul circuito di acqua di postriscaldamento, viene aperta o chiusa in base alla temperatura rilevata a valle della batteria di postriscaldamento.
U1	Trasmettitore per la regolazione dell'umidità ambiente; limita il valore massimo in mandata (45%) agendo sulla valvola VR2.
U2	Trasmettitore per la regolazione dell'umidità ambiente in aspirazione; mantiene il valore di setpoint (45%).
T1	Trasmettitore di temperatura a monte della batteria di postriscaldamento, mantiene il valore di setpoint (14° in estate e 33° in inverno) agendo sulle valvole VR1 e VR2.
T2	Trasmettitore di temperatura posto sul canale di ripresa, mantiene il valore di setpoint (17° in estate e 33° in inverno) agendo sulla valvola VR3.
P1	Trasmettitore per la regolazione della portata dell'aria in mandata, mantiene il valore di setpoint (14000 mc/h) agendo sulla velocità dei ventilatori di mandata.
P2	Trasmettitore per la regolazione della portata dell'aria in ripresa, mantiene il valore di setpoint (14000 mc/h) agendo sulla velocità dei ventilatori di ripresa.

La modalità operativa è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

La stagione corrente (Estate/Inverno) è selezionabile dall'operatore attraverso Display/Sistema di Gestione.

- Ogni sezione ventilante funziona asservita all'apertura della serranda relativa, installata a monte del ventilatore. Il sistema di regolazione, in modalità "Normale Esercizio", provvederà all'accensione dei ventilatori.
- **REGOLAZIONE DELLA PORTATA ARIA**  
Il Trasmittitore "P1" mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità dei ventilatori di mandata:
  - In Modalità "Normale Esercizio" con due ventilatori in funzioneIl Trasmittitore "P2" mantiene il valore di Set-Point desiderato con azione sulla velocità dei ventilatori di ripresa:
  - In Modalità "Normale Esercizio" con due ventilatori in funzione
- **PRESENZA DI FLUSSO D'ARIA NEI CANALI**  
I Trasmittitori di pressione "P1" e "P2" segnalano l'allarme se, con ventilatori in funzione, non raggiungono il valore di setpoint impostato. Lettura ritardata rispetto al comando di accensione dei ventilatori.
- **PROTEZIONE ANTIGELO**  
Il termostato Antigelo segnala l'intervento al sistema, ferma i ventilatori di Mandata e quelli di Ripresa ed apre la valvola "VR1". Con la fermata dei ventilatori si chiudono le serrande asservite.
- **STATO SPORCAMENTO FILTRI**  
I pressostati differenziali "ΔP" segnalano il raggiungimento della soglia impostata sul dispositivo relativo.
- **REGOLAZIONE UMIDITA' AMBIENTE**
  - Esercizio Invernale: Il Trasmittitore "U2" mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sul sistema di umidificazione. Il Trasmittitore "U1" limita il valore massimo in mandata (80% impostabile).
  - Esercizio Estivo: Il Trasmittitore "U2" mantiene il valore di Set-Point desiderato (45% impostabile), con azione sulla valvola "VR2". Al superamento di tale valore, la valvola "VR2" sarà mandata in completa

apertura, per poi riprendere il suo normale funzionamento al rientro del valore.

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI SATURAZIONE**

Il Trasmettitore di Temperatura “T1” mantiene il valore di setpoint desiderato con azione sulle valvole VR1 e VR2. Il valore di setpoint è impostabile (di default, 14°C in estate e 33°C in inverno).

- **REGOLAZIONE TEMPERATURA DI MANDATA**

Il Trasmettitore di Temperatura “T2” (in mandata) mantiene il valore di setpoint desiderato con azione sulle valvola VR3. Il valore di setpoint è impostabile (di default, 17°C in estate e 33°C in inverno).

Vengono proposte di seguito due stime di portata totale degli impianti di aeroventilazione in due situazioni tipiche di funzionamento: durante il funzionamento del ciclone, ovvero con un esperimento in corso e durante le attività di manutenzione/allestimento di un esperimento. In entrambi i casi è stato ipotizzato il contemporaneo lavaggio di uno o due bunker che non vengono utilizzati nell’esperimento in corso o che non sono implicati nell’attività di manutenzione/allestimento esperimento.

