

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione di un impianto HVAC a servizio di un
Laboratorio a Contenimento Biologico di Livello 3
all'interno di una struttura ospedaliera**



Relatore:

Prof. Marco Carlo Masoero

Candidato:

Angelo Martino

Anno Accademico 2019-2020

In qualità di autore di questa tesi, vorrei esprimere la mia gratitudine a Matteo Bo e Giorgio Bo della Società PRODIM S.r.l per l'opportunità di sviluppare il progetto.

Un sincero ringraziamento va anche a Roberto Mancin e Domenico Cutollè, i miei tutor aziendali, per l'aiuto ed il supporto.

Un ringraziamento particolare va inoltre al Prof. Marco Carlo Masoero per i consigli e la disponibilità durante lo sviluppo di questo lavoro.

INTRODUZIONE

Le malattie infettive sono sempre state un serio problema per l'intera umanità e, preoccupazione ancora più grande, è dovuta alla pericolosità della loro possibile diffusione incontrollata ed esponenziale. Attuale è il caso del Covid-19 conosciuto come "Coronavirus" che sta destando non poche preoccupazioni a livello globale.

Questi agenti patogeni si studiano e manipolano in appositi laboratori, costruiti seguendo specifici criteri progettuali mirati a garantire un certo livello di sicurezza sia per chi opera all'interno di queste strutture che per l'ambiente esterno. Lo scopo principe di questi laboratori, quindi, è quello di creare un ambiente di contenimento che impedisca la fuoriuscita, anche accidentale, di questi microrganismi.

Questa tesi si propone di affrontare un caso di studio relativo alla progettazione di un impianto HVAC di un laboratorio a contenimento biologico nel nuovo ospedale "Citta della Salute e della Ricerca" di Sesto San Giovanni (Milano), in fase di progettazione.

Verranno descritte la legislazione e normativa di riferimento, le principali caratteristiche costruttive e le varie fasi della progettazione dell'impianto.

INDICE

| | |
|--|----|
| 1. Generalità sui Laboratori..... | 9 |
| 1.1 I Laboratori BSL..... | 10 |
| 1.2 Legislazione e linee guida..... | 10 |
| 1.3 Classificazione dei microrganismi..... | 11 |
| 1.4 Classificazione dei laboratori | 11 |
| 2. Caratteristiche dei Laboratori BSL | 13 |
| 2.1 Struttura del laboratorio | 16 |
| 2.2 Attrezzature di Laboratorio..... | 18 |
| 2.3 Le cappe di sicurezza biologica (BSCs)..... | 19 |
| 2.3.1 Le Cappe di Classe I..... | 22 |
| 2.3.2 Le Cappe di Classe II..... | 23 |
| 2.3.3 Le Cappe di Classe III | 28 |
| 2.4 I Laboratori BSL-Farmaceutici | 30 |
| 3. Condizioni di Progetto..... | 35 |
| 3.1 Livelli di pressione..... | 35 |
| 3.1.1 Airlock..... | 36 |
| 3.1.2 Layout con salti di pressioni | 37 |
| 3.2 Condizioni ambientali – Temperatura e UR | 38 |
| 3.3 Portata di ventilazione | 39 |
| 3.4 Velocità dell'aria in ambiente..... | 40 |
| 4. Tipologie impiantistiche | 41 |
| 4.1 Schema impiantistico tipico..... | 42 |
| 5. Il Progetto..... | 44 |
| 5.1 Inquadramento..... | 44 |
| 5.2 Studio di fattibilità | 45 |
| 5.3 Il Laboratorio | 48 |
| 5.4 Layout della distribuzione delle pressioni | 48 |
| 6. Impianto HVAC..... | 49 |
| 6.1 La valutazione delle portate | 49 |
| 6.1.1 Portata per ventilazione..... | 49 |

| | | |
|---|---|----|
| 6.1.2 | La portata sottoporta..... | 50 |
| 6.1.3 | Portata d'aria aspirata dalle cappe di sicurezza..... | 51 |
| 6.1.4 | Portata d'aria per bilanciare il carico termico..... | 52 |
| 6.2 | Trasformazione dell'aria | 54 |
| 6.3 | Diffusione dell'aria | 60 |
| 6.4 | P&ID e logiche di controllo e regolazione | 63 |
| 6.5 | Unità di trattamento Aria e Estrazione | 66 |
| 6.6 | Strumentazione impianto | 67 |
| 7. | Conclusioni..... | 68 |
| ALLEGATO I – Principi della filtrazione dell'aria e la normativa di riferimento | | 1 |
| Classificazione e tipologie dei filtri..... | | 3 |
| I filtri d'aria per ventilazione generale..... | | 3 |
| I filtri ad alta efficienza | | 5 |
| Alloggiamento filtri..... | | 8 |
| ALLEGATO II - Espulsione dell'aria esausta attraverso il camino..... | | 1 |
| BIBLIOGRAFIA e RIFERIMENTI | | 1 |

1. Generalità sui Laboratori

Quando si parla di laboratorio si intende un locale o edificio fornito con diversi tipi di apparecchi, in genere, per studi, ricerche ed esperimenti tecnici o scientifici. Questa tipologia di strutture, anche se facenti parte di un'unica categoria, possono assumere caratteristiche molto diverse tra loro che dipendono dal tipo di attività svolta e dal prodotto manipolato al loro interno.

In generale si possono suddividere i laboratori in due grandi categorie:

- Classificati
- Non classificati.

A loro volta quelli classificati si dividono in tre macrocategorie:

- **Laboratori a Contenimento Biologico - BSLs**
 - Laboratori Farmaceutici
 - Laboratori Ospedalieri
 - Laboratori Militari
- **Laboratori Chimici**
 - Laboratori di Controllo Qualità/Produzione/R&S
 - Laboratori di Analisi
 - Laboratori di Ricerca/Didattica
- **Laboratori GMP**
 - Camere Bianche
 - Laboratori Farmaceutici

Lo scopo principale nei Laboratori GMP è quello di proteggere il prodotto. La logica è quella di mantenere l'ambiente in sovrappressione per evitare infiltrazioni e filtrare in modo assoluto l'aria in mandata.

Nei Laboratori Chimici, invece, l'obiettivo principale è quello di proteggere il personale da eventuali vapori tossici che si possono sprigionare nella manipolazione di prodotti chimici ma anche l'ambiente esterno. Si mantiene il laboratorio in leggera depressione per evitare esfiltrazioni.

Nei laboratori BSL lo scopo è sempre quello di proteggere gli operatori e l'ambiente esterno ma la normativa è più stringente in quanto si manipolano microrganismi infettivi e contagiosi. Si crea una notevole depressione rispetto agli ambienti adiacenti per evitare esfiltrazioni e si usano filtri assoluti sull'aria espulsa.

1.1 I Laboratori BSL

Il laboratorio oggetto di studio di questo lavoro di tesi rientra nella categoria “*Laboratori a contenimento biologico in cui si manipolano agenti infettivi*”.

In questo tipo di laboratori si svolgono prevalentemente attività di studio, ricerca e diagnostica.

Il nome “a contenimento biologico” deriva proprio dallo scopo principale di questa tipologia di laboratori che è quello di essere un luogo sicuro in cui operare con agenti microbiologici infettivi, sia per gli operatori che verso l’ambiente esterno, creando un ambiente confinato.

Un concetto chiave che riguarda i laboratori BSL ed in generale anche ad altre tipologie, riguarda la finalità dell’impiantistica installata al loro interno. Infatti, nella maggior parte dei casi, quando si parla di impianti HVAC si pensa all’obiettivo finale di creare una condizione di comfort termo-igrometrico all’interno degli ambienti. In questo caso invece, non si parla di un’impiantistica di comfort ma di *sicurezza*; l’obiettivo dell’impianto, infatti, è quello di assicurare un livello di protezione aggiuntivo; di creare un ambiente sicuro, a volte anche a discapito del comfort termo-igrometrico.

1.2 Legislazione e linee guida

La *Legislazione* di riferimento è costituita dal *Decreto Legislativo 9 aprile 2008 n. 81* in materia di tutele della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro ed in particolare dal *TITOLO X “Esposizione ad agenti biologici”* dello stesso decreto, recepimento della direttiva europea 54/2000/EC che definisce le linee guida ed i contenuti minimi per i lavoratori esposti a questo tipo di rischio, in riferimento alla classificazione di appartenenza degli agenti biologici pericolosi.

La *Norma* UNI EN 12128 “*Biotechnologie - Laboratori di ricerca, sviluppo e analisi - Livelli di contenimento di laboratori microbiologici, aree di rischio, situazioni e requisiti fisici di sicurezza*”, descrive e definisce i vari livelli di biocontenimento per i laboratori e tutte le caratteristiche fisiche e strumentali che devono possedere tali laboratori.

La principale linea guida è il Manuale dell’Organizzazione Mondiale della Sanità, nella versione italiana “*Manuale di Sicurezza nei laboratori - Edizione Italiana - AIREPSA, ISPEL*”.

Un importante riferimento tecnico è il: “*Laboratory Design Guide - Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems (2nd Edition) – ASHRAE*”.

Altre normative di riferimento verranno menzionate durante la trattazione degli argomenti.

1.3 Classificazione dei microrganismi

I microrganismi infettivi sono classificati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità in quattro gruppi di rischio che vanno da 1 a 4, secondo un ordine crescente di pericolosità.

Il criterio di classificazione dipende da:

- Capacità infettiva;
- Capacità di produrre malattia a seguito del contagio;
- Facilità di contaminazione e diffusione;
- Disponibilità di cure e trattamenti per prevenire e curare la malattia.

Tabella 1 - Classificazione dei microrganismi infettivi per gruppo di rischio.

Gruppo di rischio 1 (*nessun rischio, o basso rischio individuale e collettivo*)

Un microrganismo che difficilmente è causa di malattia nell'uomo o negli animali.

Gruppo di rischio 2 (*moderato rischio individuale, basso rischio collettivo*)

Un patogeno che può causare malattia nell'uomo o negli animali, ma che difficilmente pone un serio pericolo per il personale di laboratorio, la collettività, il bestiame o l'ambiente. L'esposizione in laboratorio può causare infezione grave, esistono misure preventive e terapie efficaci ed il rischio di diffusione dell'infezione è limitato.

Gruppo di rischio 3 (*elevato rischio individuale, basso rischio collettivo*)

Un patogeno che di solito è causa di grave malattia nell'uomo o negli animali ma che normalmente non si trasmette da un individuo infetto ad un altro. Esistono misure preventive e terapie efficaci.

Gruppo di rischio 4 (*elevato rischio individuale e collettivo*)

Un patogeno che usualmente provoca gravi malattie nell'uomo o negli animali e che può essere trasmesso da un individuo all'altro, per via diretta o indiretta. Non sono disponibili efficaci misure preventive o terapie.

1.4 Classificazione dei laboratori

Per poter lavorare con questi microrganismi classificati, si deve disporre di laboratori a contenimento biologico i quali permettono di operare in sicurezza.

È stata quindi stabilita una classificazione per assegnare ai laboratori a contenimento biologico un Livello di Biosicurezza (BioSafety Level – BSL) da 1 (contenimento minimo) a 4 (contenimento massimo).

Questa tiene conto delle caratteristiche del laboratorio, delle attrezzature disponibili, del rischio associato alle attività e delle procedure ritenute necessarie per lavorare con agenti appartenenti ai vari gruppi di rischio.

Tabella 2 - Gruppi di rischio per Livello di Biosicurezza

| Gruppo | Livello di Biosicurezza | Tipo di Laboratorio | Pratiche | Attrezzature |
|--------|-----------------------------------|------------------------------------|---|--|
| 1 | Base Livello 1 | Insegnamento di base, ricerca | Buona pratica di laboratorio | Nessuna, banco da lavoro |
| 2 | Base Livello 2 | Diagnostica di base, ricerca | Buona pratica di laboratorio più Dispositivi di protezione Individuali (DPI) e segnale di pericolo | Banco da lavoro più Cappe di sicurezza per le procedure che producono aerosol |
| 3 | Contenimento Livello 3 | Diagnostica specialistica, ricerca | Come Livello 2 più DPI speciali, accesso controllato, ventilazione senza ricircolo | Cappe di sicurezza per tutte le procedure |
| 4 | Massimo contenimento Livello 4 | Patogeni pericolosi | Come Livello 3 più ingresso autorizzato, doccia di decontaminazione, adeguato sistema di smaltimento dei materiali monouso come rifiuti | Cappe di sicurezza di classe III (glove-box) o Tute pressurizzate con Cappe di classe II, più autoclave passante e sistema di ventilazione con filtri assoluti |

Questa tabella però, non fornisce una corrispondenza univoca tra gruppo di rischio associato al microrganismo e il livello di contenimento del laboratorio nel quale può essere trattato. Infatti, come citato nel D.lgs. 81/08 e nel “Manuale di Sicurezza nei laboratori Edizione Italiana - AIREPSA, ISPESL”:

“L’assegnazione di un dato livello di Biosicurezza per le attività di laboratorio con uno specifico microrganismo deve derivare da una attiva valutazione del rischio, piuttosto che essere fatta automaticamente in base al solo gruppo di rischio cui l’agente patogeno appartiene. L’assegnazione deve tener conto del microrganismo usato così come delle specifiche lavorazioni da svolgere, delle strutture e attrezzature di cui si dispone e delle pratiche operative e procedure necessarie per lavorare in sicurezza. Per esempio, un agente assegnato al gruppo di rischio 2 in genere richiede strutture, attrezzature, pratiche di laboratorio e procedure per la conduzione del lavoro in sicurezza con livello di Biosicurezza 2. Tuttavia, per le attività nelle quali si producono aerosol molto concentrati, potrebbe essere più indicato il livello di Biosicurezza 3 che assicura un maggiore contenimento.”

Un laboratorio con livello di Biosicurezza 3 (BSL3), è dunque un laboratorio di contenimento progettato e fornito di dotazioni per lavorare con microrganismi del Gruppo di Rischio 3 e con elevati volumi o concentrazioni di microrganismi del Gruppo di Rischio 2 che implicano un rischio di diffusione tramite aerosol.

2. Caratteristiche dei Laboratori BSL

- ALLEGATO XLVII del Decreto legislativo 81/08 “Specifiche sulle misure di contenimento e sui livelli di contenimento”
- Manuale di Sicurezza nei laboratori - AIREPSA, ISPESL;
- Norma UNI EN 12128 “Biotecnologie - Laboratori di ricerca, sviluppo e analisi - Livelli di contenimento di laboratori microbiologici, aree di rischio, situazioni e requisiti fisici di sicurezza”.

BSL1

- *PRESCRIZIONI E REQUISITI DI PROGETTAZIONE GENERALI:*
 - Le pareti, i soffitti e i pavimenti e le superfici dei banconi (ISO 4211) devono essere lisci, facili da pulire, impermeabili ai liquidi e resistenti agli agenti chimici e ai disinfettanti normalmente usati nel laboratorio.
 - In ogni stanza devono essere presenti attrezzature per lavaggio delle mani, se possibili con acqua corrente, per il lavaggio delle mani, possibilmente vicino alle porte di uscita.
 - Le porte devono avere pannelli trasparenti, adeguata certificazione antincendio ed essere preferibilmente a chiusura automatica.
 - Devono essere previsti sistemi di sicurezza per la prevenzione e gestione di incendi ed emergenze elettriche, una doccia di emergenza e attrezzature per il lavaggio degli occhi.
 - L'illuminazione deve essere conforme alla ISO 8995.
 - È essenziale avere una fornitura sicura di acqua di buona qualità. Non devono esistere interconnessioni tra le forniture di acqua per il laboratorio e quelle di acqua potabile. È opportuno montare un dispositivo anti-riflusso a protezione del sistema idrico pubblico.
 - La fornitura di energia elettrica ed il sistema di illuminazione di emergenza devono essere adeguati ed affidabili, per permettere l'uscita in sicurezza dal laboratorio in caso di necessità. Sarebbe ideale avere un generatore di emergenza o linea privilegiata per le attrezzature essenziali come incubatori, cappe di Biosicurezza, congelatori, ecc., o per la ventilazione di gabbie animali.
 - Deve esserci uno spazio sufficiente per ogni lavoratore (appendice A):
 - a) un lavoratore, senza passaggio: da 975 mm a 1200 mm;
 - b) un lavoratore e spazio di passaggio: da 1050 mm a 1350 mm;
 - c) spazio di passaggio: da 900 mm a 1500 mm;
 - d) due lavoratori, schiena contro schiena, senza passaggio: da 1350 mm a 1500 mm

e) due lavoratori, schiena contro schiena, e spazio di passaggio: da 1650 a 1950 mm.

- Autoclave per smaltimento rifiuti non richiesta.
- Cabina di sicurezza biologica non richiesta (se richiesta conforme a UNI 12469).

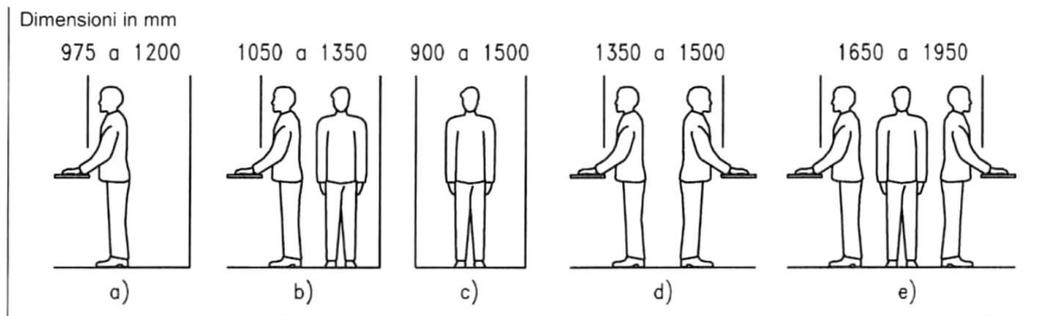


Figure 2.1 -Spazio richiesto tra superficie di lavoro e/o attrezzatura. (Da UNI EN 12128)

BSL2

Tutte le precedenti prescrizioni più:

- Le zone di pericolo biologico per i laboratori PCL2 devono essere etichettate in modo chiaro e permanente all'esterno.
- Il laboratorio deve essere separato dalle stanze adiacenti tramite porte. Non deve essere una zona di passaggio comune. Deve esserci una finestra di osservazione o una struttura equivalente.
- Lavandino con rubinetti attivabili senza utilizzo delle mani vicino all'uscita del laboratorio.
- Attrezzature per disinfezione delle mani.
- Se ventilato meccanicamente bisogna mantenere flusso entrante e flusso verso esterno. Aria in entrata non contaminata da quella di scarico.
- Se valutazione del rischio indica possibile disinfezione del laboratorio, esso deve poter essere sigillato. In questo caso, bisognerebbe assicurare che sia possibile disinfettare adeguatamente tutti i sistemi di ventilazione associati.
- Se è presente un'autoclave, deve trovarsi nello stesso edificio del laboratorio.

BSL3

Tutte le precedenti prescrizioni più:

- Accesso riservato e controllato con porte munite di serratura.
- Finestra d'ispezione raccomandata.

- Sterilizzazione di indumenti/strumenti di lavoro/rifiuti.
- Inattivazione del materiale che deve essere trattato in laboratori con biocontenimento inferiore.
- È consigliato prevedere mezzi per mantenere una pressione negativa per evitare la fuoriuscita di microrganismi.
- Deve essere presente un sistema che segnali anomalie inaccettabili nella pressione dell'aria.
- Tutta l'aria estratta deve essere scaricata attraverso filtri HEPA. "(Se l'aria di scarico deve essere riciclata in qualsiasi modo o se i condotti di scarico si congiungessero con altri condotti, bisognerebbe usare sistemi di filtrazione HEPA duplicati, ciascuno verificato indipendentemente; qualsiasi sistema di questo tipo dovrebbe essere discusso con la competente autorità di sicurezza)".
- Se il flusso d'aria entrante è fornito meccanicamente, i ventilatori di ingresso e scarico dovrebbero essere interbloccati per prevenire una pressione positiva del laboratorio rispetto alle zone confinanti.
- Laboratorio e sistemi di ventilazione di scarico devono poter essere sigillati per disinfezione.
- Deve essere presente un airlock che separa il laboratorio dalla zona non contaminata e le porte dell'airlock devono essere interbloccate. Può essere previsto un pannello a sfondamento per emergenza.
- Deve essere presente una cabina di sicurezza microbiologica (UNI 12469).
- Se strumenti o attrezzature critiche (per esempio il mantenimento di pressione negativa flusso d'aria entrante) devono poter continuare a operare in assenza di elettricità, deve essere presente un sistema di alimentazione di emergenza.
- Deve essere presente un'autoclave per la disinfezione dei rifiuti. È suggerito l'uso di un'autoclave munita di porte doppie interbloccate, con carico nel laboratorio BSL3 e scarico all'esterno.
- Possono essere necessarie docce chimiche in uscita dal laboratorio.
- Deve esserci una struttura per la sterilizzazione di tutti i liquidi di scarico, incluse le docce. (es. la neutralizzazione degli scarichi ottenuta tramite serbatoio, trattamento termico o disinfezione chimica. Raccomandato evitare sistemi di drenaggio dei pavimenti. (facoltativo per D.lgs).
- È consigliabile l'installazione di allarmi uditivi o chiaramente visibili per avvisare il personale di eventuali guasti al sistema HVAC e anomalie inaccettabili nella pressione dell'aria.

2.1 Struttura del laboratorio

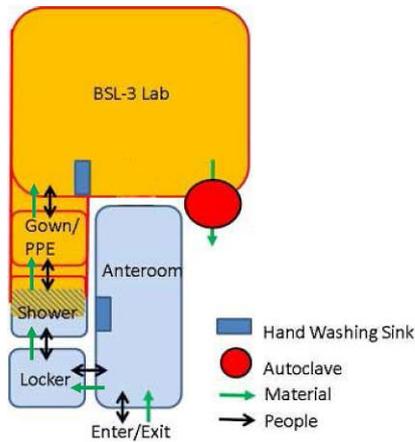
La movimentazione di personale, materiali, attrezzature e rifiuti all'interno e all'esterno della zona di contenimento richiede, come si è visto, l'uso di anticamere per separare fisicamente le aree di laboratorio da quelle comuni. Le anticamere devono essere progettate anche per accogliere strumenti per riporre i DPI e gli indumenti richiesti.

Questo passaggio deve essere organizzato con due serie di porte a chiusura automatica. Le porte dell'anticamera devono essere interbloccate per impedire l'apertura simultanea delle porte tra il corridoio esterno e le aree di contenimento. Gli interblocchi di accesso, ove presenti, devono essere dotati di un comando manuale da utilizzare in caso di emergenza. È necessario un dispositivo di indicazione visiva per verificare il flusso d'aria direzionale e confermare il corretto funzionamento dei controlli tecnici che forniscono flusso d'aria direzionale nella zona di contenimento. Il flusso d'aria direzionale è richiesto dal corridoio esterno nelle anticamere e dall'anticamera nell'area di contenimento.

Esistono molte varianti di progettazione che soddisfano questo requisito. I fattori che devono essere considerati includono:

- Volume di produttività: la superficie delle anticamere deve essere progettate per adattarsi al numero di dipendenti che utilizzano la struttura. Ciò include sia il transito normale sia l'uscita di emergenza. I fattori principali da considerare sono il tempo necessario per indossare e togliere i DPI, e quello per la decontaminazione prima dell'uscita, dove per decontaminazione si intende il cambio di vestiario e l'eventuale doccia decontaminante.
- Docce: la valutazione del rischio può richiedere l'uso di docce pass-through nella sequenza esistente. Quando non richiesto, si dovrebbe prendere in considerazione la predisposizione per l'aggiunta futura
- Decontaminazione: le anticamere possono ospitare autoclavi e camere di fumigazione utilizzate per decontaminare materiali e attrezzature da rimuovere dalla zona di contenimento. In tal caso, è necessario considerare anche lo spazio necessario per alloggiare e riparare le attrezzature e conservare i carrelli da lavoro. I lavelli per le mani, necessari all'uscita del laboratorio, possono essere richiesti anche quando si indossano e rimuovono i guanti.

Di seguito sono rappresentati possibili configurazioni che rispettano le caratteristiche necessarie ad un laboratorio classificato BSL3.



Schema a blocchi che rappresenta i vari ambienti ed evidenzia i vari percorsi di persone e materiali. Vengono evidenziati gli elementi chiave che necessita questa tipologia di laboratori.



Figure 2.2 - Infografica "Rischio biologico nei laboratori" – INAIL

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) Due porte interbloccate (Airlock) 2) Accesso controllato 3) Doccia personale 4) Norme di comportamento e procedure di emergenza 5) Lavandino | <ul style="list-style-type: none"> 6) Scarico a tenuta stagna 7) Cappa di sicurezza biologica 8) Dispositivi di protezione individuale 9) Banchi di lavoro 10) Autoclave |
|---|---|

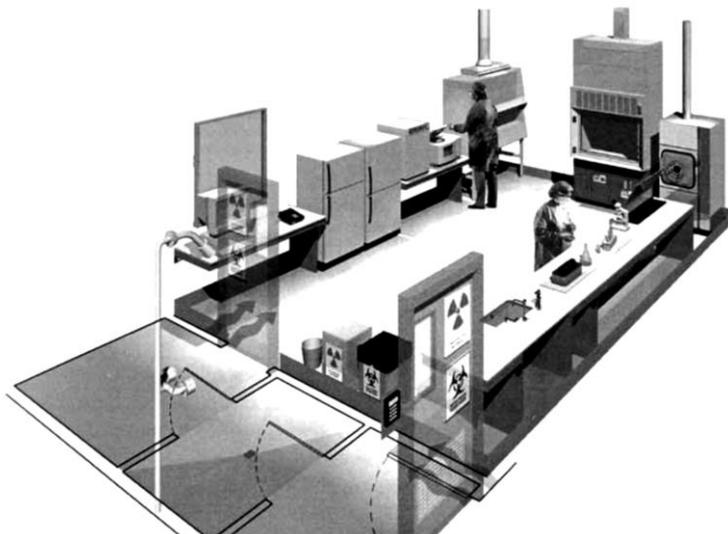


Figure 2.3 - Laboratorio BSL 3. (immagine di CUH2A, Princeton, NJ, USA)

Configurazione di un laboratorio BSL3 con la strumentazione tipica. Vi si accede attraverso due anticamere e come si vedrà in seguito, controllando le pressioni nei vari locali viene creato un flusso d'aria entrante nel laboratorio per evitare possibili esfiltrazioni di microrganismi potenzialmente pericolosi.

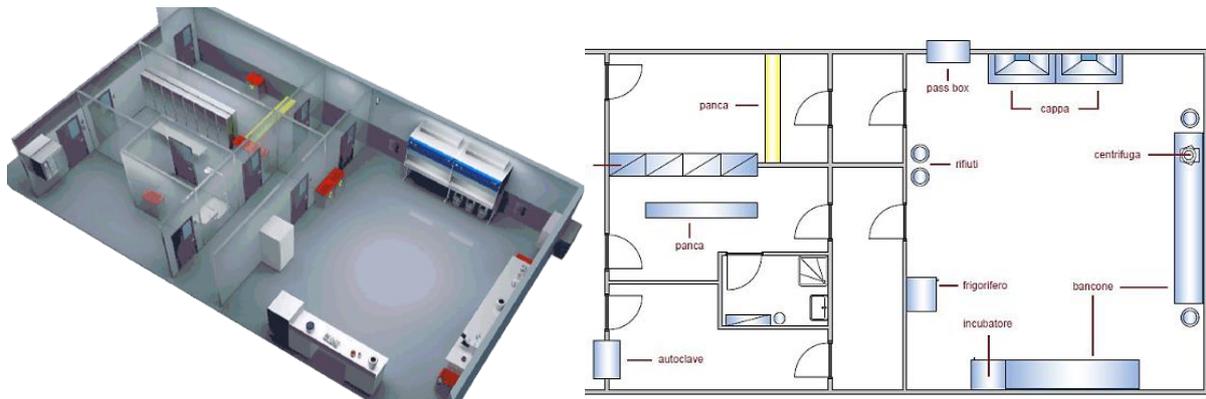


Figure 2.4 - Vista 3D e in pianta di un Laboratorio BSL3 (tratta da:
<http://www.biotechnologiesicurezza.it/biotechnologia/laboratorio-di-classe-3>)

2.2 Attrezzature di Laboratorio

La scelta delle attrezzature viene fatta in seguito alla valutazione del rischio biologico delle operazioni che si andranno a svolgere all'interno del laboratorio.

Le più frequenti attrezzature presenti in un laboratorio BSL3 sono:

- le *cappe di sicurezza biologica*, fondamentali per la sicurezza degli operatori, costituiscono il contenimento primario del laboratorio.
- Le *autoclavi*, utili alla sterilizzazione sia di materiale infetto destinato al riutilizzo che di rifiuti infetti. Nei laboratori a contenimento biologico e in camere bianche è solito installare le autoclavi "passanti". Con questa tipologia è possibile trasferire vari oggetti che necessitano la sterilizzazione dal locale "infetto" a quello "pulito" attraverso l'autoclave, posta a cavallo tra i due ambienti e dotata di doppia porta interbloccata. Si evita così qualsiasi contatto del materiale appena sterilizzato con l'ambiente "sporco".
- gli *incubatori* mantengono i parametri ambientali in condizioni ottimali per favorire la crescita cellulare
- le *centrifughe*: utili ad accelerare la separazione di corpi a diversi
- I *pass-box*, involucri ermetici con due sportelli interbloccati posti a cavallo tra il laboratorio e altri ambienti, per trasferire comodamente oggetti al di fuori del laboratorio mantenendo la differenza di pressione.

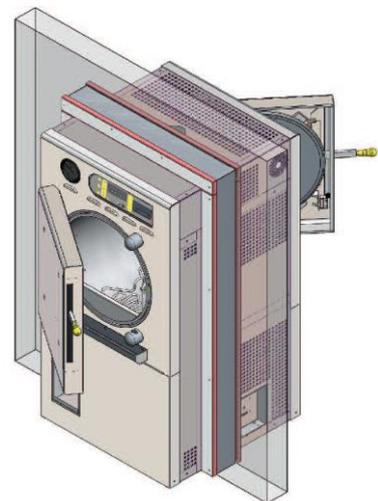


Figure 2.5 - Autoclave passante

- I *bracci aspiranti*, per le lavorazioni con esalazioni o fumi senza rischio biologico, aspirano il fluido inquinante il più vicino possibile alla zona di lavoro riducendo al minimo l'esposizione dei lavoratori agli agenti inquinanti. Sono dotati di una serranda manuale di apertura/chiusura.

2.3 Le cappe di sicurezza biologica (BSCs)

Costituendo un elemento chiave per la protezione e contenimento le cappe di sicurezza biologica hanno bisogno di una trattazione più approfondita.

Costituiscono, insieme ai DPI (Dispositivi di Protezione Individuale) la protezione contro il contagio degli operatori di laboratorio, il primo livello di contenimento contro la diffusione di aerosol e schizzi infetti che possono essere generati durante la lavorazione di materiale contenente microrganismi infettivi e una protezione per il prodotto stesso.

Il problema principale è causato dalla generazione di aerosol (particelle con diametro inferiore a 5 µm) e piccole goccioline (5-100 µm) che può avvenire ogni qual volta si muove un liquido e che, essendo invisibili all'occhio umano, possono essere inalate o contaminare altri materiali presenti sul piano di lavoro. L'utilizzo di cappe si è rivelato particolarmente efficace nel ridurre questo rischio grazie alla presenza di un filtro HEPA sull'aria estratta e su quella ricircolata (in alcuni casi).

La norma di riferimento è la **UNI EN 14175** "Cappe di aspirazione" che fissa i requisiti di sicurezza e di prestazione per tutte le cappe di aspirazione immesse sul mercato comunitario.

UNI EN 14175-1:2004 - Vocabolario

UNI EN 14175-2:2004 - Requisiti di sicurezza e di prestazione

UNI EN 14175-3:2019 - Metodi per le prove di omologazione

UNI EN 14175-4:2005 - Metodi di prova in loco

UNI EN 14175-5:2007 - Raccomandazioni per l'installazione e la manutenzione

UNI EN 14175-6:2006 - Cappe di aspirazione a volume d'aria variabile

UNI EN 14175-7:2012 - Cappe chimiche per alta temperatura e carica acida

Il costruttore, per verificare la sicurezza delle cappe biologiche, fa riferimento alla **UNI EN 12469:2001** "Biotecnologie - Criteri di prestazione per le postazioni di sicurezza microbiologica". Quindi una cappa di sicurezza biologica, per essere immessa nel mercato europeo, deve essere conforme a questa normativa.

Per le cappe chimiche, che differiscono da quelle biologiche, si fa riferimento alla **UNI/TS 11710:2018** "Cappe per la manipolazione di sostanze chimiche - Valori limite per contenimento, velocità frontale e ricambi d'aria" che definisce valori limite di accettabilità per contenimento, robustezza, velocità frontale e numero di ricambi. Questa norma indica che la velocità media frontale dell'aria non deve mai scendere al di sotto di 0,3 m/s.

Altri standard internazionali di rilievo:

American Standard: **ANSI/NSF 49**

Australian Standard: **AS 2252**

Japanese Standard: **JIS K 3800**

Chinese Standard: **YY0569**

A seconda della logica di funzionamento, della percentuale di aria ricircolata e di altre caratteristiche, le BSC si suddividono in tre Classi differenti:

- Classe I
- Classe II
- Classe III

La scelta di una cappa dipende principalmente dalla classe di rischio dell'agente microbiologico trattato, dal tipo di esperimento e dalla protezione che si vuole fornire nei confronti del personale, ambiente o prodotto.

| Tipo di protezione | BSC da scegliere |
|--|---|
| Protezione degli operatori da microrganismi del Gruppo di rischio 1-3 | Classe I, Classe II, Classe III |
| Protezione degli operatori da microrganismi del Gruppo di rischio 4, glove-box laboratory (dove la cappa è a tenuta stagna e munita di guanti) | Classe III |
| Protezione degli operatori da microrganismi del Gruppo di rischio 4, (dove il personale indossa tute complete a tenuta pressurizzate) | Classe I, Classe II |
| Protezione del prodotto | Classe II, Classe III solo se è incluso un flusso laminare |
| Radionuclidi volatili/protezione chimica, minime quantità | Classe IIB1, Classe IIA2 espulsione dell'aria collegata all'esterno |
| Radionuclidi volatili/protezione chimica | Classe I, Classe IIB2, Classe III |

Tabella 3 Classificazione delle cappe di Biosicurezza (BSC) per tipo e grado di protezione.

La Tabella 3 e Figura 2.6 forniscono una prima indicazione sulla tipologia di cappa da utilizzare a seconda del rischio biologico e della protezione che si vuole fornire, che dovrà essere poi completata con una valutazione del rischio più approfondita.

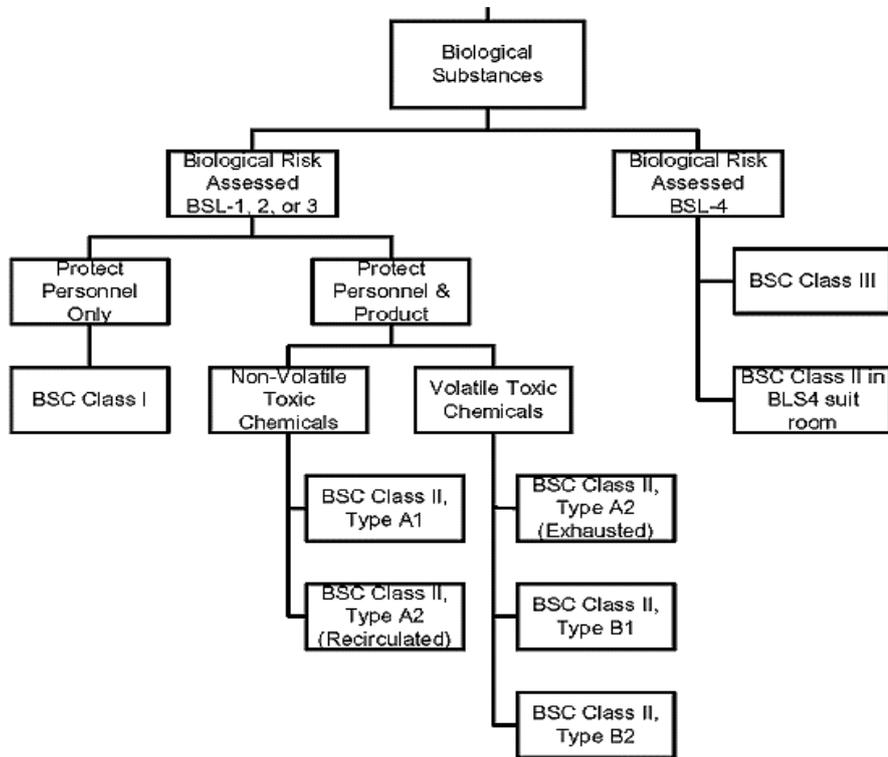


Figure 2.6 - Schematizzazione a blocchi della tipologia di cappa idonea per tipologia di utilizzo

2.3.1 Le Cappe di Classe I

Le cappe di **Classe I** sono caratterizzate da un flusso laminare d'aria entrante ad una velocità minima di 0.70m/s (0.38 per la NSF49) attraverso l'apertura frontale e uscente dalla parte superiore della cappa. Non vi è ricircolo e l'estrazione dell'aria può essere affidata ad un estrattore integrato oppure al sistema di aspirazione dell'edificio e di conseguenza anche il filtro HEPA può essere installato direttamente all'uscita della cappa o sugli estrattori dell'edificio. Deve essere presente un contatore delle ore di funzionamento per il controllo dell'efficienza dei filtri.

Queste cappe sono molto diffuse in quanto nonostante la loro relativa semplicità risultano efficaci nel proteggere l'operatore e l'ambiente. Non sono considerate affidabili per la protezione del prodotto in quanto l'aria in ingresso dall'apertura frontale, considerata non sterile, raggiunge direttamente il piano di lavoro.

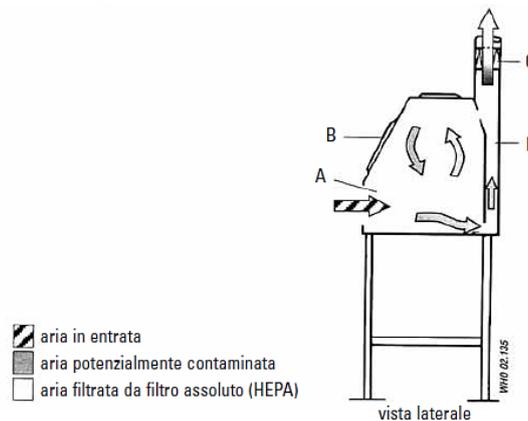


Figure 2.7 - Cappa di Biosicurezza Classe I

Riassunto caratteristiche:

Portata: variabile

Flusso laminare: orizzontale

Velocità frontale di aspirazione: US: min 0.38 m/s

EN: 0.7 – 1.0 m/s

Aria ricircolata: 0%

Aria espulsa: 100% - all'interno del laboratorio
 - all'esterno attraverso estrattori edificio
 - all'esterno attraverso estrattore cappa

Allarme di sicurezza per ventilazione non sufficiente

2.3.2 Le Cappe di Classe II

Le cappe di **Classe II** sono quelle maggiormente utilizzate nei laboratori BSL. Si differenziano dalle prime perché sono caratterizzate da un *flusso laminare discendente* (0.25 – 0.50 m/s) e, in quanto risolvono il problema della scarsa protezione del prodotto introducendo un sistema che permette all'aria di essere filtrata da filtri HEPA prima di raggiungere il piano di lavoro. Questa tipologia di cappe, offrono quindi una efficace protezione dell'operatore, dell'ambiente e del prodotto.

Si suddividono in *quattro sottoclassi* al variare di alcune caratteristiche costruttive e di funzionamento. Il canale di estrazione di queste cappe può essere o rigido* oppure aperto con un manicotto (Figura 2.11)

L'imbuto cattura tutta l'aria esausta della cappa più una percentuale di aria presente nel laboratorio che va dal 10% al 30%. Questo previene che ogni contaminazione gassosa in uscita dalla cappa finisca nel laboratorio. Il collegamento ad un sistema di condotti di estrazione permette anche che alcune cappe di sicurezza biologica siano utilizzate per lavorare con minime quantità di radionuclidi o sostanze chimiche tossiche volatili

* N.B.: la NSF49 non consente la canalizzazione diretta verso l'esterno per questa tipologia di cappa ma solo con manicotto.

1. Classe IIA1

La velocità del flusso entrante attraverso la superficie dell'apertura frontale deve essere maggiore o uguale a 0.7 m/s (per la UNI 12469). L'aria viene subito aspirata verso il basso, filtrata con filtri HEPA H14 che la rendono sterile e re-immessa nell'area di lavoro dall'alto verso il basso. Questo fa sì che si crei un flusso laminare discendente in grado di catturare ogni particella che si crea sul piano di lavoro e convogliarla nei filtri. Data la diversa area superficiale dei filtri, l'aria viene per il 70% fatta ricircolare e per il restante 30% espulsa. Non è adatta all'utilizzo per esperimenti con radionuclidi e prodotti chimici volatili tossici in quanto i filtri non sono in grado di fornire questo tipo di protezione.

L'aria espulsa dalla cappa di sicurezza biologica di Classe IIA1 può essere riciclata nell'ambiente o essere espulsa all'esterno dell'edificio attraverso un manicotto collegato ad uno condotto dedicato o attraverso il sistema di estrazione dell'edificio.

Il riciclo dell'aria nell'ambiente ha il vantaggio di abbassare i costi energetici poiché si evita il riscaldamento o raffreddamento di quella esterna.

Tuttavia, con l'introduzione dei miglioramenti tecnologici applicati alle cappe di Classe IIA2, questa tipologia è ritenuta obsoleta.

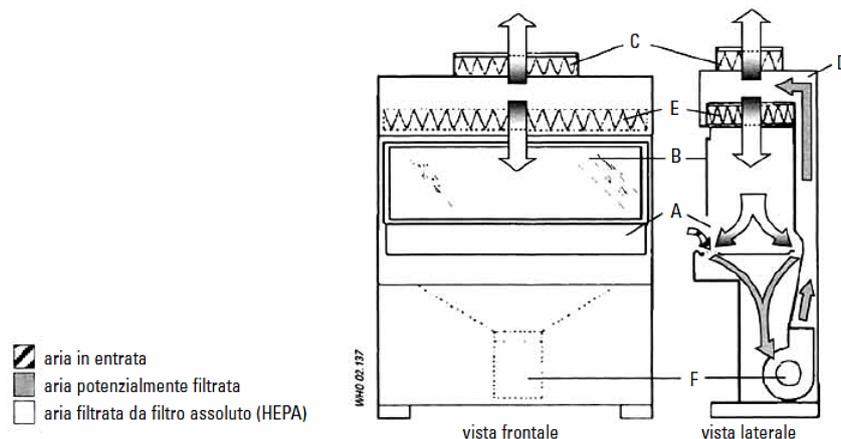


Figure 2.8 - Cappa di Biosicurezza Classe IIA1

Riassunto caratteristiche:

Portata: costante

Flusso: laminare verticale

Velocità frontale di aspirazione: US: min. 0.38 m/s

EN: min. 0.40 m/s

70 % ricircolata

30 % aria espulsa - all'interno del laboratorio

- all'esterno

N 2 stadi filtrazione H14. Sull'aria di ricircolo e sull'aria espulsa

2. Classe IIA2

La principale differenza rispetto alle cappe di classe IIA1 è che quelle di classe IIA2, hanno il plenum a pressione positiva contenente l'aria contaminata, circondato da un altro plenum a pressione negativa che lo separa dall'ambiente del laboratorio. In questo modo eventuali perdite del plenum con aria contaminata non si riverserebbero in ambiente ma sarebbero catturate in quello a pressione negativa. Questa caratteristica rende le cappe di classe IIA2 più sicure di quelle di classe IIA1.

Anche in questo caso l'aria in uscita dalla cappa di sicurezza biologica di Classe IIA2 può essere riciclata nell'ambiente o espulsa all'esterno.

Esperimenti con radionuclidi e prodotti chimici volatili tossici sono ammessi solo quando non c'è ricircolo nell'ambiente di laboratorio.

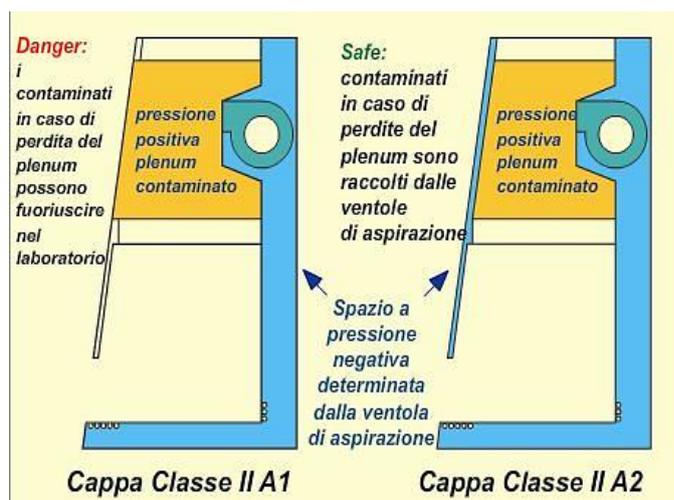


Figure 2.10 - Differenza costruttiva tra la A1 e A2

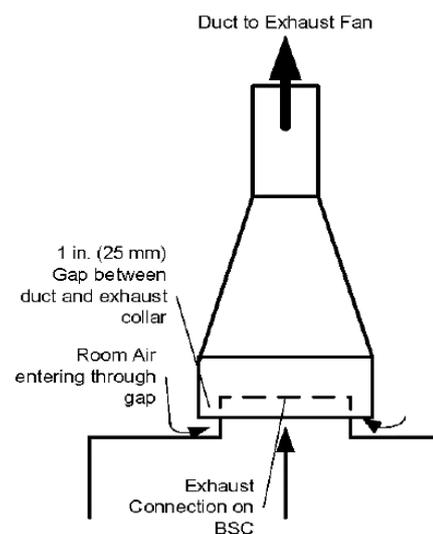


Figure 2.10 - Manicotto o Thimble

Riassunto caratteristiche:

Portata: costante

Velocità frontale di aspirazione: US: min. 0.51 m/s
EN: min. 0.40 m/s

70 % ricircolata

30 % aria espulsa - all'interno del laboratorio
- all'esterno*

N 2 stadi filtrazione H14. Sull'aria di ricircolo e sull'aria espulsa

2.3.3 Le Cappe di Classe III

Le cappe di **Classe III**, chiamate anche Isolatori o Glove-Box, forniscono il massimo grado di protezione per gli operatori e l'ambiente. Questa tipologia di cappe, infatti, è a completa tenuta di gas e la manipolazione del prodotto è possibile solo attraverso dei guanti predisposti sul fronte della cappa, senza venire direttamente a contatto con esso. È possibile introdurre il prodotto all'interno della cappa attraverso una doppia camera predisposta lateralmente. L'aria viene filtrata con un filtro HEPA in ingresso e doppio in uscita. Non vi è ricircolo all'interno della cappa e il 100% dell'aria esausta viene espulsa all'esterno.

Viene mantenuta una pressione negativa all'interno della cappa di almeno 120 Pa.

Anche nelle cappe di Classe III condotti e plenum sono mantenuti ad una pressione negativa o, vengono contenuti in condotte o plenum a pressione negativa, devono essere rigide e devono essere presenti dumpers a chiusura ermetica.

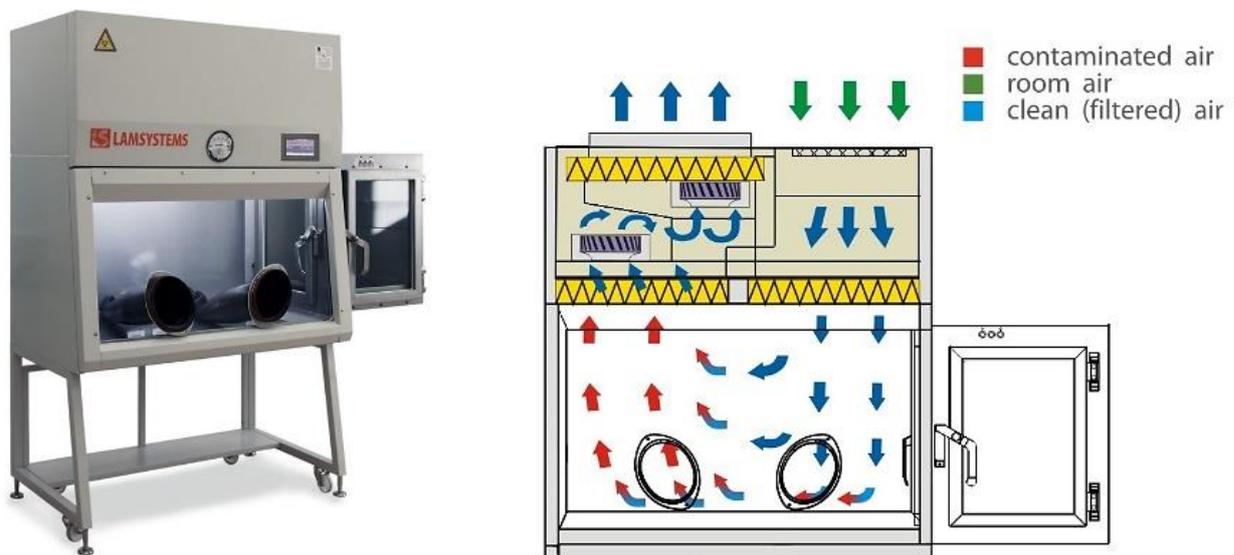


Figure 2.12 - Cappa di sicurezza di classe III / Glove box

Riassunto caratteristiche:

Portata: costante (dedicata, non preleva dal laboratorio)

Velocità aspirazione: tale da mantenere depressione di 120 Pa

100 % aria espulsa

0 % ricircolata

N 3 stadi filtrazione H14. Singolo in ingresso e doppio in uscita.

L'espulsione è canalizzata all'esterno.

Tabelle riepilogative delle caratteristiche principali delle cappe a contenimento biochimico e della velocità di aspirazione

| Class | Inflow Velocity (m/s) | Recycle Air (%) | Exhaust Air (%) | Control Plenum Surrounded by | Exhaust Alternatives | Biosafety Level |
|---------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| I | US:0.38 EN:0.70 | 0 | 100 | Outside Air | Inside room / Hard duct | 1, 2 & 3 |
| II Type A1 | US:0.38 EN:0.40 | 70 | 30 | Outside Air | Inside room / Thimble duct | 1, 2 & 3 |
| II Type A2 | US:0.50 EN:0.40 | 70 | 30 | Negative Plenum | Inside room / Thimble duct | 1, 2 & 3 |
| II Type B1 | US:0.50 EN:0.40 | 30 | 70 | Negative Plenum | Hard duct only | 1, 2 & 3 |
| II Type B2 | US:0.50 EN:NA | 0 | 100 | Negative Plenum | Hard duct only | 1, 2 & 3 |
| III | Closed: * >0.5"WC | 0 | 100 | Negative Plenum | Inside room / Hard duct | 1, 2, 3 & 4 |

Figura 2.13 - Caratteristiche generali delle cappe a contenimento biochimico. (tratta da: Laboratory Biosafety Manual. Second Edition. World Health Organization p.32)

| Class | Mean inflow velocity to achieve operator protection | Mean downflow velocity to achieve product protection |
|-------|---|--|
| I | > 0,7 m/s - 1,0 m/s | Not applicable |
| II | ≥ 0,4 m/s | 0,25 m/s - 0,50 m/s |
| III | ≥ 0,7 m/s with one glove removed | Not applicable |

Figura 2.14 - Velocità del flusso d'aria frontale e discendente per le tre classi di cappe biologiche. (tratta da: UNI EN-12469)

Velocità dell'aria secondo la ANSI/NSF 49:

| | Type A1 (figure E2) | Type A2 (figure E2) |
|----------|---|---|
| inflow | Minimum 75 ft/min (0.38 m/s) Average | Minimum 100 ft/min (0.51 m/s) Average |
| downflow | Varies by model, typically 50-80 ft/min (0.25-0.40 m/s) average | Varies by model, typically 50-80 ft/min (0.25-0.40 m/s) average |
| | Type B1 (figure E4) | Type B2 (figure E5) |
| inflow | Minimum 100 ft/min (0.51 m/s) Average | Minimum 100 ft/min (0.51 m/s) Average |
| downflow | Varies by model, typically 50-80 ft/min (0.25-0.40 m/s) average | Varies by model, typically 50-80 ft/min (0.25-0.40 m/s) average |

Figura 2.15 - Velocità del flusso d'aria frontale e discendente per le BSCs II (tratta da: ANSI/NF49)

2.4 I Laboratori BSL-Farmaceutici

I microrganismi infetti classificati, in alcuni casi, sono utilizzati in processi industriali per la produzione di prodotti destinati al consumo umano: per la produzione di alcuni farmaci o vaccini, ad esempio.