Schema tipico con ciclone a regime (esperimento in corso)

Quando è in funzione il ciclone, saranno in funzione contemporaneamente uno o al massimo 2 locali bunker-target, considerando la condizione più gravosa, si ipotizza che ci sia anche un bunker in lavaggio. Negli altri locali ci sarà, invece, solo la funzione di ventilazione.

Durante l’esperimento gli estrattori lavoreranno con portata minima per mantenere in depressione i bunker. Si ipotizzano 400 mc/h [la portata esatta verrà definita una volta valutato il grado di “ermeticità” del bunker in costruzione]. L’aria passerà attraverso i canister con installati filtri U15 e filtri a carboni attivi.

E’ prevista una funzione “lavaggio”, con i ventilatori degli estrattori in parallelo a portata massima di 2’400 mc/h. L’aria potrà passare attraverso i filtri assoluti fino a 1600 mc/h. Per portate superiori passerà nei canali di bypass.

Si ipotizza il caso appena descritto come il più gravoso e dalle portate dei corrispondenti impianti (locale A1 + 2 bunker in funzione) [400+400+400 (A1) mc/h] e un bunker in lavaggio [2'400 mc/h] si ha una portata totale di **3'600 mc/h**.

Oltre agli estrattori dei locali A1 e bunker, saranno in funzione anche le UTA a servizio degli altri locali dell'edificio, considerando una massima contemporaneità di utilizzo di può considerare una portata totale di **53'000 mc/h**.

Inoltre, anche i locali tecnici (A17 e VT2) saranno in funzione, ipotizzando che siano in funzione uno alla volta, si considera una portata pari a **20'000 mc/h**.

Si considera quindi che durante gli esperimenti in corso si abbia una portata totale pari a:

**TOTALE 3'600 + 53'000 + 20'000 = 76'600 mc/h**



Figura 3.20 - Situazione con esperimenti in corso

### Schema con allestimento esperimento

Quando non è in funzione il ciclotrone, gli impianti non devono garantire la depressurizzazione dei locali, ma, considerando la condizione più gravosa, si ipotizza la contemporaneità del locale A1 con personale presente (16'000 mc/h in estrazione dalla UTA2) e 2 bunker in lavaggio (2'400+2'400 mc/h), per un totale di **20'800 mc/h**.

Oltre agli estrattori dei locali A1 e bunker, saranno in funzione anche le UTA a servizio degli altri locali dell'edificio, considerando una massima contemporaneità di utilizzo di può considerare una portata totale di **53'000 mc/h**.

Inoltre, anche i locali tecnici (A17 e VT2) saranno in funzione, ipotizzando che siano in funzione uno alla volta, si considera una portata pari a **20'000 mc/h**.

Si considera quindi che durante gli esperimenti in corso si abbia una portata totale pari a:

$$\text{TOTALE } 20'800 + 53'000 + 20'000 = 93'800 \text{ mc/h}$$



Figura 3.21 - Situazione in manutenzione/allestimento esperimento

## 4. Conclusioni

Il progetto SPES e la sua attività di ricerca sono ancora nella fase iniziale: l'edificio sta per essere completato, mentre il ciclotrone è già stato installato, ma non è ancora entrato in funzione. Parallelamente alla conclusione dell'edificio si stanno svolgendo le attività di ricerca sul front-end protonico per la parte SPES, mentre sono in fase di studio avanzato i target per la parte LARAMED.

Si può concludere osservando come un progetto di tali dimensioni e impegno dal punto di vista delle risorse non implichi soltanto la pianificazione dell'attività di ricerca, ma preveda in parallelo un'attenta progettazione della geometria, degli impianti e soprattutto della sicurezza.

Le attività che si svolgeranno all'interno dell'edificio SPES presentano un certo grado di rischio dovuto alla radioattività prodotta in parte nel locale ciclotrone, ma soprattutto nei bunker a seguito del bombardamento del fascio sui target. È stato quindi necessario in fase di progettazione uno studio dedicato alla schermatura degli ambienti più a rischio, ma soprattutto ha avuto una parte molto importante il dimensionamento degli impianti per il ricambio d'aria.

Gli impianti di aeroventilazione descritti svolgono una duplice funzione: devono "pulire" l'aria all'interno dei locali, ma soprattutto la devono filtrare prima di immetterla in atmosfera. Svolgono un ruolo fondamentale, quindi, i sistemi di filtraggio dell'aria: sono stati scelti, perciò, filtri con un elevato grado di efficienza, in modo da essere in grado di trattenere quanto più particolato possibile, come richiesto dal servizio di radioprotezione. Di primaria importanza è stata anche la scelta delle tipologie di impianti per l'aspirazione: sono state installate macchine con inverter, in modo da poter regolare la potenza in funzione della portata.

La fase di progettazione è seguita dalla fase di installazione e collaudo delle opere. Conclusa la realizzazione delle strutture, sta terminando l'installazione degli impianti e sono *in progress* i settaggi delle macchine; seguiranno, poi, i collaudi degli impianti.

Terminata questa fase, quando l'utilizzo del ciclotrone sarà a regime, ricoprirà un ruolo di estrema importanza la manutenzione di tali impianti: lo svolgimento in sicurezza degli esperimenti nei bunker è strettamente legato al buon funzionamento degli impianti di depressurizzazione e di ricambio dell'aria.

Un progetto come SPES, quindi, non deve essere visto soltanto come un progetto di ricerca nel campo della fisica nucleare e della fisica medica: a monte di questo aspetto vengono svolte attività progettuali complesse volte a garantire la messa in pratica in sicurezza dei progetti di ricerca.

## 5. Bibliografia

1. **G. Pupillo.** *Radioisotopes production via accelerator for nuclear medicine applications.* 2014.
2. **C.K. Ross, W.T. Diamond.** *Predictions regarding the supply of Mo-99 and Tc-99m when NRU ceases production in 2018.* 2015.
3. **G. Prete et al.** *SPES - Executive summary.* 2008.
4. **A. Duatti et al.** *Considerazioni preliminari sul progetto di sviluppo di un Laboratorio per la Produzione di Radionuclidi per la Medicina (LARAMED) presso il Ciclotrone dei LNL dell'INFN di Legnaro.* 2011.
5. **IAEA technical report.** *Principles of production of radioisotopes using cyclotrons.* 2009.
6. **M. Maggiore et al.** *An intrinsically safe facility for forefront research and training on nuclear technologies - An exemple of accelerator: the SPES cyclotron.* 2014.
7. **A. Monetti et al.** *The RIB production target for the SPES project.* 2015.
8. **A.H. Al Rayyes, Y. Ailouti.** *Production and quality control of Cu-64 from hing current Ni target.* 2013.
9. **J. Esposito et al.** *Cyclotron-based alternative production of Tc-99m: INFN reasearch activities progress report.* 2013.
10. **V. Beladija.** *Thin film deposition processes.* 2013.
11. **D. Zafirooulos.** *Relazione tecnica in materia di radioprotezione relativa al progetto SPES-fase  $\alpha$  dei LNL dell'INFN.* 2010.
12. **G. Prete.** *The LNL radioactive beam facility.* 2010.
13. **M. Manzolaro.** *Study, design and test of the target-ion source system for the INFN SPES facility.* 2008.
14. **E. Boratto.** *Progettazione e ingegnerizzazione del front-end protonico del progetto SPES.* 2015.

15. **UNI ISO 17873.** *Nuclear facilities - Criteria for the design and operation of ventilation systems for nuclear installations other than nuclear reactors.* 2004.

16. **Manens-Tifs.** *Progetto esecutivo degli edifici e degli impianti per il progetto SPES - Capitolato speciale di appalto.* 2012.

17. **F. Franceschi.** *Misurare la portata d'aria in condotte a bassa pressione.*