In queste aree è richiesta l'applicazione delle norme GMP e quelle sulla biosicurezza in modo congiunto.

Le GMP (Good Manufacturing Practices) sono una serie di norme che assicurano che un prodotto venga creato regolarmente e in modo controllato con appropriati standard di qualità. Questi standard sono richiesti quando è necessaria l'autorizzazione per immettere un prodotto sul mercato ed il loro obiettivo è quello di proteggere l'utilizzatore finale del prodotto.

Il grado di pulizia dell'aria viene classificato secondo due principali standard in diversi livelli che stabiliscono la massima quantità di particelle presenti in ambiente:

| EU Grades | Cleanroom ISO 14644-1 |
|---------------------------------|---|
| Grade A: High risk | ~ ISO 4.8 |
| Grade B: Background for Grade A | ~ ISO 5 |
| Grade C: Less critical | ~ ISO 7 at rest ~ ISO 8 in operation |
| Grade D: Less critical | ~ ISO 8 |

Biosicurezza: insieme di procedure, sistemi di contenimento e tecnologie costruttive atte, sia a minimizzare il rischio di fuoriuscita di microrganismi pericolosi al di fuori del laboratorio, che a proteggere gli operatori al suo interno.

In queste due normative troviamo molti punti concordanti, che possono combinarsi senza difficoltà, ed altri che conducono a soluzioni opposte e che per essere congiunti hanno bisogno di uno studio più approfondito. In questi casi è importante capire perché le pratiche GMP e quelle sulla biosicurezza vanno in conflitto e valutando i vari fattori di rischio associati si possono adottare scelte ottimali e razionali per la progettazione e costruzione.

Un aspetto importante da considerare è la dimensione dell'ambiente. Solitamente, quando si parla di laboratori a contenimento biologico ci si riferisce a strutture medio-piccole, invece, si parla spesso di grandi volumetrie e produzioni industriali nei casi in cui si devono combinare le GMP e la biosicurezza. Questo comporta maggiori rischi poiché possono esserci più

attrezzature che comportano rischi maggiori di incidenti (alte pressioni e temperature, maggiori potenze ecc).

Nei casi in cui le due linee guida entrano in conflitto, non esiste una regola che stabilisce quale delle due prevale. Solitamente le GMP hanno precedenza per bassi livelli di biosicurezza richiesti (BSL-1/2), mentre prevalgono quelle sulla biosicurezza quando questo rischio è alto (BSL-3/4).

La sinergia tra le GMP e la biosicurezza la troviamo nei seguenti punti:

- Obbligatorietà di una zona di produzione separata con accessi controllati
- L'addestramento del personale deve essere obbligatorio, documentato e periodico
- Il design della struttura deve facilitare le operazioni di pulizia
- Processi, attrezzature e strumentazioni devono essere validate
- DPI (Dispositivi di Protezione Individuale) devono essere obbligatori
- Tutte le operazioni svolte devono essere documentate.

GMP si concentrano sul prevenire la contaminazione incrociata e tenere gli inquinanti ambientali lontani dal prodotto. Nel GMP il flusso di produzione va da "sporco" a "pulito" e i materiali da lavorare che entrano nella struttura sono considerati sporchi ed il processo prevede vari step per "purificarlo"; il prodotto finito è quindi considerato "pulito".

La biosicurezza si concentra su mantenere gli agenti infettivi all'interno della struttura e proteggere gli operatori. Il flusso del prodotto, al contrario delle GMP, va da "pulito/non-infetto" a "sporco/infetto"

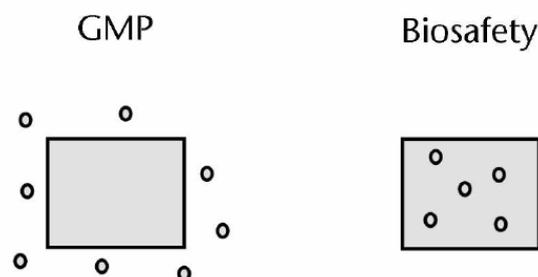


Figura 2.16 - Differenza concettuale tra le norme GMP e biosicurezza

I più comuni conflitti tra le norme GMP e quelle sulla biosicurezza si verificano nella progettazione dei seguenti sistemi:

Airlock

Il problema è la scelta del verso di apertura delle porte. Infatti, dal punto di viste delle GMP le porte dovrebbero aprirsi nel verso del locale a pressione maggiore, mentre per la biosicurezza verso il locale più grande, per ridurre al minimo le turbolenze.

Un altro aspetto riguarda il posizionamento e lo stoccaggio di quegli strumenti e accessori (lavandino per la pulizia delle mani, DPI, docce chimiche ecc) che la biosicurezza necessita nelle immediate vicinanze del locale di laboratorio mentre le GMP richiedono la non installazione nell'area di produzione. Il posizionamento di tali oggetti nell'airlock può essere una soluzione a questa discordanza.

Sistema di ventilazione

Il flusso d'aria deve essere rivolto verso l'aria contaminata; questo implica che tale zona deve essere circondata da un'altra area a pressione maggiore che crea una differenza di pressione ed un flusso entrante nel laboratorio.

Un flusso entrante si può creare in tre modi (Figura):

- Pressione assoluta negativa all'interno del laboratorio: è sicuramente il più sicuro dal punto di vista della biosicurezza; le GMP, invece, pur non vietandolo, non lo ritengono efficace per la protezione del prodotto.
- Pressione interna neutra e positiva esterna: è un compromesso fra i due.
- Pressione positiva interna e positiva, più alta, esterna: anche se crea un flusso entrante, per molti professionisti della biosicurezza non è ritenuta una soluzione accettabile, a differenza di quelli delle GMP che la ritengono valida.

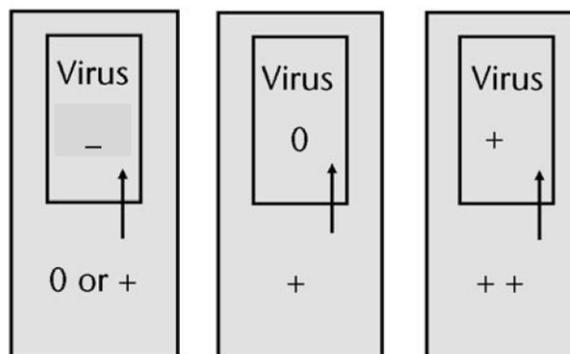


Figura 2.17 - Differenti possibilità per creare un flusso entrante

Esaminando queste soluzioni, si giunge alla conclusione che, in ogni modo, bisogna sempre garantire un flusso entrante nell'area contaminata.

È per questo necessario creare delle ridondanze nella ventilazione, premettendo che nella sala di produzione la ridondanza deve in ogni caso essere presente per garantire il continuo svolgimento delle attività.

La prima soluzione non necessita della ridondanza nella ventilazione esterna in quanto il fallimento di questo componente non comprometterebbe la differenza di pressione tra i due locali e quindi il flusso.

La seconda soluzione richiede un doppio ventilatore all'esterno. Se fosse presente il singolo ventilatore come nella prima soluzione, e questo si guastasse, non si garantirebbe più la differenza di pressione tra i due ambienti poiché si porterebbero entrambi a 0.

La terza soluzione ha bisogno della ridondanza del ventilatore esterno in maniera più significativa della precedente; in questo caso infatti, il fallimento del ventilatore esterno potrebbe la pressione nel laboratorio al di sotto di quella esterna, causando un'inversione del flusso molto pericolosa.

Si giunge alla conclusione che il primo scenario è sicuramente il più economico e il più sicuro dal punto di vista della biosicurezza ma presenta notevoli contraddizioni con le norme GMP. Questo problema potrebbe essere limitato creando ambienti ermetici in modo da evitare qualsiasi infiltrazione d'aria che garantirebbe anche la sicurezza per il prodotto.

Processo di pulizia

È una fase delicata che bisogna pianificare durante la progettazione iniziale. È importante studiare i flussi e rispettare le norme. Le GMP ma non la biosicurezza, specificano che i carrelli per le pulizie non possano essere risposti nell'area di produzione. È importante quindi prevedere un locale separato. Bisogna prevedere anche le autoclavi per la decontaminazione, non richieste nelle GMP.

GMP/BSL-3 Airflow / Differential pressure, DP

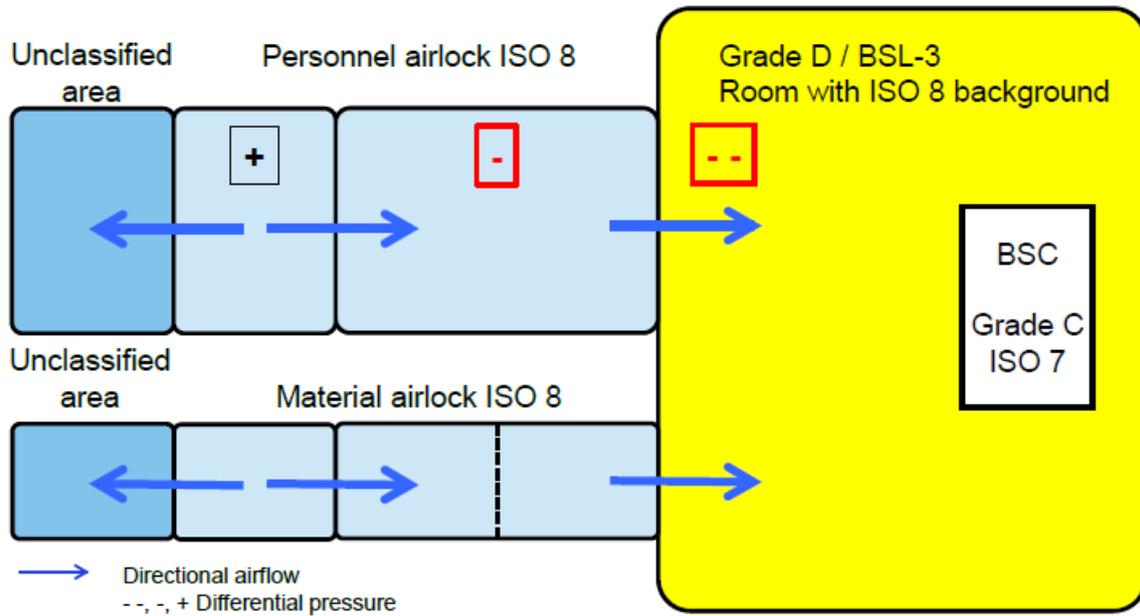


Figura 2.18 - GMP/BSL-3 Airflow / Differential pressure, DP

(tratta da Biosafety in Cleanroom/GMP Environments SBNet Applied Biosafety Meeting – Basler&Hofmann)

GMP/BSL-2 Airflow / Differential pressure, DP

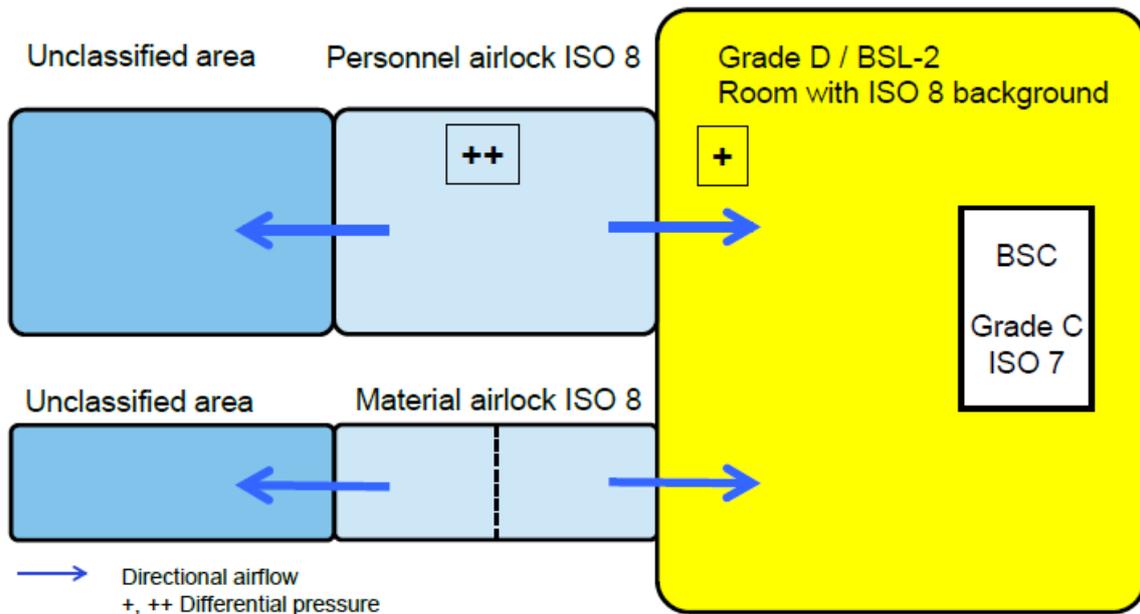


Figura 2.19 - GMP/BSL-2 Airflow / Differential pressure, DP

(tratta da Biosafety in Cleanroom/GMP Environments SBNet Applied Biosafety Meeting – Basler&Hofmann)

3. Condizioni di Progetto

Si descriveranno in questo capitolo le condizioni di progetto generali per i laboratori a contenimento biologico di livello 3. In particolare, è importante definire:

- La pressione negli ambienti
- Le condizioni ambientali di Temperatura e UR
- La portata d'aria necessaria per ventilazione
- La velocità dell'aria in ambiente

3.1 Livelli di pressione

Nei laboratori a contenimento biologico le cappe di sicurezza sono considerate il primo livello di contenimento. Il laboratorio in se si comporta invece come il livello di contenimento secondario. Questo è possibile grazie al mantenimento di una pressione negativa all'interno del laboratorio che permette di evitare esfiltrazioni e fuoriuscite dell'aria non desiderate. È importante che l'involucro sia costruito in una maniera appropriata che riduca al minimo le fessurazioni.

Le camere di compensazione antecedenti al laboratorio (dette Airlock), sono necessarie per mantenere stabile la pressione all'interno del laboratorio, evitando di creare troppe turbolenze all'apertura delle porte.

Uno studio ponderato delle pressioni nei vari locali premette di evitare che l'aria "contaminata" passi da un locale all'altro.

La logica di funzionamento, a seconda del risultato che si vuole ottenere prevede una diversa gestione delle pressioni: se non si vuole permettere la contaminazione dell'ambiente di lavoro allora quest'ultimo verrà tenuto in sovrappressione rispetto i locali adiacenti; se invece lo scopo è quello di non permettere all'aria (ritenuta contaminata) all'interno del laboratorio di uscire, allora si manterrà il locale in depressione. Nei laboratori a contenimento biologico, essendo l'obiettivo quello di creare un ambiente isolato dall'esterno, la logica è quella di mantenere il locale in depressione.

Il salto di pressione dai vari locali non è fissato da leggi o normative. La letteratura tecnica fornisce valori di che spesso variano in un range di 5-20 Pa.

14644-4

Alcuni esempi:

- L'ASHRAE Laboratory Design Guide - Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems (2nd Edition) nel capitolo 16 paragrafo "space pressurization and airflow" afferma

che l'involucro dovrebbe essere costruito in modo da permettere il mantenimento di una pressione negativa da 5 a 50 Pa.

- Il "Guidelines for Laboratory Design: Health, Safety, and Environmental Considerations, 4th Edition" - Louis J. DiBerardinis, Janet S. Baum, Melvin W. First, Gari T. Gatwood, Anand K. Seth, nel capitolo "Laboratory Layout" pagina 211 indica che gli airlock dovrebbero avere una differenza di pressione di 12.5Pa rispetto il corridoio, mentre il locali dove vengono manipolati microrganismi infettivi dovrebbero essere ad una pressione negativa di 37.5 Pa rispetto gli spazi esterni al laboratorio BSL3
- Il National Institutes of Health (NIH) nel "Design Requirements Manual (DRM)" nel capitolo "BSL-3 & ABSL-3 Biocontainment" pagina 420 afferma che il sistema di ventolazione deve essere progettato per mantenere una differenza di pressione minima di almeno 12.5 Pa tra le varie zone.
- Nella norma UNI 12128 viene indicato un esempio riguardante un laboratorio BSL4 in cui viene fissata la pressione del locale antecedente al laboratorio a -30 Pa e per quella del laboratorio a - 70 Pa.

3.1.1 Airlock

Come appena descritto, la pressione degli ambienti svolge un ruolo fondamentale nell'isolare i locali sensibili da quelli non a rischio. Quando due ambienti sono collegati attraverso una porta, all'apertura di quest'ultima si avrebbe in un primo momento un flusso d'aria che si muoverebbe dal locale a minore pressione verso quello a maggiore pressione; dopo pochi secondi le pressioni si eguaglierebbero e si potrebbe verificare il passaggio di aria contaminata da un locale all'altro.

Per evitare questo problema vengono installati degli ambienti di transizione chiamati "*Bussole di Isolamento*", "*Zone Filtro*" o "*Airlock*" che impediscono all'aria contaminata di diffondersi liberamente. Sono delle camere, dotate di due porte interbloccate fra loro, in cui viene mantenuta la stessa qualità dell'aria presente in laboratorio e viene impostata una differenza di pressione dagli ambienti confinanti tale da ottenere il risultato desiderato.

In particolare, ci sono tre tipi di airlock: transito, pozzo e bolla.

Negli Airlock di tipo "transito" si crea una sequenza di pressioni a cascata e si ha da un lato una pressione più alta e dall'altro una pressione più bassa. In questo modo si evita l'ingresso di aria non desiderata all'interno dell'ambiente controllato.

In quelli di tipo "pozzo" si mantiene una pressione inferiore ai due ambienti adiacenti in modo da creare una separazione dei due ambienti evitando l'ingresso di aria in entrambi i locali.

Negli Airlock di tipo “bolla” si mantiene una pressione superiore ad entrambi gli ambienti adiacenti andando a creare una vera e propria barriera al passaggio dell’aria.

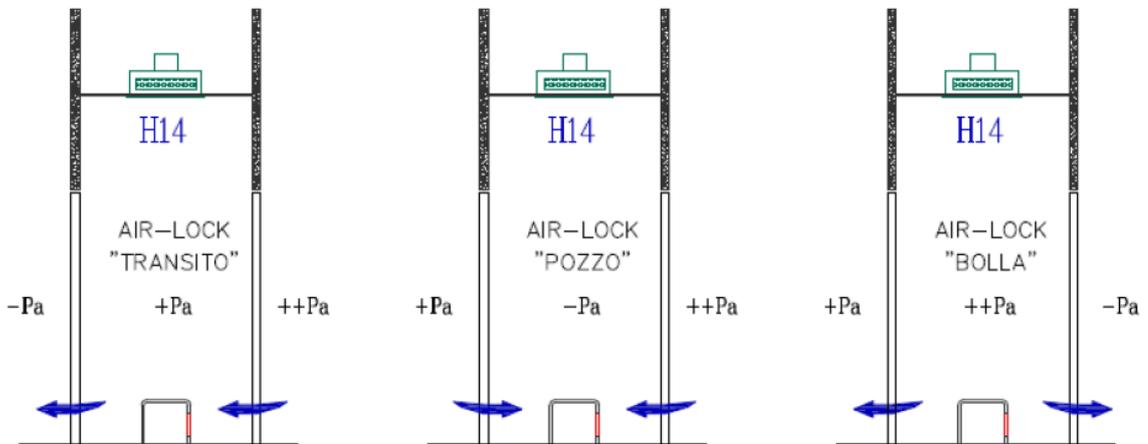


Figura 3.1 - Schematizzazione degli Airlock (IMP. MECC. OSPEDALI - PARTE 3 - HVAC LABORATORI – Matteo Bo)

La tipologia airlock più idonea per i laboratori a contenimento biologico è quella “transito”, poiché risulta essere la più sicura dato che il flusso d’aria è sempre entrante nel laboratorio e riduce al minimo la possibilità di esfiltrazioni potenzialmente contaminate.

3.1.2 Layout con salti di pressioni

Il layout di un tipico laboratorio BSL3 avanzato possiamo schematizzarlo come in figura 3.2 si può notare la via d’ingresso separata da quella d’uscita, una doccia chimica nel bagno in uscita, uno spazio per lo stoccaggio materiali e la presenza della tipica strumentazione da laboratorio.

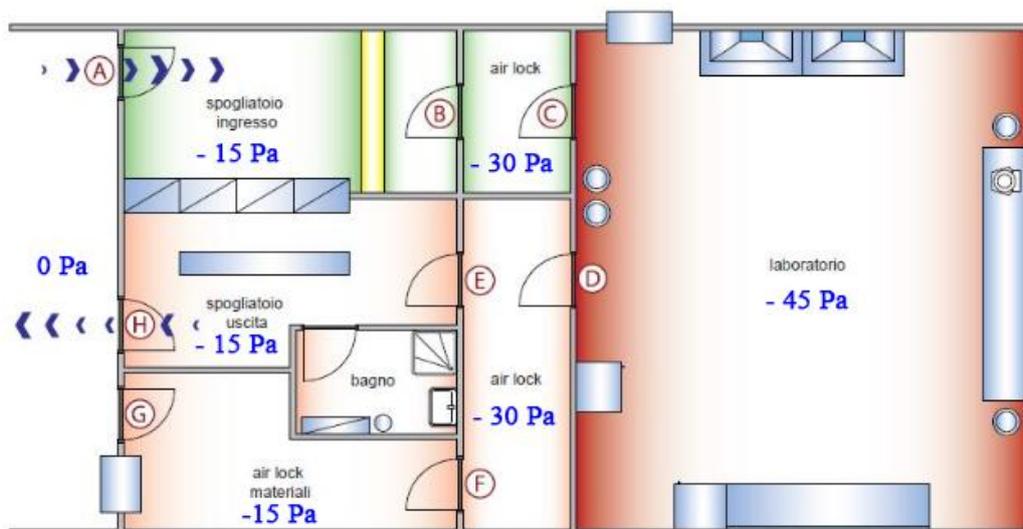


Figura 3.2-Layout di un laboratorio BSL3 con pressioni relative nei vari locali (tratta da: <http://www.biotechnologiesicurezza.it/biotechnologia/laboratorio-di-classe-3>)

La distribuzione interna delle pressioni in un laboratorio a contenimento biochimico deve essere configurata in modo da impedire all'aria interna al laboratorio di fuoriuscire. Un esempio di distribuzione interna delle pressioni si può osservare in Figura 3.2. In questo modo si evitano le esfiltrazioni dal locale "Laboratorio" e si crea un flusso sempre entrante nel laboratorio in modo da evitare la fuoriuscita di aria all'esterno.

Le varie porte d'accesso sono interbloccate secondo la seguente logica: A-B, B-C, D-E-F, E-H, F-G.

3.2 Condizioni ambientali – Temperatura e UR

Le temperature e l'umidità relativa degli ambienti di laboratorio sono di fondamentale importanza poiché non devono creare interferenze con l'esecuzione delle prove e compromettere l'attendibilità dei risultati e, al tempo stesso, garantire il comfort degli occupanti.

La normativa non specifica valori esatti di temperatura/UR da rispettare poiché questi dipendono in modo preponderante dall'attività svolta, dalla presenza di particolari strumentazioni e dalla presenza di animali.

Si citano alcuni riferimenti:

- Nel "2015 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications", nella sezione riguardante i laboratori, viene specificato che sistemi flessibili dovrebbero permettere una regolazione della temperatura di $\pm 1^\circ\text{C}$ nel range tra 18 e 29°C, anche se questo comporterebbe un notevole aumento dei costi che può essere evitato cercando di definire in maniera più specifica possibile le attività da svolgere.
- Il "The heat is on: room temperature affects laboratory equipment—an observational study" Julia M. Butler & Jane E. Johnson & William R. Boone, un articolo in cui viene studiato l'effetto della temperatura interna dei laboratori sulle varie attrezzature di precisione presenti all'interno, afferma "...most laboratories' room temperatures fluctuate between 20 and 25 °C.
- Il National Institutes of Health (NIH) nel "Design Requirements Manual (DRM)" tabella 6.1.9.1 "Indoor design condition for Laboratories" specifica condizioni estive di $23\pm 1^\circ\text{C}$ 50%UR e invernali di $21\pm 1^\circ\text{C}$ 30%

3.3 Portata di ventilazione

La portata d'aria di ventilazione per i laboratori non è espressamente specificata dalle normative europee. Questo poiché dipende fortemente dalle attività di laboratorio, dall'estensione del laboratorio e dalla presenza o meno di animali. Un quadro generale si può trovare nel testo "Laboratory Ventilation ACH Rates Standards and Guidelines – AIRCUIITY", dove vengono riassunti i principali riferimenti:

- 2007 ASHRAE HVAC Applications, Chapter 14 indica minimo 6-10 Vol/h quando occupato e se sono presenti anche animali la National Institutes of Health raccomanda minimo 15 Vol/h
- Nel 2011 ASHRAE HVAC Applications, Chapter 16 una voce specifica per la ventilazione in presenza di animali che conferma il valore di 15 Vol/h esplicitando la dipendenza anche dal numero di animali presenti e dalla superficie del laboratorio.
- L'unico riferimento normativo europeo è dato dalla DIN 1946-7 "Ventilation and air conditioning - Part 7: Ventilation systems in laboratories" che raccomanda un minimo di 25 m³/h/m². Che nel caso di un'altezza di 3m sono 8.33 Vol/h.

Un test effettuato dalla Yale University in un articolo del Journal of Chemical Health & Safety: Klein, R.,C. King, A. Kosior. 2009. "Laboratory air quality and room ventilations rates." presenta alcuni dati e conclusioni interessanti sull'efficacia dei ricambi orari in laboratorio.

Il test è stato fatto spillando in ambiente una sostanza ed osservando la variazione di concentrazione della sostanza in ambiente al variare della portata di ventilazione. La figura 3.3 fornisce la variazione di concentrazione chimica generate da piccole fuoriuscite di etere dietilico a livello del pavimento con ACH variabili, misurati mediante fotoionizzazione.

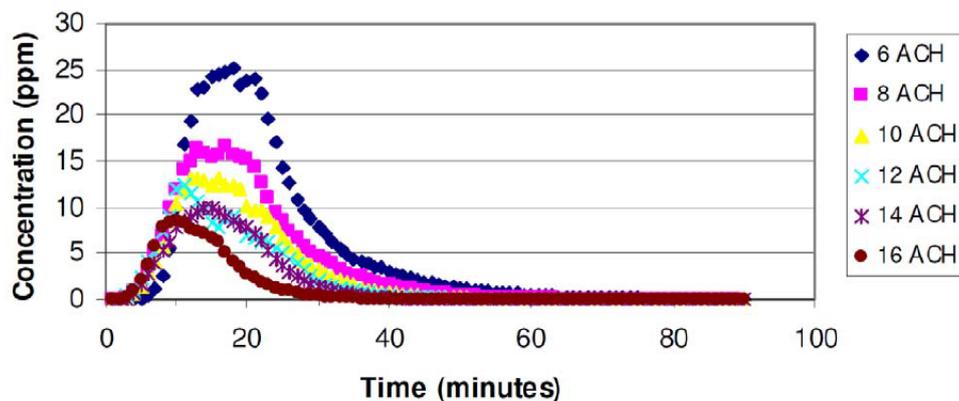


Figura 3.3 - Curva delle concentrazioni per varie portate di ventilazione

Si nota come un valore maggiore di 12 Vol/h porta pochi benefici alla riduzione della concentrazione della sostanza rilasciata, mentre un valore inferiore agli 8 Vol/h deve essere attentamente valutato poiché potrebbe comportare rischi più o meno elevati a seconda della pericolosità della sostanza.

3.4 Velocità dell'aria in ambiente

La velocità dell'aria in ambiente assume nella maggior parte dei casi una rilevanza dal punto di vista del comfort degli occupanti. In questo tipo di strutture, però, un altro aspetto fondamentale è l'influenza che la velocità dell'aria in ambiente ha sul corretto funzionamento delle cappe di sicurezza biologica.

Infatti, si è visto come sia di fondamentale importanza per il corretto funzionamento delle cappe che il flusso d'aria in ingresso non subisca forti alterazioni tali da compromettere il tiraggio e la relativa sicurezza per l'ambiente e gli operatori. Per non incorrere in questo problema, oltre ad evitare di posizionare le cappe in punti di passaggio frequente, bisogna anche controllare che il flusso d'aria sul fronte cappa non superi determinate velocità.

In particolare, il National Institutes of Health (NIH), nel Design Requirements Manual (DRM) specifica che la velocità dell'aria in direzione trasversale al fronte cappa, misurata a 235mm non dovrebbe essere maggiore di 0.25 m/s ad un'altezza di 1.5m.

Nel Laboratory Guide Design dell'ASHRAE invece, viene indicato che data la presenza di cappe di sicurezza, la velocità dell'aria in ambiente al di sotto dei 2.1m dovrebbe essere il 50% della velocità di cattura delle cappe e, in prossimità del fronte cappa, questo valore dovrebbe essere ridotto al 20% per non disturbare il flusso laminare della cappa. Nel caso di cappe di classe II, questi valori del 50% e 20% si traducono in 0.25m/s e 0.1m/s

4. Tipologie impiantistiche

Le tipologie impiantistiche per laboratori, sia a contenimento biologico che di altro genere, solitamente richiedono una portata di aria di ventilazione molto elevata. Per questo motivo, la scelta impiantistica più diffusa è quella degli impianti a tutt'aria. Con questa tipologia, utilizzando la sola aria si riesce a controllare la temperatura e il grado igrometrico negli ambienti. Rispetto ad impianti misti, il controllo del grado igrometrico risulta più efficiente ma si ha lo svantaggio di avere ingombri maggiori dovuti all'installazione di canalizzazioni.

Gli impianti a tutt'aria possono essere a mandata costante o variabile. In quelli a mandata costante la regolazione delle condizioni ambientali è effettuata variando la temperatura di immissione dell'aria, a differenza di quelli a mandata variabile dove variando la portata, a temperatura costante, si riesce ad ottenere la regolazione desiderata.

Oltre al controllo delle condizioni microclimatiche, in questi laboratori è necessario è necessario anche il controllo della pressione differenziale. Il controllo della pressione si ottiene attraverso una regolazione della portata immessa ed estratta secondo diverse logiche che possono prevedere la mandata costante e la ripresa variabile, la mandata variabile e la ripresa costante oppure entrambe variabili.

La scelta della tipologia deve tenere conto di alcuni fattori determinanti come: la tipologia di apparecchiature presenti nel locale, la tipologia di espulsione delle cappe e la presenza di filtrazione assoluta.

Le strategie di controllo più utilizzate partono dal controllo del livello di depressione da mantenere nel laboratorio attraverso un controllo diretto della differenza di pressione mediante misura del Δp tra il locale e l'esterno.

Nei i laboratori con cappe a portata variabile sono solitamente previsti sistemi che all'aumentare delle portate aspirate dalle cappe agiscono in sequenza chiudendo dapprima la serranda della cassetta(VAV) di controllo della portata di aspirazione generale del laboratorio ed in seguito aprendo la VAV di immissione.

Se le cappe presenti sono invece di a portata costante (p.e. le cappe di sicurezza biologica di Classe II) la mandata è anch'essa costante e la ripresa è dotata di cassetta VAV per il controllo della pressione ambiente.

Il controllo della temperatura ambiente avviene grazie ad una sonda di temperatura che a regola la portata di acqua calda nella batteria di post-riscaldamento grazie ad una valvola a tre vie servocomandata.

4.1 Schema impiantistico tipico

In Figura 4.1 è schematizzato un impianto di trattamento aria a servizio di un laboratorio BSL3. Possiamo osservare si tratta di un impianto a ricircolo; come descritto precedentemente, in questa tipologia di laboratorio, è possibile ricircolare l'aria solamente nel caso in cui l'analisi del rischio abbia evidenziato tale possibilità. In caso contrario lo schema impiantistico non vedrà collegato il condotto di estrazione alla UTA che funzionerà a tutta aria esterna. Quando il ricircolo non è presente, viste le alte portate di funzionamento, è opportuna l'installazione di un sistema di recupero di calore a doppia batteria.

Il flusso d'aria è entrante nel laboratorio grazie alla cascata decrescente delle pressioni, partendo dall'esterno, verso il laboratorio. Per evitare troppa turbolenza dell'aria e interferenza tra le masse d'aria interna-esterna, sono stati predisposti airlock "transito" che garantiscono la continuità del flusso entrante nel laboratorio.

Tutta l'aria estratta è filtrata attraverso filtri assoluti dotati di sistema canister per la sostituzione sicura del filtro.

La filtrazione assoluta con filtri H14 in mandata anche se non obbligatoria, garantisce il contenimento anche in casi di anomalie del sistema di ventilazione.

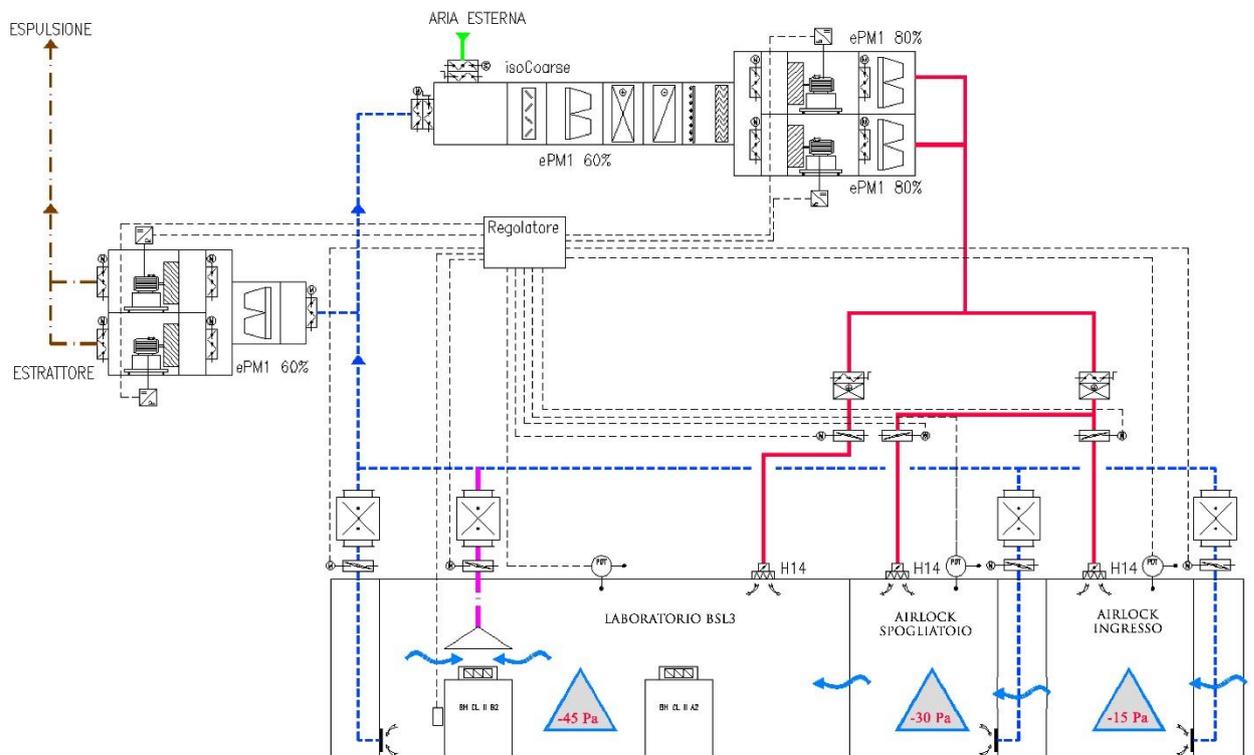


Figura 4.1 - Schema impiantistico a ricircolo di un Laboratorio BSL3

Le strategie di controllo si basano sul controllo diretto o indiretto del livello di depressione da mantenere in laboratorio. Il controllo diretto prevede la misura della differenza di pressione nei vari locali, mentre quello indiretto si basa sul calcolo algebrico della differenza di pressione.

La regolazione si basa su una logica integrata di controllo che grazie al collegamento via bus di tutte le apparecchiature ed alla gestione attraverso i sistemi BMS (Building Management System) permette di intervenire rapidamente, controllando le varie grandezze in gioco.

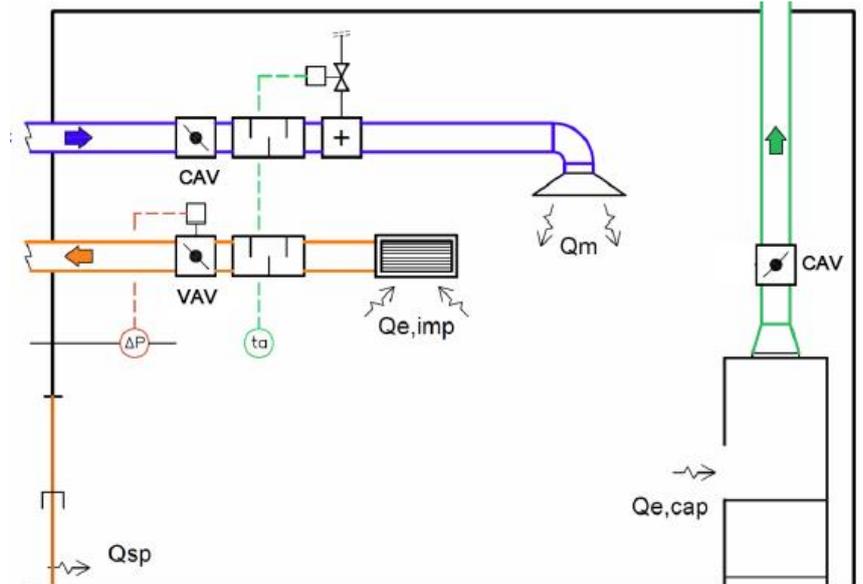


Figura 4.2 - Schematizzazione di un impianto CAV in mandata e VAV in ripresa

Essendo le portate in gioco molto elevate, la soluzione migliore è costituita da un impianto a tutt'aria a portata variabile in ripresa e costante in mandata (Figura 4.2).

La logica di regolazione prevede di mantenere una portata di aria in mandata costante e variare invece la portata di aria estratta.

Questo per un più efficace controllo della pressione della temperatura ambiente. Così facendo, il controllo della temperatura ambiente dei vari locali avviene con la sola variazione della portata di acqua calda nella batteria di post riscaldamento tramite modulazione dell'elettrovalvola, lasciando inalterato il flusso d'aria in entrata. Il controllo della pressione, invece, è affidato al solo sistema di regolazione della portata di ripresa che, agendo attraverso le VAV, modula la portata d'aria e regola la pressione del locale.

5. Il Progetto

Si analizzeranno, a partire da questo capitolo, le principali scelte e caratteristiche progettuali del laboratorio BSL3 oggetto di questa tesi.

Una considerazione importante prima di iniziare la descrizione del progetto:

essendo questa una fase preliminare della progettazione dell'intera struttura ospedaliera, si sono considerati i layout e le planimetrie definite allo stato attuale, con la consapevolezza che, durante le varie fasi progettuali, quest'ultime potrebbero subire delle modifiche. Questo, non è stato considerato un aspetto critico, poiché lo scopo di questa tesi non è definire nel dettaglio le varie grandezze e geometrie del laboratorio ma descriverne l'approccio e le logiche progettuali.

5.1 Inquadramento

Come precedentemente accennato, il laboratorio in esame è situato all'interno di una struttura ospedaliera. In particolare, si tratta dell'ospedale oncologico "Citta della Salute e della Ricerca" situato a Sesto San Giovanni (Milano). La struttura ospita diversi laboratori, in ogni area di ricerca. Alcuni di questi sono classificati BSL3. Si andrà ad approfondire lo studio di uno di questi laboratori, che farà da riferimento per gli altri.

La struttura ospedaliera presenta tre piani fuori terra, di cui due, il secondo ed il terzo, di planimetria simile che ospiteranno i laboratori BSL3 nella parte nord della struttura, nella posizione evidenziata in giallo, in blocchi distaccati dalle sale operatorie e dalle sale degenza.

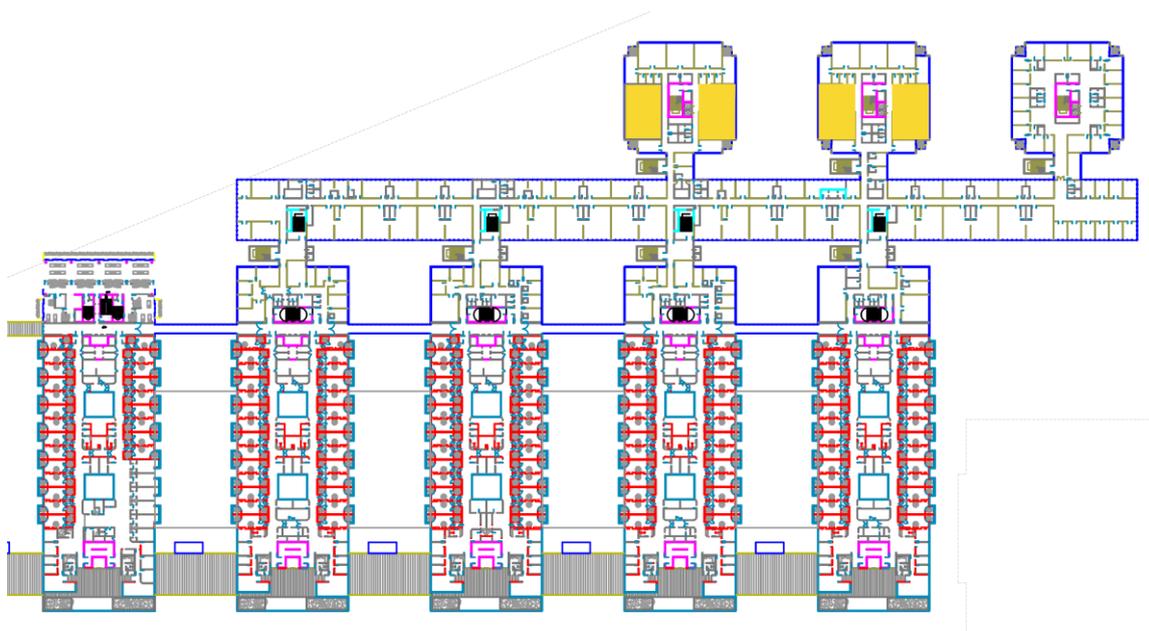


Figure 5.1 - Planimetria generale della struttura ospedaliera

Si può osservare in dettaglio la planimetria di un blocco del secondo piano in cui sono presenti due laboratori BSL3.

Si può notare anche la presenza del cavedio da cui partono e arrivano i canali di mandata ed estrazione dell'aria.

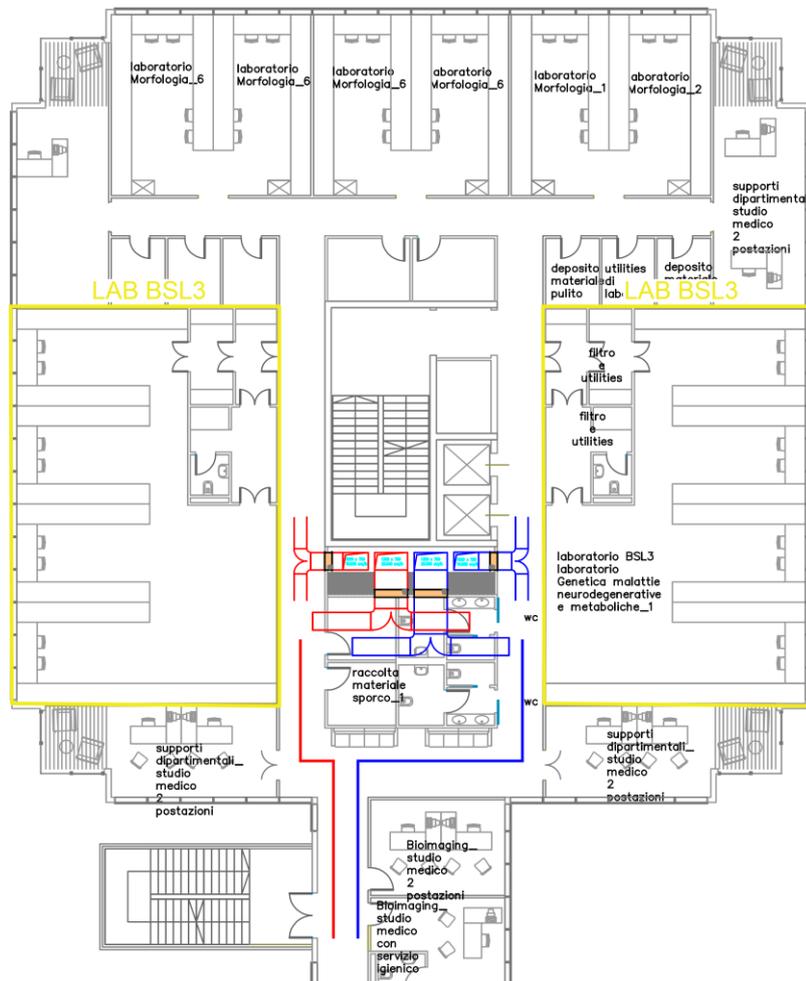


Figure 5.2 - Planimetria blocco contenente i laboratori BSL3

5.2 Studio di fattibilità

Nello studio di fattibilità a base di gara, per ogni area, sono elencate le diverse tipologie di laboratori richieste e le diverse caratteristiche che essi devono presentare. In particolare:

- Vengono specificate le quantità e caratteristiche di ogni laboratorio, per ogni settore, presenti nell'Area di Ricerca (BSL3 evidenziati in rosso nell'immagine sottostante);

| AREA RICERCA | | |
|---|-----|--|
| SCHEDA 37 | | |
| AREA RICERCA ONCOLOGIA | n°1 | modulo ricerca clinica |
| | n°1 | modulo ricerca |
| modulo ricerca clinica | | |
| Attività di ricerca clinica oncologica "to bed" | | |
| laboratorio | 3 | laboratori BSL3 dimensione equivalente a modulo base |
| laboratorio | 12 | modulo base |
| studi medici dipartimentali * | | in area dipartimentale |
| Superficie Lorda di Area 570 mq (520mq al netto del connettivo generale) | | |
| <i>* superfici previste in area clinica (ambulatoriale/degenza/terapia)</i> | | |
| modulo ricerca | | |
| ogni modulo base: 12m lineari banchi di lavoro | | |
| Dipartimento di oncologia sperimentale | | |
| laboratorio | 70 | modulo base |
| laboratorio | 6 | laboratori BSL3 dimensione equivalente a modulo base |
| segreteria | 1 | |
| studio medico con servizio igienico | 6 | |
| studio medico a 2 postazioni | 6 | |
| studio medico a 4 postazioni | 6 | |
| studio coordinatore piattaforma ricerca | 6 | |
| open space per 8 postazioni | 6 | |
| sala riunioni (12 posti) | 2 | accorpabili |
| servizi igienici del personale | 8 | |
| Microbiologia | | |
| laboratorio | 3 | laboratori BSL3 dimensione equivalente a modulo base |
| Core Labs Genetica, Genomica, Med.Mol. | | |
| laboratorio - Exome sequencing, analisi CGH, SNP array | 2 | modulo base |
| GMP facilities, Cell factory UPTC (" ") | | |
| laboratorio | 6 | laboratori BSL3 dimensione equivalente a modulo base |
| Cell imaging and sorting | | |

- Specifica che, in merito alle caratteristiche costruttive, si fa riferimento all'allegato XLVII del D.LGS 81/2008 già descritto in precedenza;
- Indica le condizioni termo-igrometriche e le portate di aria richieste per le diverse tipologie di laboratori.

| CITTA' DELLA SALUTE E DELLA RICERCA STUDIO DI FATTIBILITA' DATI DI PROGETTO - A07212A.SDF.E01.MEC.40003.02 CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE DI PROGETTO | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|---------|--|--------------------|---------------|------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Ambiente | Condizioni termoigrometriche interne | | | | Portata aria (vol/h) | | Sovrapressioni (+) e Depressioni (-) (d) | Tipo impianto HVAC | Vapore pulito | Grado filtrazione aria | | Pressione acustica in ambiente dB(A) |
| | Inverno | | Estate | | esterna | ripresa | | | | immessa | espulsa | |
| | Temperatura (°C) | Umidità relativa (%) | Temperatura (°C) | Umidità relativa (%) | | | | | | | | |
| 1 Sale operatorie ISO 5 | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | (1) | (1) | (1) | Tutta aria esterna | SI | (1) | (1) | 35 |
| 2 Sale operatorie ISO 7 | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 20 / 4 (a) | 14,0 | +++ | Tutta aria esterna | SI | G4 + F9 + H14 | F8/9 | 35 |
| 3 Locali annessi SOP | 24 +/- 1 | 50 +/- 5 | 24 +/- 1 | 50 +/- 5 | 8,0 | 4,0 | +++ | Tutta aria esterna | SI | G4 + F9 + H14 | F8/9 | 35 |
| 4 Terapia intensiva | 24 +/- 1 | 50 +/- 5 | 24 +/- 1 | 50 +/- 5 | 8,0 | 4,0 | +++ | Tutta aria esterna | SI | G4 + F9 + H14 | F8/9 | 35 |
| 5 Radioterapia | 24 +/- 1 | 55 +/- 5 | 24 +/- 1 | 55 +/- 5 | 12 / 3 (a) | 13,0 | -- | Tutta aria esterna | SI | G4 + F8 + H10 | F8 + Carboni attivi | 45 |
| 6 Laboratori normali | 22 +/- 1 | 40 +/- 5 | 26 +/- 1 | 50 +/- 5 | 5,0 | 3,0 | ++ / -- | Tutta aria esterna | SI | G4 + F9 | G4 + F8 | 45 |
| 7.1 Laboratori speciali in sovrappressione (esempio OTC - Onco prod. Terapie Cellulari) | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 10 - 40 | | ++ | Tutta aria esterna | SI | G4 + F9 + H14 | F8/9 | 35 |
| 7.2 Laboratori speciali in depressione (esempio BLS3 per utilizzo di prioni) | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 10 - 40 | | -- | Tutta aria esterna | SI | G4 + F9 + H14 | F8/9 | 35 |
| 8 Spazio generale | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | 17 / 24 +/- 1 | 40 - 60% | (2) | (2) | (2) | Tutta aria esterna | SI | (2) | (2) | 35 |

Analizzando i documenti esposti si sono rilevate le seguenti criticità:

- Le condizioni di progetto estive prescritte per i laboratori, con temperatura minima pari a 17°C sembrano molto basse.
In laboratori BSL3 o in ambienti GMP (classi D-C-B), si consigliano di norma temperature minime estive pari a 24/26°C nell'ottica di evitare problematiche di discomfort agli operatori.
- I valori di pressione acustica ambientale definiti dalla tabella prescritti per i reparti specialistici, i laboratori normali e speciali non sono verosimili a causa della tipologia di impianti e di apparecchiature previste all'interno dei locali. Ad esempio, una cappa commerciale di tipo Classe II tipo B2 ha comunemente un livello di pressione sonora pari a 55-60 dB(A).
- Nella tabella delle condizioni termo-igrometriche di progetto si richiede che i laboratori BSL3 siano dotati di filtri assoluti sull'aria di mandata, ma non sono previsti filtri assoluti sull'espulsione in ambiente dell'aria contaminata.
Questa prescrizione è in contrasto con quelle del Dlgs 81/2008 che prevede che la filtrazione dell'aria espulsa dai laboratori BLS3 va effettuata con filtri H14. Non sono richiesti invece filtri assoluti in mandata. I laboratori BSL3 sono usualmente dotati di filtrazione normale ISO Coarse + ePM1-60% + ePM1-80% sulla mandata e di filtrazione assoluta con filtri H14 sull'espulsione, dove i filtri sono contenuti in canister di sicurezza ubicati in ambiente sicuro.
- Sono previsti da 10 a 40 vol/h di ricambi aria nei laboratori BSL3. Le regole di buona pratica prevedono in un laboratorio BSL3 normalmente 12-15 vol/h di aria esterna, con riduzione a 6 vol/h in condizioni at rest. Tali valori possono essere incrementati al fine di controllare i carichi termici frigoriferi, cercando di limitare al massimo la quantità di aria trattata al fine ridurre la velocità dell'aria negli ambienti di lavoro. Elevate velocità dell'aria negli ambienti determinano perturbazioni sul funzionamento delle cappe di Biosicurezza, andando a compromettere pertanto la sicurezza degli operatori.

5.3 Il Laboratorio

L'area di laboratorio (Figure 5.1) ha un'estensione di circa 160 metri quadri di cui 133 sono dedicati al laboratorio vero e proprio ed i restanti 27 per i tre locali filtro (airlock) presenti F1, F2 e F3. Nel locale F3, quello di uscita, è presente un bagno in cui è possibile l'inserimento della doccia di decontaminazione.

È stata rappresentata una possibile soluzione di posizionamento delle cappe di sicurezza biologica e dell'autoclave passante. Le altre attrezzature necessarie (descritte nel capitolo 2), non sono state rappresentate poiché il loro posizionamento non è rilevante dal punto di vista impiantistico.

5.4 Layout della distribuzione delle pressioni

Come si è precedentemente descritto, non sono presenti direttive precise per stabilire la differenza di pressione tra i vari locali. Diversi riferimenti indicano un valore di almeno 12.5 Pa. Essendo 0.5 una misura di difficile rilevazione per la strumentazione, si è deciso di assumere come valore di riferimento 15 Pa. La seguente figura mostra i livelli differenziali di pressione di ogni locale rispetto al valore 0, dell'ambiente esterno al laboratorio.

Si possono notare anche le 5 porte che saranno interbloccate fra loro secondo la seguente logica: 1-2-5; 2-3; 4-5;

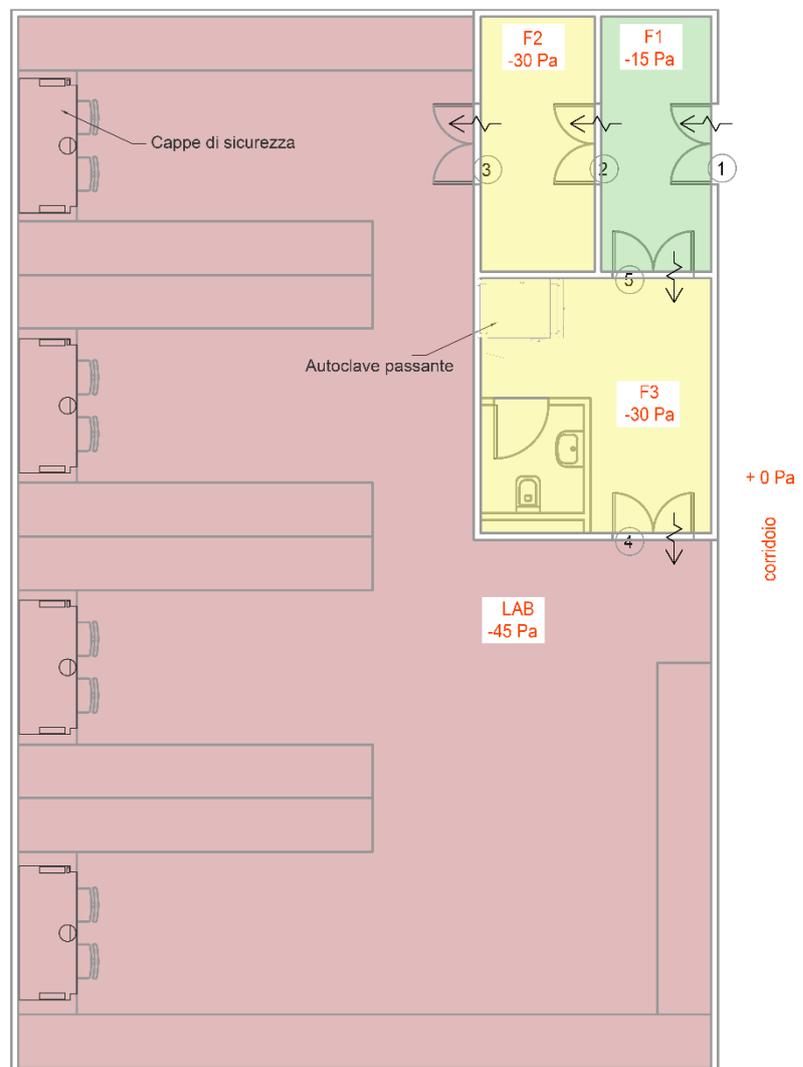


Figure 5.3 - Layout delle pressioni ambiente

6. Impianto HVAC

La scelta della tipologia di impianto è strettamente legata alla portata d'aria da immettere in ambiente e dalla presenza o meno di cappe aspiranti.

Nei laboratori a contenimento biologico, data l'elevata portata richiesta sia per ventilazione ($\approx 12 \text{ Vol/h}$) che per compensare quella estratta dalle cappe la tipologia più indicata risulta essere quella a tutt'aria, con mandata costante e ripresa variabile VAV.

Si è scelto di mantenere costante la portata di mandata per un più efficace controllo della pressione della temperatura ambiente. Così facendo, il controllo della temperatura ambiente avviene con la sola variazione della portata di acqua calda nella batteria di post riscaldamento tramite modulazione dell'elettrovalvola dei vari locali, lasciando inalterato il flusso d'aria in entrata e quindi la pressione del locale. In questo modo si riesce a controllare in modo più efficace la pressione, controllando solo la ripresa attraverso le VAV.

6.1 La valutazione delle portate

Le portate d'aria di progetto per l'impianto HVAC del laboratorio sono fondamentali per mantenere le condizioni desiderate sia di pressione che di condizioni termo-igrometriche all'interno dei locali. Essendo un impianto a tutt'aria, la portata d'aria da immettere nel laboratorio è data dal valore più critico tra i seguenti:

- Portata aria minima di ventilazione
- Portata aria necessaria a controllare il carico termico
- Portata aria necessaria a compensare le portate di aria estratta dalle cappe

6.1.1 Portata per ventilazione

Per le considerazioni fatte in precedenza, si può stabilire che un valore di ventilazione di 12 Vol/h, risulta ottimale in questo specifico caso, data l'assenza di animali e una superficie di laboratorio non troppo ridotta.

Calcolando la volumetria per ogni locale, possiamo calcolare la portata d'aria necessaria per ventilare i locali a 12 Vol/h.

| Locale | Sup [m2] | H [m] | Vol [m3] | V [m3/h] (12Vol/h) |
|----------------------|----------|-------|----------|-----------------------|
| Filtro ingresso (F1) | 6.2 | 3 | 19 | 223 |
| Filtro post ing (F2) | 6.4 | 3 | 19 | 230 |
| Filtro uscita (F3) | 12.5 | 3 | 38 | 450 |
| Laboratorio (LAB) | 133 | 3 | 399 | 4788 |
| | 158.1 | | 474 | 5692 |

6.1.2 La portata sottoporta

La depressione in un locale si può ottenere controllando la portata d'aria in mandata e in ripresa in modo da avere una quantità d'aria in mandata minore di quella in ripresa. Per far ciò è necessaria la valutazione delle infiltrazioni attraverso porte, fori e serramenti. È importante conoscere questa portata d'aria per poter calcolare correttamente le portate di mandata e ripresa. Si utilizza a questo scopo la formula prescritta dalla norma UNI 12101-6 "Apparecchiatura di pressurizzazione per Filtri Fumo in Sovrappressione" che fornisce la formula della portata in funzione della differenza di pressione dei locali e della superficie della fessura.

$$Q = 3600 * A_e * 0.83 * \sqrt{\Delta P} \quad (1)$$

Q: portata d'aria per metro di perimetro [m³/h]

A_e: area di fessura [m²]

ΔP: differenza di pressione [Pa]

α: coefficiente perdita di carico localizzata a 0.675

La tipologia di porte utilizzata nei casi in cui si vuole ridurre al minimo la superficie di trafilemento dell'aria, include una guarnizione pneumatica in silicone, gonfiabile, che garantisce una perfetta tenuta contro il telaio alla chiusura della porta e una buona tenuta anche attraverso il pavimento. Questo appunto per ridurre al minimo la portata d'aria che attraversa il sottoporta.

Avendo quindi stabilito la differenza di pressione nei vari locali, è possibile calcolare la portata sottoporta per singola porta. Considerando porte a media tenuta con uno spazio utile al passaggio dell'ara solo sul lato pavimento si può assumere una superficie di trafilemento paria a 0.01 m² (1200mm*85mm). Questo valore può essere ulteriormente ridotto installando porte aventi speciali telai con sistemi di guarnizioni ad insufflaggio di aria che gonfiandosi riducono maggiormente le superfici di trafilemento.



Figure 6.1 - Porta a tenuta

| Sup sottoporta [m2] | dP [Pa] | V sottop [m3/h] |
|---------------------|---------|-----------------|
| 0.01 | 5 | 67 |
| | 10 | 94 |
| | 15 | 116 |
| | 20 | 134 |
| | 25 | 149 |
| | 30 | 164 |
| | 35 | 177 |
| | 40 | 189 |
| | 45 | 200 |
| | 50 | 211 |

Considerando quindi le differenze di pressione tra i locali si è calcolata la portata complessiva entrata o uscente per ogni locale: negativa indica che è uscente dal locale, positiva che è entrante.

Il locale F1 risulta in depressione di 15Pa rispetto il corridoio e in pressione di 15 Pa rispetto F2 e F3. Quindi avremo una portata entrante di 116 m3/h e due uscenti di 116 m3/h. La portata risultante sarà quindi di 116 m3/h uscente dal locale.

Procedendo in questo modo è possibile ottenere le portate risultanti per ogni locale, indicando quelle uscenti con il segno negativo e quelle entrati con il segno positivo.

| Airlock TRANSITO | | | | |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| dP [Pa] | dP rispetto a locale adiacente [Pa] | dP rispetto a locale adiacente [Pa] | dP rispetto a locale adiacente [Pa] | V sottoporta [m3/h] |
| -15 | 15 | 15 | -15 | -116 |
| -30 | 15 | -15 | | 0 |
| -30 | 15 | -15 | | 0 |
| -50 | -15 | -15 | | 231 |

6.1.3 Portata d'aria aspirata dalle cappe di sicurezza

Sono state ricavate le portate d'aria estratta dalle cappe di sicurezza biologica per le Classi IIA2 e IIB2 dalle schede tecniche di diversi produttori come RELIANT e THERMOSCIENTIFIC e sono stati estratti i seguenti dati significativi:

Portata estratta **cappa IIA2 = 700 m3/h**

Portata estratta **cappa IIA2 con manicotto (thimble) = 1165 m3/h**

Portata estratta **cappa IIB2 = 2100 m3/h**

In quanto nello studio di fattibilità non viene specificata la tipologia di cappa di sicurezza da adottare, il progetto verrà eseguito considerando cappe di Classe IIA2 con manicotto di collegamento all'impianto di estrazione del laboratorio.

6.1.4 Portata d'aria per bilanciare il carico termico

Nello studio di fattibilità è stata indicata una potenza di progetto estivo di 200kW totali per i laboratori, in cui la superficie totale è 1365 m². Da questi due valori si ricava una potenza per unità di superficie di 150 W/m². Questo valore è in linea con le indicazioni della letteratura di riferimento.

Per verificare che la potenza termica assegnata alle attrezzature sia sufficiente, si è ricavato tale valore per differenza, considerando i carichi termici derivanti dall'illuminazione, dagli occupanti e dall'involucro edilizio. Sono stati considerati:

- 10 W/m² di illuminazione LED per garantire 500 lux
- 10 W/m² per occupanti: 75 W/m² per persona e 0.12 persone/m² come indicato nella UNI 10339 per uffici open space.
- 25 W/m² per carichi esogeni. Calcolato utilizzando il software EDILCLIMA con il metodo Carrier ed i valori di irraggiamento solare per latitudine secondo la UNI 10349.

Per differenza si ottengono 105 W/m² destinato alle attrezzature di laboratorio.

Le attrezzature più comunemente presenti in laboratorio ed il calore da esse dissipato in ambiente (ricavato da schede tecniche) sono:

- Le cappe di sicurezza biologica 300W
- Le autoclavi 1000W
- I frigoriferi 800W
- I computer 200W

Considerando 4 cappe, 1 autoclave, 3 frigoriferi, e 2 computer si ottengono 5000W che diviso l'aera del laboratorio (130m²) si ottengono circa 40W/m², dimostrando che il valore rientra abbondantemente nella potenza predisposta.

La struttura ospedaliera che ospiterà i laboratori è situata nel comune di Sesto San Giovanni (Mi). Per le condizioni di progetto, si fa riferimento a condizioni più critiche rispetto a quelle indicate nella UNI 5364. Si fissano pertanto a:

- Invernali: T = -7 °C UR = 90%
- Estive = T = 35°C UR = 50%

All'interno del laboratorio si mantiene una temperatura di 22°C nella stagione invernale e di 24 °C in quella estiva.

Per calcolare la portata per bilanciare il carico termico si fa riferimento alla stagione estiva in cui si verificano le condizioni più critiche. Si fissa la temperatura di immissione a 16°C con

titolo pari a quello delle condizioni interne in quanto si trascura sia la potenza latente immessa dagli occupanti.

Infatti, considerando 8 occupanti all'interno del laboratorio (numero di sedute presenti nel disegno architettonico), la portata di vapore immessa sarebbe pari a $80\text{g/h/pers} \cdot 8 = 640\text{g/h} = 0.18\text{g/s}$, che si può ritenere trascurabile.

La condizione dell'aria nei vari stati sarà quindi:

| Condizioni di progetto | | | | |
|------------------------|--------|--------|-----------|----------|
| | T [°C] | UR [%] | h [kJ/kg] | x [g/kg] |
| Estiva | 35 | 50 | 80.78 | 17.76 |
| Interna estiva | 24 | 50 | 47.81 | 9.3 |
| Immissione estiva | 16 | 82 | 39.63 | 9.3 |

Considerando 150 W/m^2 e 133m^2 di superficie si avrà un carico termico di picco complessivo nella stagione estiva di circa 20kW .

Con le condizioni di immissione stabilite la portata d'aria da immettere per bilanciare il carico termico sarà:

$$Q = \frac{P}{\Delta h} = \frac{20}{(47.8 - 39.6)} = 2.44 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 7300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \approx 18 \frac{\text{Vol}}{\text{h}}$$

Riassumendo, si hanno quindi le seguenti portate:

| | | | Incremento 15% | |
|---------------------------------------|------|-------|----------------|-------|
| | mc/h | Vol/h | mc/h | Vol/h |
| Ventilazione 12 Vol/h | 4788 | 12 | | |
| Bilanciamento dei carichi termici | 7317 | 18 | | |
| Aspirata dalle cappe IIA2 con thimble | 4660 | 12 | 5359 | 13.4 |

In quanto la portata d'aria aspirata dalle cappe di sicurezza è molto vicina a quella minima di ventilazione, si incrementa quest'ultima del 15% per garantire una ventilazione minima del laboratorio che è necessaria per la regolazione della pressione ambiente.

Essendo la portata d'aria necessaria per bilanciare i carichi termici quella maggiore, si assume la portata d'aria di progetto pari a 18 Vol/h .

6.2 Trasformazione dell'aria

Si analizzano le trasformazioni che subisce l'aria da immettere nel locale di laboratorio e nei locali filtro. Per farlo si utilizza il digramma psicometrico ASHRAE, uno strumento di lavoro grafico di grande utilità e praticità, dove è possibile visualizzare in forma grafica i trattamenti dell'aria, rendendone immediata la comprensione.

Si ricorda che il fattore di by-pass è quella percentuale di aria che attraversando la batteria di raffreddamento/riscaldamento non subisce alcuna trasformazione (Figura 6.2). Esso dipende dalla geometria della batteria e della velocità frontale dell'aria all'ingresso della stessa. Può assumere valori compresi tra 0.01 e 0.6. Le condizioni dell'aria in uscita saranno quelle risultanti dalla miscela tra la portata d'aria trattata e quella non trattata.

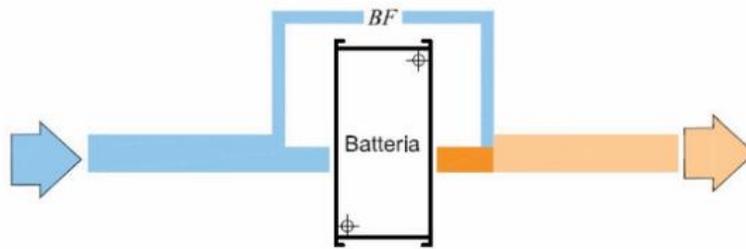


Figure 6.2 - Batteria e Fattore di by-pass

Analizzando il caso estivo, le condizioni di partenza dell'aria da trattare saranno 35°C 50% UR; quelle ambiente 24°C 50% e come si è precedentemente analizzato, le condizioni dell'aria di immissione per abbattere il carico termico devono essere 16°C con titolo pari alle condizioni interne.

| Condizioni di progetto | | | | |
|------------------------|--------|--------|-----------|----------|
| | T [°C] | UR [%] | h [kJ/kg] | x [g/kg] |
| Estiva | 35 | 50 | 80.78 | 17.76 |
| Interna estiva | 24 | 50 | 47.81 | 9.3 |
| Immissione estiva | 16 | 82 | 39.63 | 9.3 |

Per ottenere le condizioni d'immissione la batteria dovrà effettuare un trattamento di raffreddamento e deumidificazione dell'aria. Essa viene alimentata da acqua refrigerata e la temperatura media superficiale della batteria si può calcolare come:

$$t_{ms} = \frac{t_{wi} + t_{wu}}{2} + \Delta t_{al}$$

Dove t_{wi} e t_{wu} sono le temperature dell'acqua in ingresso e uscita e Δt_{al} è la differenza media di temperatura sulla superficie delle alette tra la parte più vicina al punto di collegamento con il tubo in cui scorre l'acqua refrigerata e quella più distante; assume solitamente un valore

compreso tra 0.5 e 1.5 °C. (Nel caso invernale, poiché le alette tendono a raffreddarsi all'allontanarsi dal tubo caldo, il Δt_{al} si sottrae dalla t_{ms} .)

Durante la fase di raffreddamento e umidificazione dell'aria, sulla superficie fredda delle alette, si forma un velo di acqua dovuto al depositarsi della condensa del vapore acqueo. Questo velo comporta una modifica alla temperatura superficiale che differenzia da quella media. Nella pratica, per tenere conto di questo fenomeno, si utilizza una nuova temperatura, detta temperatura di rugiada della batteria t_{rb} che si considera pari a:

$$t_{rb} = t_{ms} \quad \text{se } \Delta x = 0$$

$$t_{rb} = t_{ms} + 3^{\circ}\text{C} \quad \text{se } \Delta x \geq 6 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

Dove con Δx si intende la variazione di umidità specifica dell'aria in seguito alla trasformazione ad opera della batteria.

Quindi:

- Il punto di ingresso dell'aria da trattare è 35°C 50% UR (PUNTO 1)
- La temperatura di ingresso-uscita dell'acqua refrigerata è assunta pari a 7-11 °C
- Considerando un $\Delta t_{al} = 0.5$, la temperatura media è pari a 9.5°C e considerando $\Delta x \geq 6 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$, la temperatura di rugiada della batteria sarà pari a 12.5°C. (PUNTO 2)
- Assumendo una batteria da 8 ranghi, un passo tra le alette di 2mm e una velocità dell'aria di circa 3m/s, dal diagramma in figura 6.3 possiamo ricavarci il fattore di bypass di 0.05
- Siamo adesso in grado di definire le reali condizioni dell'aria in uscita dalla batteria attraverso le seguenti relazioni (PUNTO 3):

$$t_u = t_{rb} + F_{bp}(t_i - t_{rb}) = 12.5 + 0.05(35 - 12.5) = 13.6^{\circ}\text{C}$$

$$x_u = x_{rb} + F_{bp}(x_i - x_{rb}) = 9.0 + 0.05(17.75 - 9.0) = 9.44 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

in cui il pedice i e u indicano rispettivamente le condizioni dell'aria all'ingresso e all'uscita della batteria.

Essendo la x_u molto vicina alla $x_{immissione}$ che si voleva raggiungere, ritenerla accettabile. È possibile quindi, con delle batterie di post riscaldamento collocate direttamente nei locali, effettuare un riscaldamento isotitolo e raggiungere le condizioni di temperatura desiderate (PUNTO 4). In questo modo è possibile controllare la temperatura ambiente modificando solamente la porta d'acqua calda con cui vengono alimentate le batterie di post-riscaldamento.

Considerazioni:

Si è visto come nonostante la batteria di raffreddamento è stata alimentata con temperatura dell'acqua di 7-11°C la condizione dell'aria in uscita non ha raggiunto esattamente il valore di umidità assoluta desiderato. Se volessimo raggiungere tale valore, potremmo:

- agire sulla temperatura dell'acqua in ingresso della batteria, alimentando quest'ultima con acqua gelida (0-6°C)
- aumentare la portata d'acqua di alimentazione della batteria, diminuendo così la temperatura media superficiale t_{ms}
- Ridurre il fattore di by-pass riducendo la velocità frontale dell'aria sulla batteria.

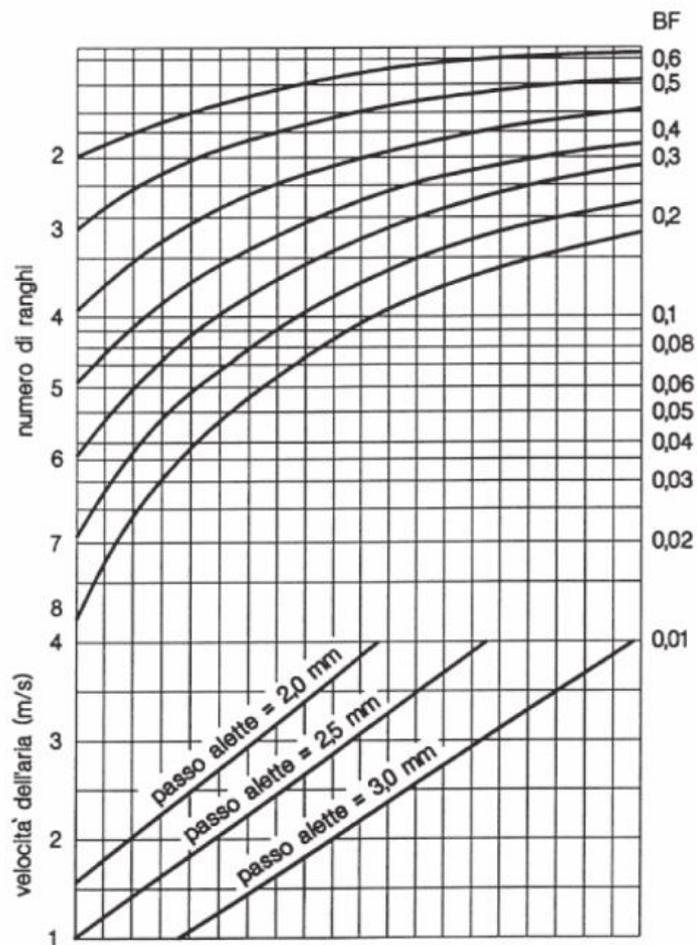
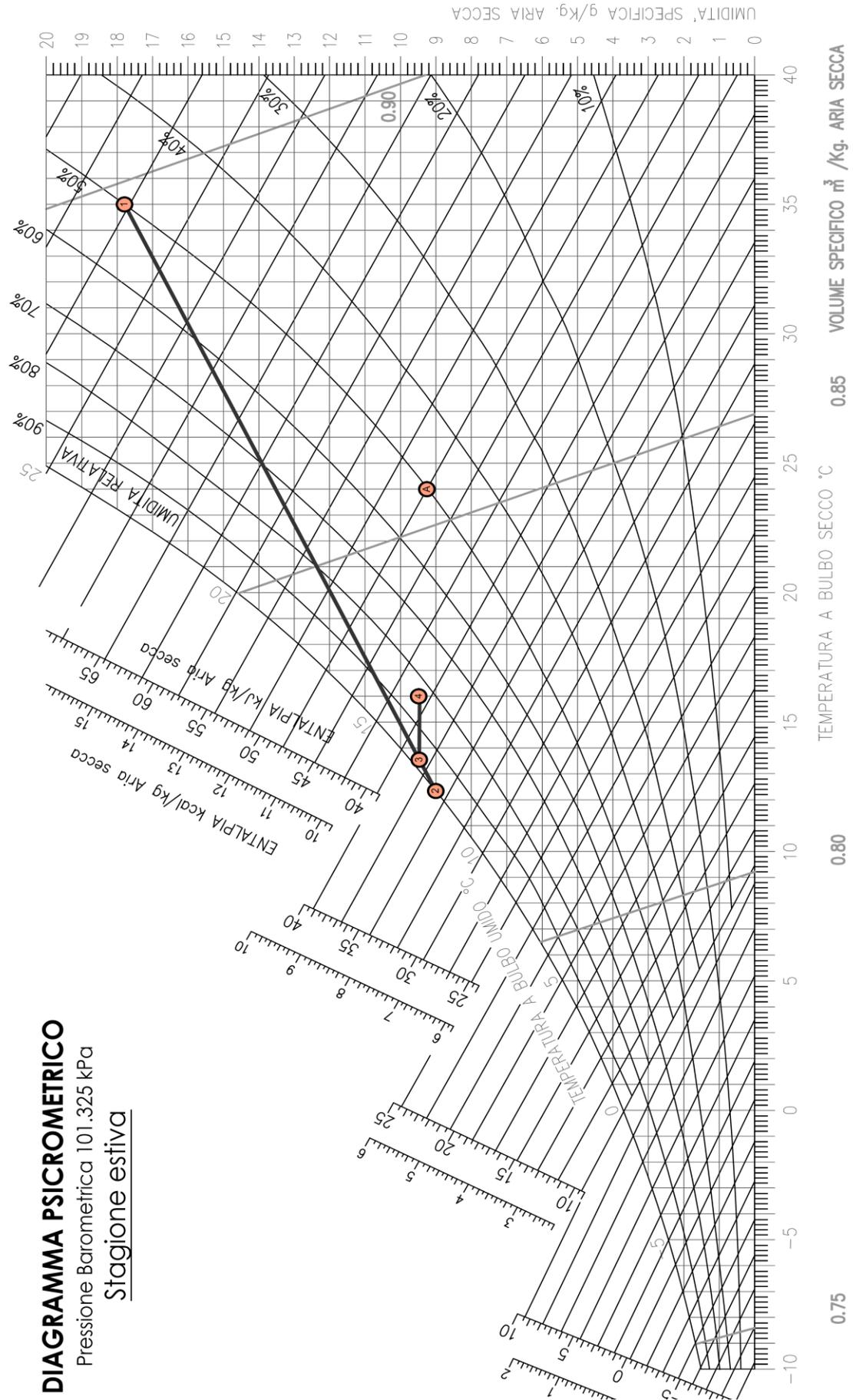


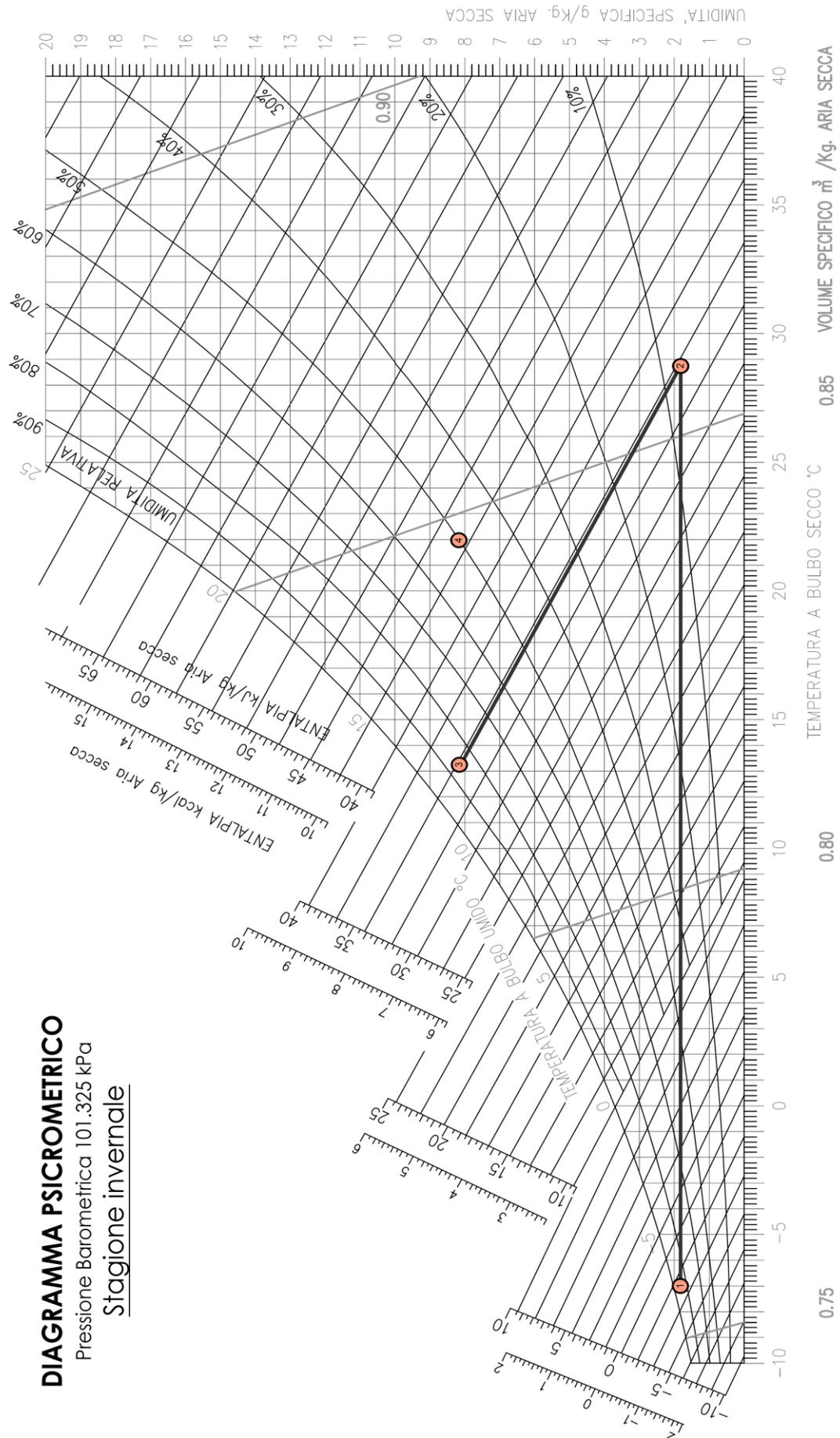
Figure 6.3 - Diagramma del fattore di by-pass per una batteria di raffreddamento/riscaldamento



Il caso invernale risulta meno complesso del caso estivo per due ragioni:

- non si ha il problema della condensazione sulla batteria con relativa perdita prestazionale
- la temperatura di immissione di acqua nella batteria non è così poco flessibile e vincolante come nel caso estivo.

Fissate le condizioni ambiente interne a 22°C e 50% UR (PUNTO 4), supponendo un'efficienza dell'umidificatore adiabatico pari all'85% e trascurando come nel caso estivo l'apporto di calore latente, si può stabilire il punto di fine umidificazione adiabatica (PUNTO 3). Considerando adesso il punto d'ingresso dell'aria nell'UTA pari a -7°C e 90% UR (PUNTO 1), si effettua un riscaldamento isotitolo fino ad inizio umidificazione adiabatica, corrispondente alla temperatura di circa 29°C (PUNTO 2). Le condizioni di immissione saranno sulla retta isotitolo che congiunge i punti 3 e 4 e dipenderanno, per ogni locale, dalla potenza fornita dalla batteria di post riscaldamento a seconda della temperatura ambiente.



6.3 Diffusione dell'aria

La diffusione dell'aria assume un ruolo cruciale nei laboratori che includono la presenza di cappe, poiché, come si è precedentemente descritto, è importante non creare eccessiva turbolenza sul fronte cappa per non alterare il flusso laminare dell'aria e compromettere quindi la funzionalità della cappa e di conseguenza la sicurezza sia dell'operatore che del prodotto.

Per questa ragione il criterio di progettazione della diffusione dell'aria è quello di avere una velocità dell'aria sul fronte cappa pari ad $1/3$ della velocità di cattura della stessa: 0.17 m/s .

Attraverso il software "Product Finder" TROX inserendo in input la tipologia e dimensione del diffusore, la configurazione spaziale dei vari diffusorie, la portata per singolo diffusore e la differenza di temperatura tra ambiente e immissione è possibile verificare che velocità dell'aria sul fronte cappe rispetti il valore atteso.

Essendo la portata d'aria totale da fornire al locale di laboratorio di $7300 \text{ m}^3/\text{h}$, otteniamo un valore idoneo di velocità sul fronte cappa installando 10 diffusori. Si avrà quindi una portata per singolo diffusore pari a $730 \text{ m}^3/\text{h}$.

Si può osservare in figura 6.4 la schermata del programma sopracitato e i valori di output con diffusori di tipo elicoidali 600×600 a 48 lamelle, predisposti secondo il layout in figura 6.5.

Il valore di interesse maggiore è V_1 pari a 0.14 m/s , che indica la velocità del getto d'aria ad un'altezza del soffitto pari a 1.8m e distanza di 2.4m .

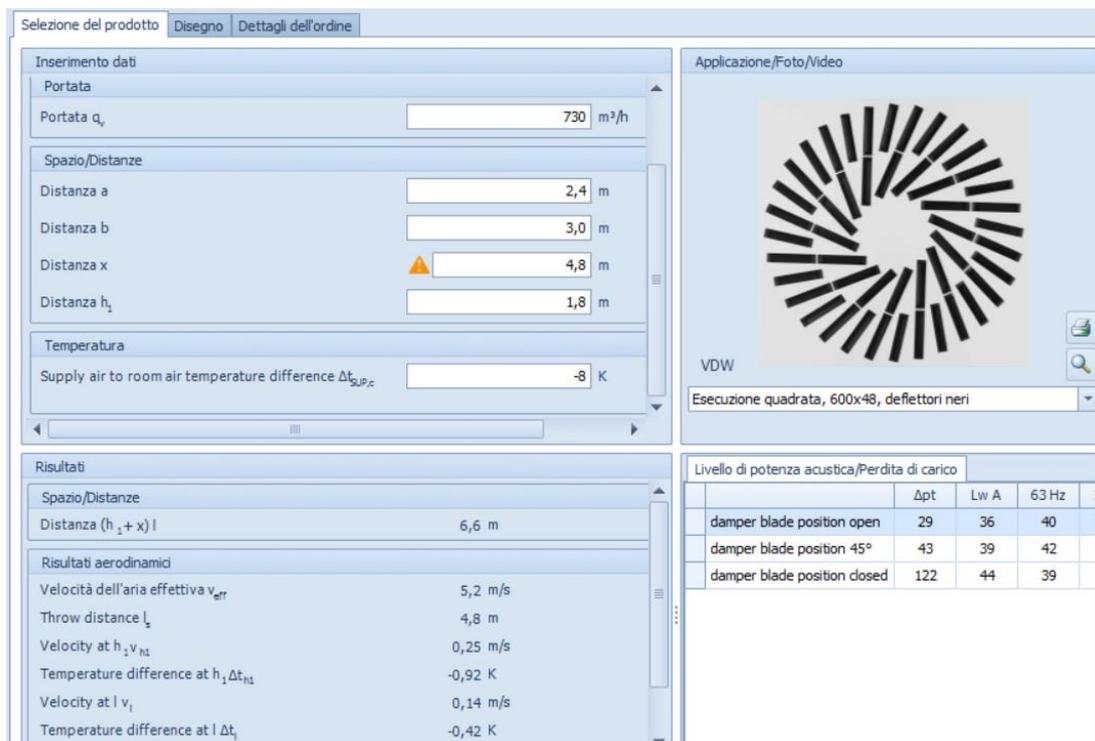
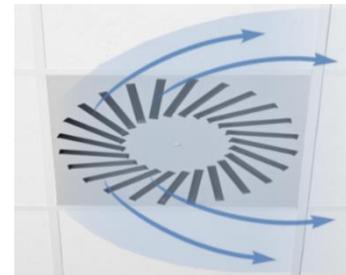


Figure 6.4 - Software "Easy Product Finder" TROX con valori di input/output del caso di studio

Nel posizionamento dei diffusori si è anche certo di mantenere una simmetria per una migliore diffusione dell'aria. Inoltre, il modello di diffusori considerato ha la possibilità di direzionare il flusso dell'aria secondo orientazioni differenti. Per una maggiore sicurezza, è quindi possibile evitare di direzionare l'uscita dell'aria nel verso delle cappe di sicurezza.



Nel layout, in blu, si può notare anche la posizione le griglie di ripresa.

Sui canali sia dei diffusori che delle griglie sono installati dispositivi che ne regolano la portata. Essendo la tipologia di impianto a portata di immissione costante con ripresa variabile, i diffusori di immissione disporranno di regolatori di portata a flusso costante detti CAV (Costant Air Volume), mentre le griglie di ripresa disporranno di regolatori a portata variabile detti VAV (Variable Air Volume).

Nei CAV è solitamente presente un regolatore a taratura manuale in cui è possibile settare il valore di portata desiderato. In questo modo, attraverso una serranda interna di regolazione comandata da una molla, il componente è in grado di mantenere il flusso d'aria impostato. Questi dispositivi oltre ad essere installati sui canali dedicati ai



diffusori, sono presenti anche nei canali di estrazione delle cappe, essendo quest'ultime a portata costante.

Nei regolatori a portata variabile VAV, invece, la portata è regolata da una serranda collegata a un servocomando elettronico che comunica con un regolatore ambiente. Nel caso specifico del laboratorio in esame, il regolatore ambiente comunica anche con una sonda di pressione differenziale che misura il salto di pressione tra il locale in cui è installata e l'ambiente esterno.



Nel momento in cui la sonda rileva una variazione del valore differenziale di pressione rispetto a quello di set-point, comunica alla VAV la necessità di aprire/chudere la serranda. In questo modo viene sempre garantito il ΔP imposto. Le VAV presenti sono state dimensionate in modo tale che la portata di progetto sia circa il 50% della del campo di regolazione della VAV. Questo perché attorno a quel valore si ha un migliore e più accurato controllo della portata.

15875

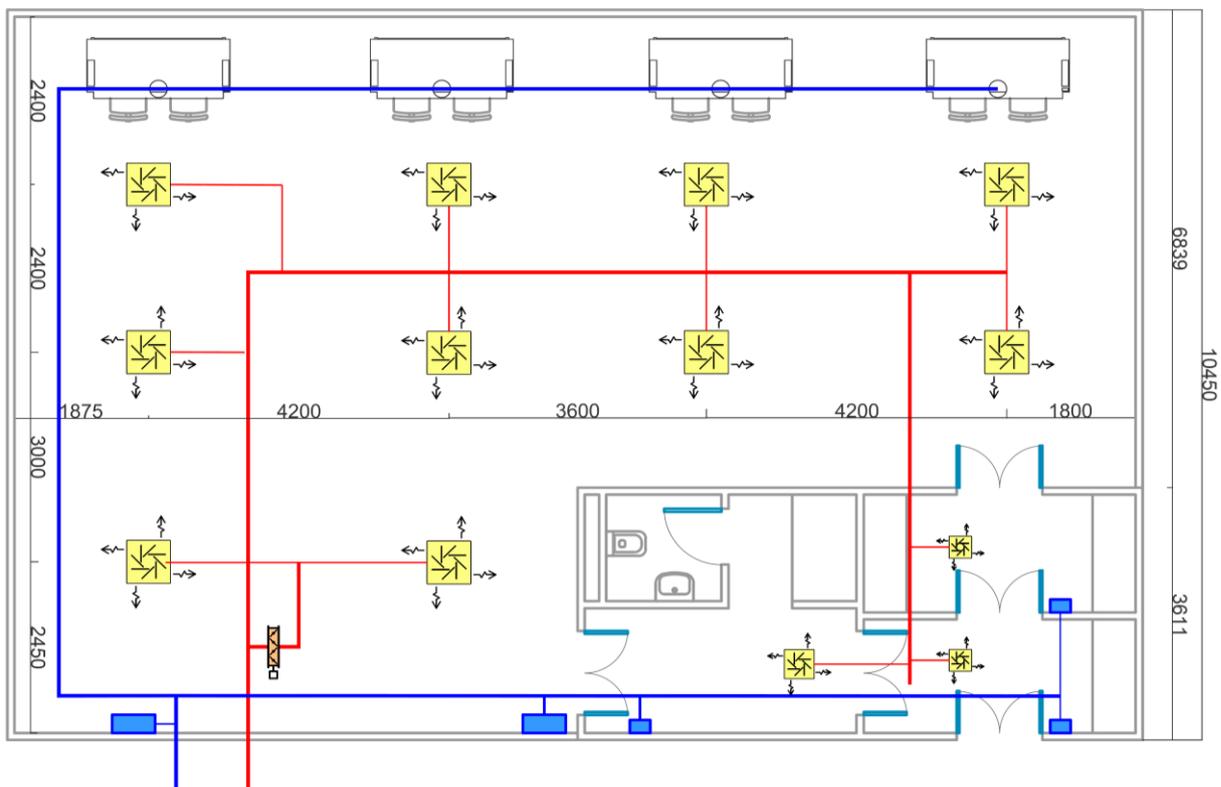


Figure 6.5 - Layout quotato dei diffusori nel laboratorio

6.4 P&ID e logiche di controllo e regolazione

Il P&ID (Piping and Instrumentation Diagram o Process and Instrumentation Diagram) è un disegno che mostra le connessioni, le apparecchiature, le strumentazioni e le principali grandezze di riferimento di un impianto o processo. Esso è utile per avere un'idea chiara e completa del funzionamento del sistema.

Analizzando il P&ID del laboratorio BSL3 in esame si può notare che una Unità di Trattamento Aria (figura 6.1) serve il laboratorio, composto da 4 locali. L'aria viene immessa nei 4 locali attraverso canali dotati di CAV e tubazione flessibile per connettersi ai diffusori con filtro HEPA H14. Il sistema di estrazione opera attraverso un Estrattore che è fisicamente separato dall'UTA e aspira l'aria dai 4 locali attraverso apposite griglie di ripresa e regolatori di portata VAV che, grazie a sonde di pressione differenziali presenti in ogni locale e regolatori ambiente, riescono a modulare la portata per e controllare la pressione dei locali mantenendola sempre al valore di set-point. L'aria estratta viene filtrata attraverso filtri HEPA H14 situati in appositi contenitori di sicurezza detti Canister che permettono la loro sostituzione in totale sicurezza, senza entrare in contatto con il filtro considerato "infetto". Il controllo della temperatura ambiente avviene mediante sonde di temperatura collegate attraverso il controllore alle valvole a tre vie dell'alimentazione delle batterie di post-riscaldamento che modulando la portata regolano la potenza da trasferire all'aria che le attraversa.

Regolazione

Più nel dettaglio, il controllo della pressione negli ambienti avviene grazie ad una sonda di pressione differenziale presente in ogni locale. La sonda attraverso un cavo bus comunica con un regolatore ambiente a cui è collegato anche il servocomando della VAV posta sul canale di ripresa. In condizione stazionarie di funzionamento dell'impianto, si analizza la logica di regolazione della pressione nel caso in cui venga aperta una porta.

Quando la porta 1 si apre (Figura 6.1), il locale F1(-15 Pa) e il corridoio (+0 Pa) vengono messi in comunicazione e, essendo il corridoio molto più grande del locale F1, si può assumere che quest'ultimo si porti alla pressione del corridoio. La sonda di pressione del locale F1 comunica il valore di pressione al regolatore ambiente che, per riportare il valore a quello di set-point, apre la serranda servocomandata della VAV del canale di ripresa. Essendo cambiato il valore di pressione nel locale F1, aumenta la portata d'aria sottoporta verso i locali F2 ed F3 causando in essi un aumento di pressione. Per compensare questo aumento di portata e mantenere il valore di pressione al set-point, accade quindi la stessa sequenza di eventi: la sonda di pressione legge uno scostamento dal valor di set-point, lo comunica al regolatore il quale apre la serranda di regolazione della VAV del canale di ripresa. Quando la porta 1 viene chiusa, si attende che tutte le pressioni ritornino al valore di set point; solo

allora è possibile aprire la porta 2. Si ricorda che ogni porta è interbloccata secondo la logica descritta nel paragrafo 5.5. La medesima logica di regolazione si applica anche all'apertura delle porte 2-3-4-5. In questo modo è possibile sia evitare turbolenze eccessive nel locale di laboratorio che potrebbero compromettere la sicurezza degli operatori e dell'ambiente che causare forti sbalzi di pressione che comprometterebbero il flusso d'aria sempre entrante nel laboratorio creando così fuoriuscite d'aria potenzialmente infetta.

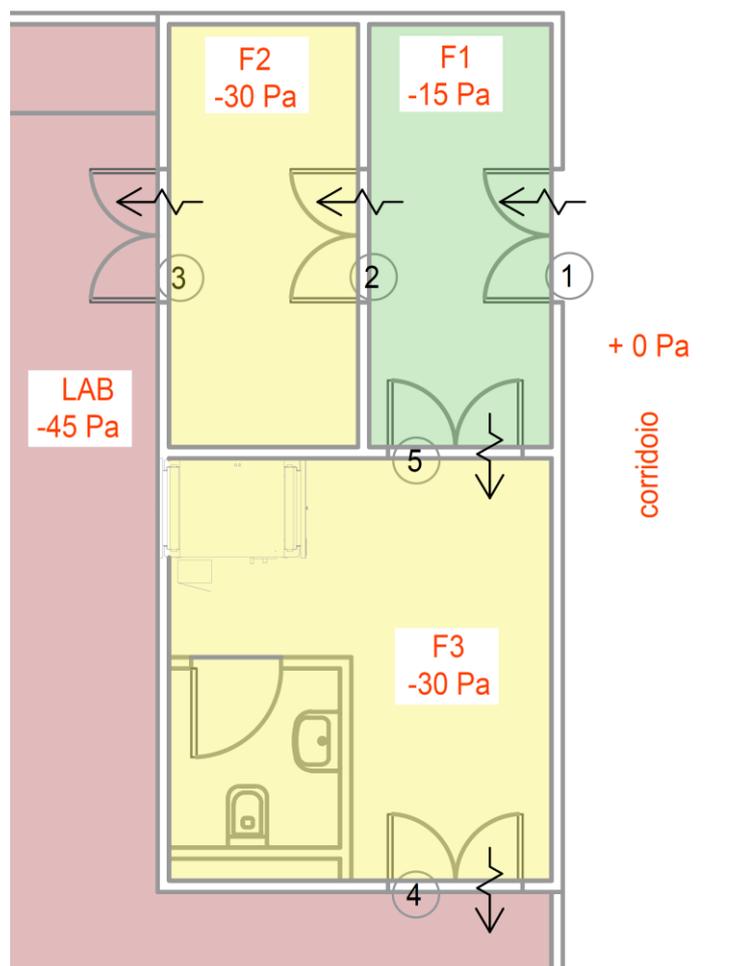
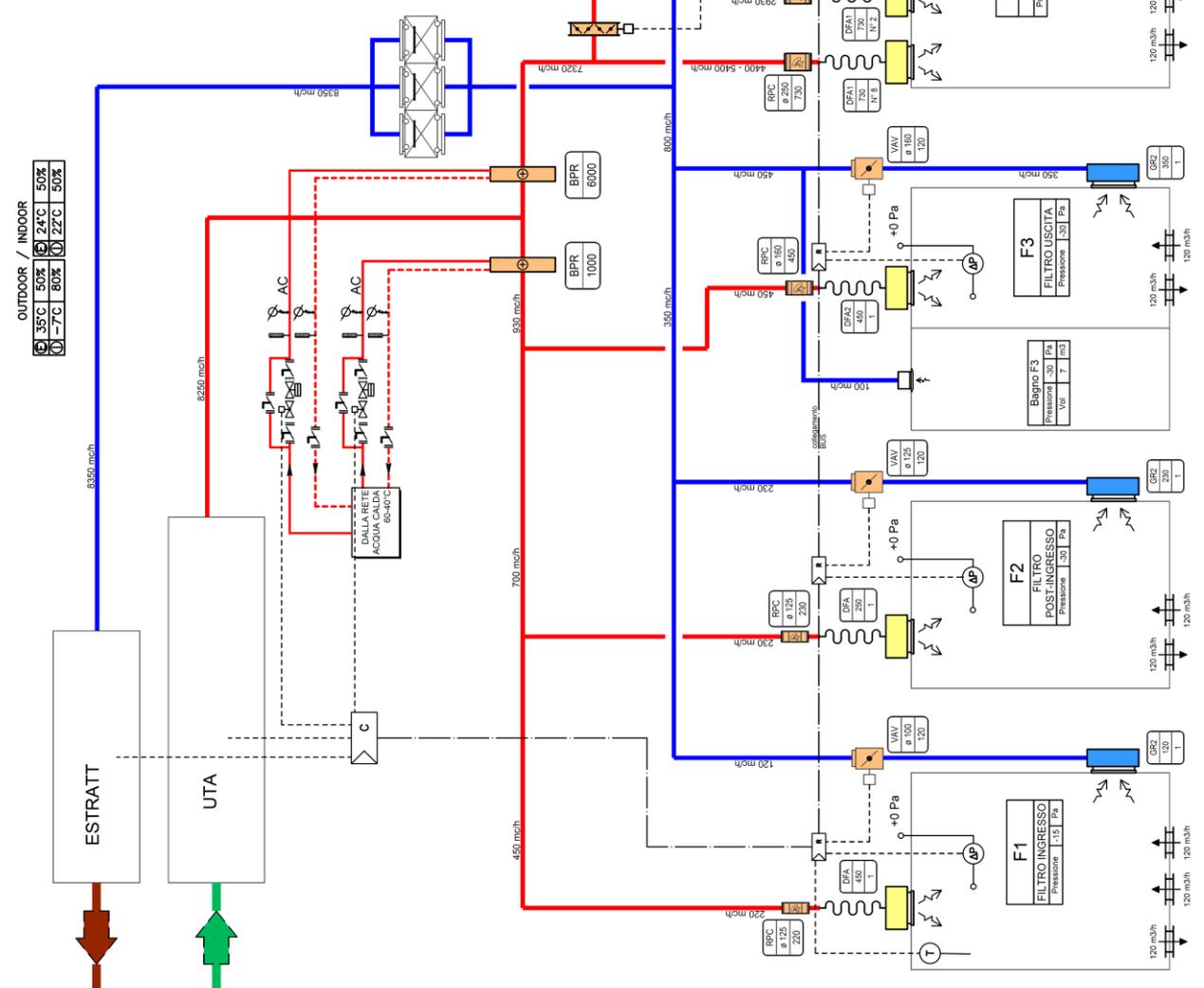


Figura 6.1 - Dettaglio planimetria laboratorio

| | |
|--|---|
| | Serranda APERTA/CHIUSA servomandata |
| | Confezioni di sicurezza per filtro tipo CANISTER L 610 H 610 P 300 con filtro HEPA H14 a sette filtri a piccole pieghe con portata nominale di 3000 m ³ /h |
| | BATTERIA DI POST-RISCALDO DA CANALE CONFEZIONI DI DIMENSIONAMENTO: - Vmax = ... °C - Tout = ... °C - Th = ... °C |
| | Sigla apparecchiatura Portata aria in m ³ /h |
| | Sigla apparecchiatura Diametro Portata aria |
| | Sigla apparecchiatura Dimensione Portata aria |
| | Sigla apparecchiatura Numero di griglie |
| | Sigla apparecchiatura Numero di diffusori |
| | Sonda di pressione differenziale |
| | Sonda di temperatura |
| | Condato flessibile fonoassorbente |
| | Portata sottoporta con superficie di trattamento per singola porta assicurata pari a 0,01 m ² |
| | Controllore elettronico |
| | Regolatore elettronico ambiente |
| | Valvola di regolazione a 2 vie, indipendente dalla pressione, con controllo elettronico della portata |
| | Valvola a farfalla |
| | Valvola di ventilazione aria ø100 da 0 a 75 m ³ /h |



6.5 Unità di trattamento Aria e Estrazione

L'Unità di Trattamento Aria o UTA (Figura 6.6) è un macchinario composto da diversi componenti, assemblabili secondo diverse configurazioni a seconda delle necessità, in cui viene tratta l'aria da fornire, in questo caso, al locale di laboratorio.

Nel caso del laboratorio in esame, non essendoci ricircolo di aria, la parte in cui viene trattata l'aria da immettere in ambiente è fisicamente separata da quella in cui l'aria viene ripresa (Estrattore in Figura 6.7).

Le componenti che differiscono da una classica configurazione sono:

- La presenza di uno scambiatore a doppia batteria. Questa tipologia di scambiatori è spesso utilizzata quando si vuole assolutamente evitare la contaminazione incrociata tra il flusso d'aria di mandata e quello di ripresa. Infatti, essendo le batterie fisicamente separate e scambiando calore tra di loro attraverso un fluido termovettore, la contaminazione non può avvenire neanche in caso di rotture. Questo garantisce la massima igiene e sicurezza. Per contro, questi sistemi hanno una efficienza più bassa rispetto ad altri scambiatori di calore.
- L'assenza di una batteria di post-riscaldamento poiché esse vengono installate, nel canale dell'aria a servizio del laboratorio e dei tre locali airlock.
- La presenza di un doppio ventilatore di mandata e ripresa (non visibile nella vista in sezione) per garantire il mantenimento di una pressione negativa, essenziale ai fini della sicurezza, anche in caso di guasto.

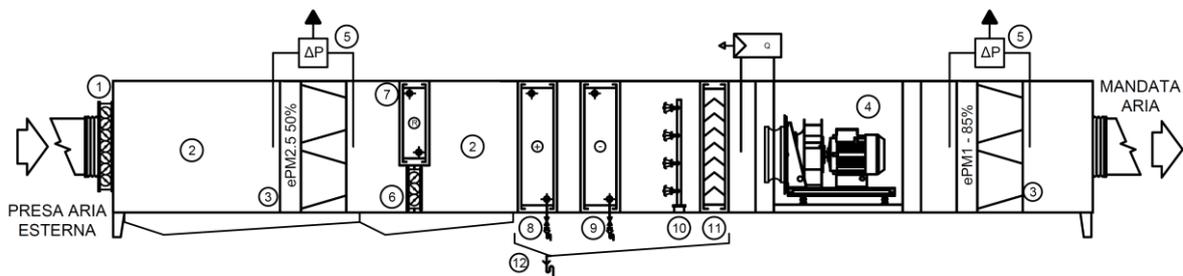


Figure 6.6 - Unità di Trattamento Aria

Nella rappresentazione dell'estrattore, anch'esso avente due ventilatori, si può notare l'assenza di filtrazione all'ingresso. Questo perché l'aria è già filtrata attraverso filtri assoluti prima di arrivare all'estrattore. Un'ulteriore filtrazione sarebbe quindi superflua.

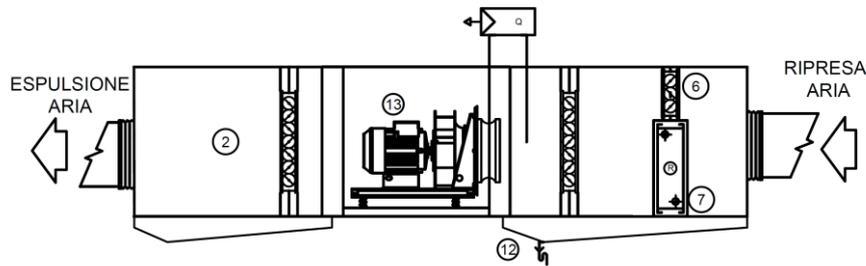


Figure 6.7 - Estrattore

Si riporta in seguito la legenda dei componenti presenti nell'UTA e nell'Estrattore.

- ① SERRANDA SERVOCOMANDATA
- ② CAMERA D'ISPEZIONE/PLENUM
- ③ FILTRO A TASCHE RIGIDE
- ④ DOPPIO VENTILATORE DI MANDATA ARIA DI TIPO PLUG FAN CON SISTEMA DI MISURAZIONE DELLA PORTATA INCORPORATO
- ⑤ MISURATORE DIFFERENZIALE DI PRESSIONE PER INTASAMENTO FILTRO
- ⑥ SERRANDA BY-PASS RECUPERATORE-MANDATA MODULANTE
- ⑦ RECUPERATORE STATICO A PIASTRE. RAPPORTO TEMPERATURA CALCOLATO SECONDO UNI EN-308/98.
- ⑧ BATTERIA DI RISCALDAMENTO
- ⑨ BATTERIA DI RAFFREDDAMENTO E DEUMIDIFICAZIONE
- ⑩ SEZIONE DI UMIDIFICAZIONE A VAPORE
- ⑪ SEPARATORE DI GOCCE IN ACCIAIO INOX
- ⑫ VASCA DI FONDO SEZIONE PER DRENAGGIO ACQUA DI LAVAGGIO DURANTE FASI DI PULIZIA E SANITIZZAZIONE E RACCOLTA CONDENSA SIFONATA
- ⑬ DOPPIO VENTILATORE DI RIPRESA ARIA DI TIPO PLUG FAN CON SISTEMA DI MISURAZIONE DELLA PORTATA INCORPORATO

Figure 6.8 - Legenda UTA ed Estrattore

6.6 Strumentazione impianto

Tutti gli strumenti, sonde e sensori dell'impianto, rappresentati in parte nel P&ID e nel dettaglio dell'UTA ed Estrattore sono necessari al corretto funzionamento dell'intero sistema. La regolazione e supervisione di tutti i segnali saranno gestiti da software presente nel Controllore generale (visibile nel P&ID) che avrà appunto il ruolo di gestire il controllo della pressione nei locali attraverso le VAV, regolare il flusso di acqua calda nelle batterie di post-riscaldamento per controllare la temperatura, gestire gli interblocchi delle porte di accesso e dei ventilatori di mandata e ripresa, controllare e segnalare attraverso allarmi acustici e visivi malfunzionamenti e anomalie del sistema di ventilazione e della pressione ambiente. Presso l'ingresso di ogni locale, è importante la presenza di segnalazioni visive dei parametri fondamentali per la sicurezza degli operatori tramite schermi o strumentazione idonea.

7. Conclusioni

I laboratori a contenimento biologico impongono, come si è visto, un'attenzione particolare per diversi aspetti riguardanti la sicurezza che normalmente non sono presenti in altri contesti: salti di pressioni fra i vari locali ben definiti, sistemi di immissione-estrazione dell'aria, cappe di sicurezza biologica, elementi strutturali, ecc.

A seconda delle attività svolte all'interno, sarà cura degli operatori di laboratorio applicare tutte le buone pratiche di sicurezza affinché gli elementi di contenimento primario e secondario visti in questi capitoli risultino solo una ulteriore protezione.

È infatti importante specificare e sottolineare che dotare un laboratorio di attrezzature e sistemi sofisticati, rappresenta un supplemento e non può sostituire l'adozione delle procedure di sicurezza.

Solo grazie all'azione congiunta di buona pratica microbiologica e sistemi avanzati di sicurezza è possibile garantire elevati standard di sicurezza e protezione previsti dai laboratori BSL.

ALLEGATO I – Principi della filtrazione dell'aria e la normativa di riferimento

La filtrazione dell'aria è un argomento essenziale quando si parla di laboratori e caso dei laboratori a contenimento biochimico questa assume una rilevanza ancora maggiore. Questo perché proprio attraverso i filtri si riescono a contenere i microrganismi infettivi che si manipolano in questi laboratori.

I filtri sono dunque l'unico elemento attraverso il quale si riesce ad ottenere una rimozione quasi totale delle particelle tale da poter definire l'area sterile. Il filtro è caratterizzato da una cornice che serve per sostenere le fibre che costituiscono il mezzo filtrante mentre l'aria fluisce al suo interno.

Nei laboratori a contenimento biochimico vengono utilizzati soprattutto filtri assoluti HEPA che, come si vedrà in seguito, garantiscono efficienze di filtrazione molto elevate.

La capacità dei filtri di catturare particelle dipende da vari fenomeni fisici, meccanici ed elettrici. In quanto il processo di filtrazione è molto complesso si analizza a livello elementare la cattura di una particella da parte di una singola fibra e si suppone che le particelle abbiano una forma sferica.

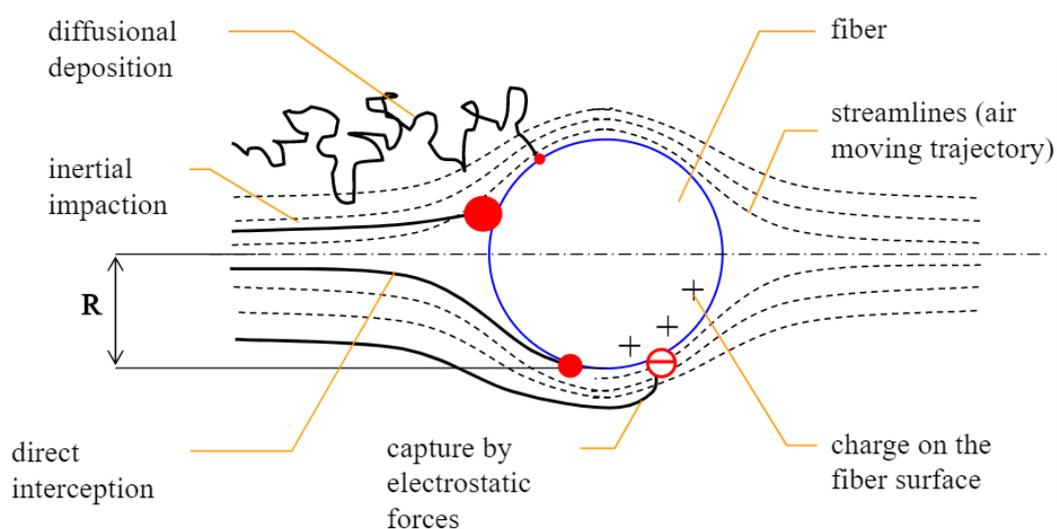


Figura 0.1 - Meccanismi di filtrazione

Possiamo distinguere 5 fenomeni attraverso cui una particella viene catturata dal filtro.

1. *Filtrazione di rifiuto (straining)*

Questo fenomeno si verifica quando le particelle hanno un diametro maggiore dello spazio tra due fibre adiacenti e quindi, non riuscendo ad attraversarle, si incastrano tra di esse. Questo effetto è solitamente raro in quanto le particelle normalmente sospese in aria sono più piccole di 1 μm .

2. *Filtrazione per impatto inerziale*

Quando l'inerzia della particella è abbastanza elevata, questa non riesce a seguire la linea di flusso dell'aria attorno alla fibra e impatta con su di essa e ne rimane attaccata. L'inerzia della particella cresce al crescere della velocità e della massa della particella.

3. *Intercettazione*

Si verifica quando la particella che segue la linea di flusso, avendo un raggio maggiore della distanza tra il suo centro e l'esterno della fibra, tocca quest'ultima ne rimane attaccata. Questo fenomeno è più frequente quando il diametro delle particelle è maggiore, le fibre sono più piccole ed in maggior quantità e la distanza tra le loro è minore.

4. *Diffusione*

Quando la dimensione della particella è minore di 1 μm , questa non segue le linee di flusso ma si muove secondo un movimento Browniano e cambia direzione in modo casuale. In queste continue deviazioni la particella può finire con il collidere con una fibra rimanendo attaccata ad essa.

5. *Attrazione elettrostatica*

Questo fenomeno si verifica quando a causa della diversa carica elettrostatica della particella e della fibra, questa si avvicina alla fibra fino a collidere e rimanere attaccata ad essa. È un fenomeno difficile da prevedere perché dipende dalla carica della particella e da quella della fibra, è influenzato dalla temperatura e umidità. In generale possiamo dire che l'effetto di questo fenomeno aumenta con il diminuire della velocità della particella attraverso il materiale fibroso, con fibre più sottili e con particelle più piccole.

In Figura 8.2 possiamo notare la rappresentazione della sovrapposizione degli effetti dei meccanismi di filtrazione in funzione della dimensione della particella.

Per le particelle inferiori 0.1 μm il meccanismo della diffusione risulta il preponderante. Per dimensioni da 0.1 a 0.4 si ha una fase di stallo in cui le particelle sono troppo grandi per il

fenomeno della diffusione ma troppo piccole per quello dell'intercettazione; questo range risulta essere infatti il più critico indipendentemente dalla tipologia di filtro. Per dimensioni delle particelle superiori ai 0.4, il fenomeno dell'intercettazione insieme a quello dell'impatto inerziale risultano efficaci, portando ad una crescente efficienza globale.

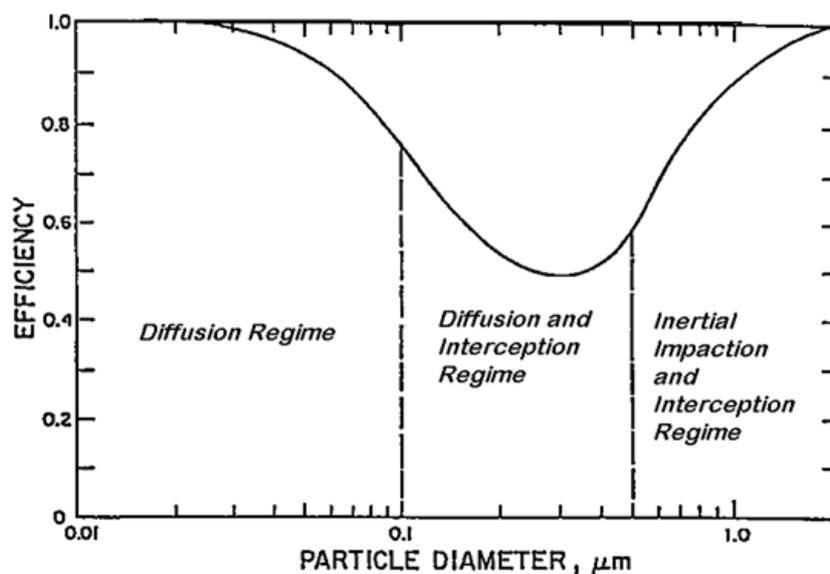


Figura 0.2 - Sovrapposizione degli effetti dei meccanismi di filtrazione

Classificazione e tipologie dei filtri

La classificazione dei filtri è un'operazione di fondamentale importanza per attribuire ad ogni mezzo filtrante le sue caratteristiche e prestazioni. È grazie alla classificazione infatti che si riescono ad utilizzare correttamente i filtri per le differenti applicazioni a seconda delle loro diverse prestazioni.

Una prima distinzione viene possiamo dividere i filtri in due grandi categorie: filtri d'aria per ventilazione generale e filtri assoluti.

I filtri d'aria per ventilazione generale

I primi sono normati dalla UNI EN ISO 16890:2017 "Filtri d'aria per ventilazione generale" divisa in quattro parti che li classifica, definisce specifiche tecniche, requisiti e metodi per la misurazione dell'efficienza spettrale, gravimetrica e l'eliminazione della carica elettrostatica.

Questa norma sostituisce la vecchia UNI EN 779:2012 e la ASHRAE 52.2 prevalentemente utilizzata negli Stati Uniti, con l'obiettivo di creare un'unica normativa utilizzata in tutto il mondo.

La nuova norma introduce una nuova classificazione dei filtri più realistica e immediata basata sulla loro capacità di trattenere il particolato atmosferico (PM10, PM2.5, PM1), essendo quest'ultimo uno dei principali inquinanti presenti nell'aria esterna.

Il nuovo metodo di test prevede l'utilizzo di particelle di dimensioni comprese fra 0,3 µm e 10 µm e non più di particelle con dimensione fissata a 0,4 µm; l'efficienza media è determinata dalla media tra le efficienze iniziale e quella misurata dopo l'eliminazione della carica elettrostatica. La fine del test è determinata dal raggiungimento di una perdita di carico stabilita (200Pa per gli ISO Coarse, 300Pa per tutti gli altri).

Vengono suddivisi in 4 classi di efficienza:

ISO Coarse:

filtro grossolano riferito a particelle comprese fra 0,3 µm e 10 µm.

Viene riportata l'arrestanza in termini di incrementi del 5% a partire dal 5%; non è richiesta la scarica elettrostatica.

ISO ePM10:

riferito a particelle comprese fra 0,3 µm e 10 µm, deve avere un'efficienza iniziale > 50%; non è richiesta la scarica elettrostatica.

ISO ePM2,5:

riferito a particelle comprese fra 0,3 µm e 2,5 µm, deve avere un'efficienza iniziale > 50% anche dopo essere stato scaricato elettrostaticamente.

ISO ePM1:

riferito a delle particelle comprese fra 0,3 µm e 1 µm, deve avere un'efficienza iniziale > 50% anche dopo essere stato scaricato elettrostaticamente.

| Designazione del gruppo | Requisito | | | Valore della classe dichiarato |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------------|
| | ePM _{1, min} | ePM _{2,5, min} | ePM ₁₀ | |
| ISO Coarse | - | - | <50 % | Efficienza gravimetrica iniziale |
| ISO ePM10 | - | - | ≥50 % | ePM ₁₀ |
| ISO ePM2,5 | - | ≥50 % | - | ePM _{2,5} |
| ISO ePM1 | ≥50 % | - | - | ePM ₁ |

Figura 0.3 - Classificazione UNI EN ISO 16890 "Filtri d'aria per ventilazione generale"

I filtri ad alta efficienza

Sono invece normati dalla UNI EN ISO 1822:2019 “Filtri per l'aria ad alta efficienza (EPA, HEPA e ULPA) “, divisa in 5 parti che è stata recentemente revisionata; infatti per le parti 2,3,4,5 si fa riferimento alle rispettive parti della nuova EN ISO 29463:2019 “Filtri e materiali filtranti ad alta efficienza per la rimozione di particelle nell'aria” che descrive e stabilisce tutte le pratiche di test.

La UNI EN ISO 1822-1 riguarda la classificazione, prove di prestazione e marchiatura e si applica ai filtri per l'aria ad alta e altissima efficienza e bassissima penetrazione (EPA, HEPA, ULPA). La determinazione dell'efficienza si basa su un metodo di conteggio delle particelle di un aerosol liquido di prova, tramite, o un contatore ottico di particelle (OPC) o con il metodo di conteggio totale (CNC), che permette di classificare questi filtri in funzione della loro efficienza.

I filtri HEPA e ULPA, si distinguono dai filtri generali non solo per la loro efficienza ma anche per il requisito che ognuno di essi sia testato e certificato individualmente. Questi filtri, infatti, quando vengono prodotti sono sottoposti a collaudo individuale per determinarne l'efficienza secondo la normativa. Inoltre, in alcuni settori, l'integrità dei filtri installati deve essere testata in sito per la ricerca di eventuali perdite del filtro (Leak Test).

Sono classificati in gruppi e classi secondo una efficienza crescente:

Gruppo EPA (Efficiency Particulate Air filter):

Classe E10 - Classe E11 - Classe E12

Gruppo HEPA (High Efficiency Particulate Air filter):

Classe H13 - Classe H14

Gruppo ULPA (Ultra Low Penetration Air filter):

Classe U15 - Classe U16 - Classe U17

| Filter Group Filter Class | Integral value | | Local value a b | |
|--|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Efficiency (%) | Penetration (%) | Efficiency (%) | Penetration (%) |
| E10 | ≥ 85 | ≤ 15 | ...c | ...c |
| E11 | ≥ 95 | ≤ 5 | ...c | ...c |
| E12 | ≥ 99,5 | ≤ 0,5 | ...c | ...c |
| H13 | ≥ 99,95 | ≤ 0,05 | ≥ 99,75 | ≤ 0,25 |
| H14 | ≥ 99,995 | ≤ 0,005 | ≥ 99,975 | ≤ 0,025 |
| U15 | ≥ 99,999 5 | ≤ 0,000 5 | ≥ 99,997 5 | ≤ 0,002 5 |
| U16 | ≥ 99,999 95 | ≤ 0,000 05 | ≥ 99,999 75 | ≤ 0,000 25 |
| U17 | ≥ 99,999 995 | ≤ 0,000 005 | ≥ 99,999 9 | ≤ 0,000 1 |
| <p>^a See 7.5.2 and EN ISO 29463-4.</p> <p>^b Local penetration values lower than those given in the table may be agreed between supplier and purchaser.</p> <p>^c Group E filters (Classes E10, E11 and E12) cannot and shall not be leak tested for classification purposes.</p> | | | | |

Figura 0.4 - Classificazione UNI EN ISO 1822-1 Filtri EPA, HEPA e ULPA

I test principali per questa tipologia di filtri riguardano:

- la caduta di pressione alla portata d'aria nominale;
- l'efficienza di cattura globale (integrale) relativa alla MPPS (most penetrating particle size) ossia alla dimensione della particella più penetrante (o anche la dimensione della particella corrispondente alla minima efficienza), alla portata d'aria nominale;
- l'efficienza di cattura locale relativa alla MPPS alla portata d'aria nominale;
- l'assenza di perdite (solo per H14, U15-17)

Per stabilire la MPPS il fornitore deve essere in grado di definire la curva massima di penetrazione per un range stabilito di dimensioni di particelle, alla velocità nominale sul mezzo filtrante. Questo valore diventa quindi il riferimento per tutte le prove successive atte a stabilire l'efficienza in funzione della classe di appartenenza.

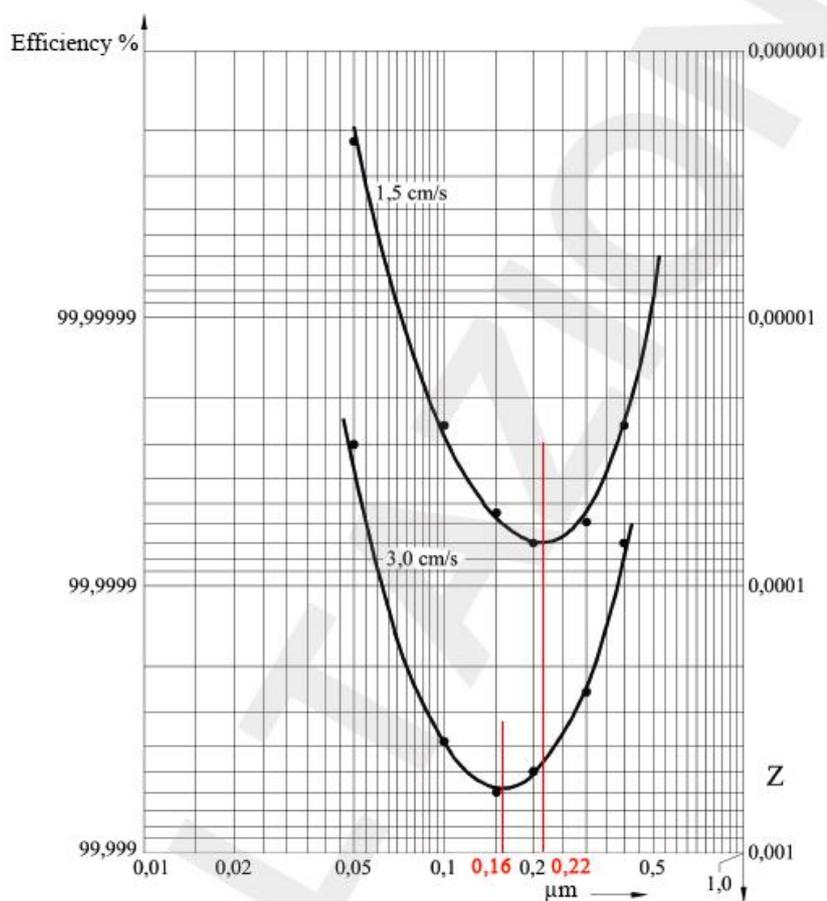


Figura 0.5- Curve di penetrazione per due differenti velocità dell'aria in un filtro ULPA

In Figura 8.5 un esempio di un grafico che mostra due curve di penetrazione per due velocità medie dell'aria per un filtro ULPA. In ascissa vi è la dimensione della particella in μm e in ordinata l'efficienza di filtrazione. Possiamo notare che la MPPS è $0,16 \mu\text{m}$ per una velocità dell'aria all'interno del mezzo filtrante di $3,0 \text{ cm/s}$ mentre è di $0,22 \mu\text{m}$ per una velocità dell'aria di $1,5 \text{ cm/s}$.

Questa differenza è dovuta alla diversa azione dei meccanismi di filtrazione precedentemente descritti al variare della velocità dell'aria, portando quindi a risultati differenti.

Alloggiamento filtri

I filtri esausti dei laboratori a contenimento biochimico una volta esauriti devono essere trattati in modo idoneo in quanto considerati infetti.

La loro sostituzione in modo sicuro è possibile, oltre all'impiego di personale qualificato, grazie all'utilizzo di veri e propri contenitori chiamati CANISTER (Figura 8.6)

ù, che costituiscono l'alloggiamento a tenuta di gas per i filtri. I filtri contaminati non vengono mai a contatto con l'operatore e con l'ambiente poiché rimangono isolati all'interno di un sacco che funge da barriera di protezione nel quale il filtro viene sigillato e smaltito. Anche i nuovi filtri senza mettere in comunicazione diretta il contenitore con l'ambiente esterno.

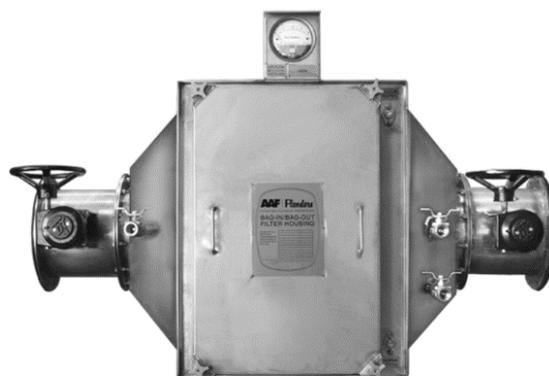


Figura 0.6 - Alloggiamento filtro HEPA tipo CANISTER

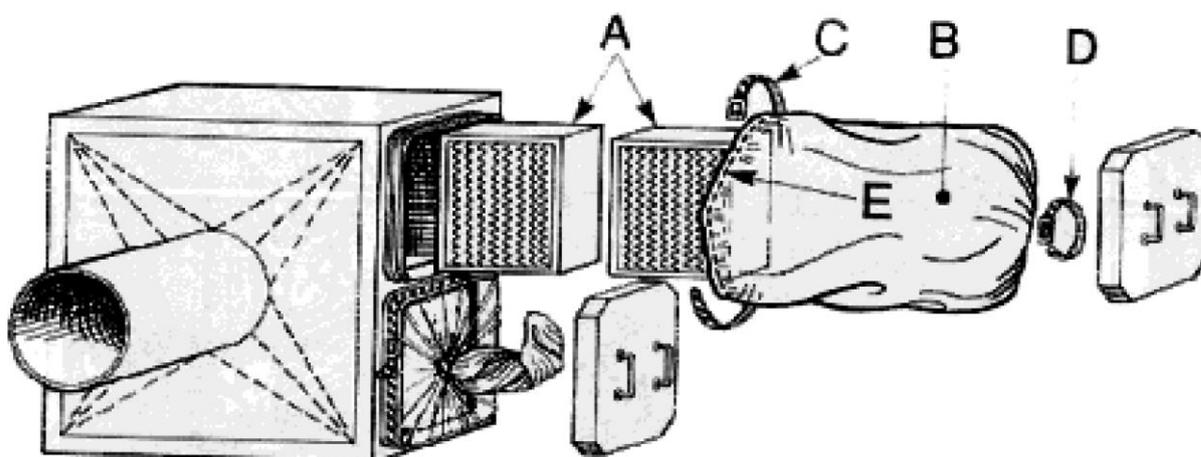


Figura 0.7 - Esempio sostituzione filtro tipo canister

- A. Filtri B. Sacchi C. Cinghie di sicurezza D. Cinghie di chiusura E. cavo di shock collocato sulla bocca del sacco in PVC per assicurare il sacco alla cinghia

ALLEGATO II - Espulsione dell'aria esausta attraverso il camino

È un aspetto critico della progettazione di un laboratorio in quanto si può incorrere facilmente nella corto-circuitazione dell'aria esausta con quella in ripresa. Come vedremo, questo problema è legato non solo alla vicinanza delle bocche di entrata e uscita dell'aria ma coinvolge anche fenomeni aereodinamici dipendenti dalla forma dell'edificio soggetto ai venti predominanti che creano cappe e aree di ristagno. Attraverso accorgimenti e modelli di dispersione possiamo progettare i camini di espulsione in modo adeguato evitando o per lo meno arginando questo problema. I parametri da considerare per la progettazione del camino sono: l'altezza, velocità d'uscita dell'aria, diametro, portata volumetrica, le prese d'aria e le strutture adiacenti. Un altro parametro chiave è l'altezza del pennacchio di fumo che deve essere abbastanza elevata, in modo da ottenere una diluizione dell'aria esausta sufficiente quando questa raggiunge arie sensibili come griglie di aspirazione ed edifici adiacenti. È dipendente dall'innalzamento del pennacchio all'uscita dal camino – quindi alla velocità d'uscita – e all'altezza del camino stesso.

Si utilizza per confrontare diversi sistemi di espulsione: infatti, se il risultato è lo stesso, anche la dispersione e i relativi livelli di concentrazione saranno gli stessi. Il confronto può essere fatto anche per valutare il sistema più efficiente dal punto di vista del consumo energetico, a parità di altezza del pennacchio.

Come riportato nel [2] l'altezza del pennacchio dovrebbe essere calcolata alla distanza di ogni griglia di ripresa posta sottovento rispetto al camino ed essere ridotta se si verifica l'effetto di "stack-tip downwash". La seguente formula fornisce un valore conservativo, lasciando un margine di sicurezza:

$$h = h_s + h_r - h_a \text{ dove:}$$

h: altezza del centro del pennacchio [m]

h_s : altezza del camino [m]

h_r : innalzamento del pennacchio ad una data distanza dal camino [m]

h_a : stack-tip downwash [m]

Dal momento che l'innalzamento del pennacchio è benefico, i cappelli antipioggia sono fortemente sconsigliati in quanto annullerebbero l'innalzamento.

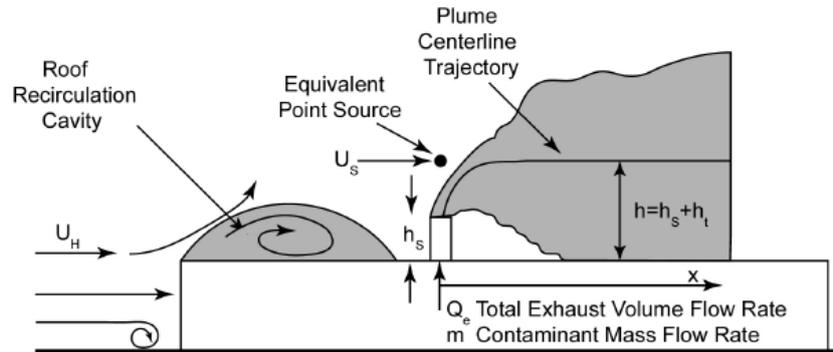


Figura 0.1 - Profili vento (Tratta da ASHRAE Laboratory Design Guide - Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems (2nd Edition))

$$h_t = \min \left\{ \left(\frac{3F_m \cdot x}{\beta_j^2 \cdot U_H^2} \right)^{\frac{1}{3}}, h_f \right\}, \text{ inn. pennacchio a distanza } x \text{ dal camino, in direzione del vento, [m]}$$

$$F_m = V_e^2 \left(\frac{d^2}{4} \right), \text{ momento del flusso, [m}^4/\text{s}^2]$$

$$\beta_j = 0.4 + \left(\frac{1.2U_H}{V_e} \right), \text{ coefficiente di trascinamento del getto}$$

$$h_f = \frac{0.9 \left(F_m \cdot \frac{U_H}{U^*} \right)^{\frac{1}{2}}}{U_H \cdot \beta_j}, \text{ innalzamento finale del pennacchio, [m]}$$

$$\frac{U_H}{U^*} = 2.5 \ln \left(\frac{H}{z_0} \right), \text{ equazione logaritmica del profilo del vento}$$

$$h_d = d_e \left(3 - \frac{\beta V_e}{U_H} \right) \text{ [m]}$$

β = parametro di progetto; 1.0 senza cappello antipioggia, 0 con

x = distanza dal camino in direzione del vento, (m)

V_e = velocità d'uscita dal camino, (m/s)

d = diametro del camino, (m)

U_H = velocità del vento in cima al camino, (m/s)

H = altezza del camino dal suolo (es., altezza edificio più altezza del camino), (m)

U^* = spinta del vento, (m)

z_0 = rugosità del suolo, (m)

Lo stack tip downwash è un fenomeno che accade quando la velocità di uscita dei fumi è piccola rispetto alla velocità del vento; ovvero quando $V_e / U_H < 1.5$.

Per evitare questo fenomeno ASHRAE consiglia velocità di uscita dei fumi 1.5 volte superiori alla velocità del vento di progetto. Per camini con diametro maggiore di 250mm il calcolo di h_d risulta essere molto conservativo.

La rugosità del suolo z_o , il fattore di rugosità a e lo strato limite della quantità di moto δ dipendono dal tipo di terreno.

Ricordiamo che lo strato limite è definito come la quota a cui la velocità del vento può considerarsi costante, partendo da una velocità nulla a livello del suolo.

La seguente tabella fornisce questi valori ricavati sperimentalmente per diverse tipologie di suolo.

Table 1 - Fattori dipendenti dal tipo di suolo

| Tipo suolo | z_o [m] | a | δ [m] |
|------------------------|-----------|------|--------------|
| Piatto, acqua, deserto | 0.01 | 0.10 | 195 |
| Aeroporto, pascolo | 0.14 | 0.14 | 250 |
| Suburbano | 2.0 | 0.22 | 1130 |
| Urbano | 6.0 | 0.33 | 1400 |

Il calcolo di h_d ed h_r richiede una stima della velocità del vento accurata. Se in loco non è presente uno strumento per la rilevazione di tale dato, è possibile correggere quello della più vicina stazione meteo con la seguente formula.

$$U_H = U_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} * \left(\frac{H}{\delta} \right)^a$$

U_H = velocità del vento in cima al camino, (m/s)

U_{met} : velocità del vento alla stazione meteorologica (m/s)

H_{met} = altezza della stazione meteo (m)

a_{met} = fattore di rugosità per la stazione meteo

H = altezza del camino dal suolo (m)

δ_{met} = strato limite alla stazione meteo (m)

Per i sistemi con regolazione VAV (Variable Air Volume), per assicurare il mantenimento della quota minima del pennacchio è importante progettare il camino considerando la minima portata di aria esausta.

Altre soluzioni potrebbero prevedere l'utilizzo di camini a geometria variabile che consentono di mantenere la velocità di uscita costante. Come possiamo vedere dalle precedenti formule,

però, l'innalzamento del pennacchio dipende anche dal diametro; in questi casi occorre quindi utilizzare il diametro minimo per valutare le prestazioni del camino.

Il calcolo dell'altezza del pennacchio è necessario a fornire un valore di input al modello di dispersione che si andrà ad utilizzare ed a verificare, quindi, se i limiti di concentrazione delle varie sostanze adoperate sono rispettati.

Andamento del flusso di vento

Di fondamentale importanza per evitare i problemi inizialmente citati è conoscere l'andamento del flusso di vento attorno all'edificio. Questo è influenzato da fattori come il profilo della velocità del vento, la turbolenza a monte dell'edificio, l'angolo di attacco del vento con l'edificio e la forma dell'edificio Figura 9.2.

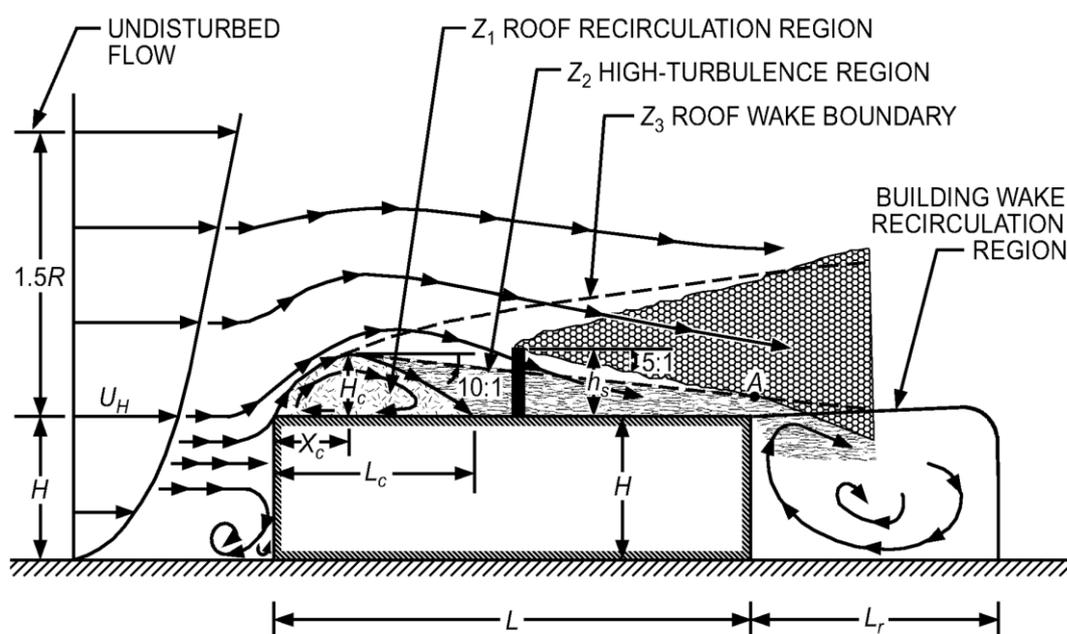


Figura 0.2 - Linee di flusso del vento attorno ad un edificio. (Tratta da: 2015 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications)

Un'analisi accurata di questo fenomeno può essere studiata attraverso simulazioni fluidodinamiche. Senza quest'ultima però, possiamo comunque fare delle scelte sensate nel posizionare il camino e le varie prese d'aria.

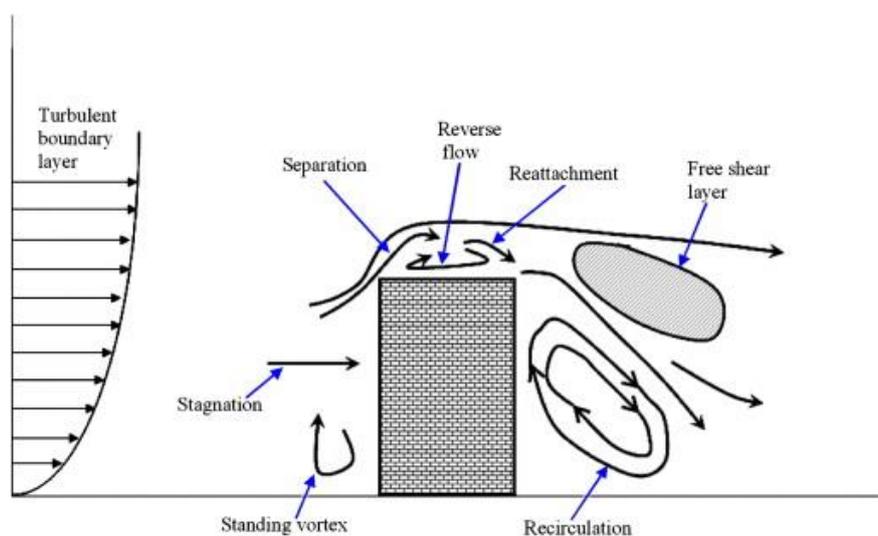


Figura 0.3 - Zone di turbolenza e stagnazione attorno ad un edificio (Tratta da: J. Tyndall, J. Colletti - *Air quality and shelterbelts: Odor mitigation and livestock production*)

Come notiamo anche dalla Figura 9.3, un punto di stagnazione è sicuramente la parte inferiore del muro sopravvento. In presenza di spigoli vivi si creano delle zone in depressione che causano turbolenze e relativi ristagni; nella parte alta dell'edificio si creano, infatti, delle zone di ristagno che al crescere della velocità del vento si possono allungare fino a coprire 1/2 o anche i 2/3 della facciata dell'edificio posto sottovento.

Come riportato nel [2] capitolo 9, la dimensione di queste zone di ricircolo create dagli spigoli dell'edificio può essere stimata attraverso un fattore R:

$$R = B_s^{0.67} \cdot B_L^{0.33} \quad (\text{Se } B_L > 8B_s \rightarrow B_L = 8B_s) \quad [m]$$

R = lunghezza zona di turbolenza, (m)

B_s = dimensione della facciata dell'edificio più piccola posta sopravvento, altezza o larghezza (m)

B_L = dimensione della facciata dell'edificio più grande posta sopravvento, altezza o larghezza (m)

È importante capire le macro-zone in cui si crea la turbolenza e il ricircolo in modo da evitare l'installazione di griglie di ripresa in quelle zone: per gli edifici a tetto piano, la zona di turbolenza si estende per circa 0.9R partendo dallo spigolo della facciata sopravvento (L_c) e raggiunge un'altezza di circa 0.22R (H_c); la zona di turbolenza nella zona sottovento si estende invece per circa 1.0R.

Notiamo come è necessario che l'altezza del pennacchio raggiunga un'altezza sufficiente ad evitare le bocche di aspirazione dell'impianto.

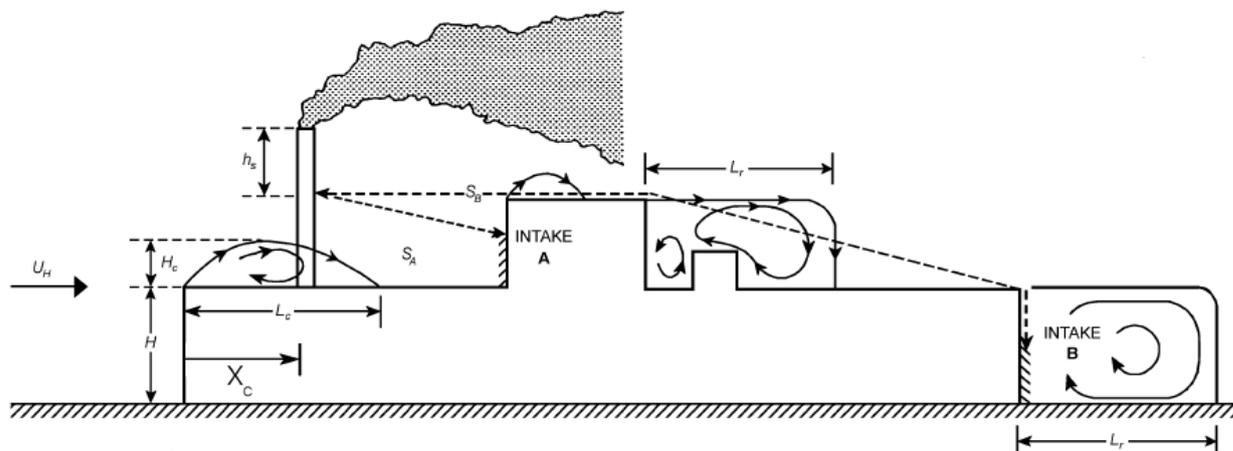


Figura 0.4 - Zone di turbolenza e ricircolo su un edificio (Tratta da: ASHRAE Laboratory Design Guide - Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems (2nd Edition))

È importante anche la presenza di edifici posti sopravento a quello in esame poiché creano turbolenze che modificano considerevolmente l'andamento del vento. Anche l'angolo di attacco del vento può influenzare notevolmente i flussi sulle superfici dell'edificio e tutte le relative scie.

Alcuni consigli pratici suggeriti nel [4] "Wilson et al." sono:

- Evitare di collocare camini vicino i bordi del tetto per evitare la zona di ricircolo che si crea in quei punti;
- Con un edificio più alto posto sopravento rispetto a quello avente il camino, bisognerà incrementare l'altezza del pennacchio per evitare di emettere i fumi nella zona di turbolenza e ricircolo (Figura 9.5).

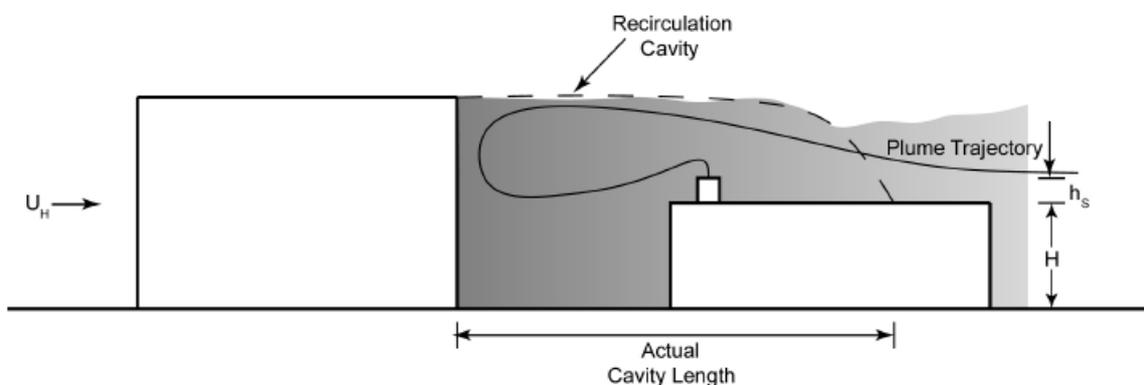


Figura 0.5 - Area di turbolenza in presenza di un edificio più alto posto sopravento a quello emettitore (Tratta da: ASHRAE Laboratory Design Guide - Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems (2nd Edition))

I principali problemi nella progettazione del camino si possono riscontrare, come si è visto, nella miscelazione dell'aria esausta e nel mantenimento di un'altezza sufficiente, nell'estetica, nell'uso di energia, nel rumore nelle vibrazioni e nel drenaggio dell'acqua piovana.

Per ridurre il consumo energetico, una soluzione potrebbe essere progettare il sistema per essere a portata variabile (VAV).

Rumore e vibrazioni possono essere limitati, come consigliato da ASHRAE, mantenendo una velocità dell'aria d'uscita al camino sotto i 15-20 m/s.

Soluzioni per evitare l'ingresso dell'acqua piovana nei condotti dell'aria

Il problema dell'ingresso dell'acqua piovana nei condotti può essere evitato con una velocità dell'aria esausta superiore ai 13-15 m/s. Quando da progetto questa risulta essere inferiore, si possono adottare delle soluzioni tecniche che impediscono all'acqua di raggiungere i componenti sensibili. È sconsigliata l'installazione di cappelli anti-pioggia alla fine del camino.

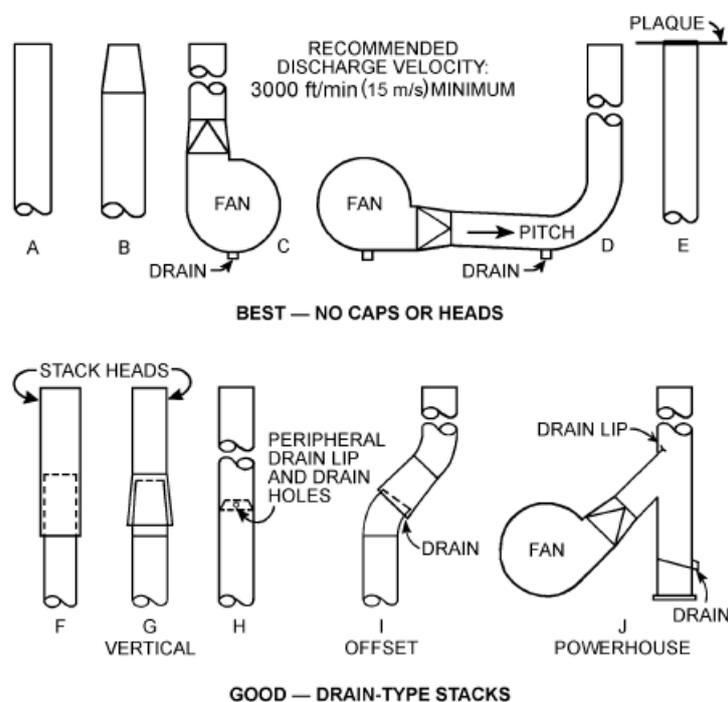


Figura 0.6 - Soluzioni per il drenaggio dell'acqua piovana all'interno del camino. (Tratta da: ASHRAE Laboratory Design Guide - Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems (2nd Edition))

BIBLIOGRAFIA e RIFERIMENTI

1. Manuale di Sicurezza nei laboratori - AIREPSA, ISPES
2. ASHRAE Laboratory Design Guide - Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems (2nd Edition)
3. 2015 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications
4. Design Requirements Manual (DRM) - National Institutes of Health (NIH)
5. Guidelines for Laboratory Design: Health, Safety, and Environmental Considerations, 4th Edition- Louis J. DiBerardinis, Janet S. Baum, Melvin W. First, Gari T. Gatwood, Anand K. Seth
6. Air Filtration in HVAC System – Rehva Handbook – Gustavsson, Ginestet, Tronville, Hyttinen
7. Designing a Facility with Both Good Manufacturing Practice (GMP) and Biosafety in Mind: Synergies and Conflicts - Halkjær-Knudsen, V. (2007).
8. Laboratory Ventilation ACH Rates Standards and Guidelines – AIRCUITY
9. SaSp- IMP. MECC. OSPEDALI - PARTE 3 - HVAC LABORATORI – Matteo Bo
10. UNI EN 12128:2000 “Biotecnologie - Laboratori di ricerca, sviluppo e analisi - Livelli di contenimento di laboratori microbiologici, aree di rischio, situazioni e requisiti fisici di sicurezza”
11. UNI EN 12469:2001 “Biotecnologie - Criteri di prestazione per le postazioni di sicurezza microbiologica”
12. UNI EN 14175 “Cappe di aspirazione”
13. American Standard ANSI/NSF 49
14. UNI EN ISO 16890 “Filtri d'aria per ventilazione generale”
15. UNI EN ISO 1822:2019 “Filtri per l'aria ad alta efficienza”