



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.A. 2024/2025

Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2025

Progetto della rete di canalizzazione dell'aria per la zona uffici di un edificio industriale

Relatore:

Prof. Simonetti Marco

Correlatori:

Prof. Masoero Marco Carlo

Ing. Origlia Fabrizio

Candidata:

Boffelli Masha

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere la mia sincera gratitudine ad Argotec S.r.l. per aver messo a disposizione la planimetria necessaria allo sviluppo del mio studio.

Un ringraziamento speciale all'ingegnere Fabrizio Origlia, per avermi seguita con attenzione e disponibilità lungo tutto il percorso, offrendo preziosi consigli e suggerimenti.

Ringrazio inoltre il professor Masoero per avermi fornito solide basi di progettazione, che si sono rivelate essenziali per affrontare questo lavoro, e il professor Simonetti per aver accettato di essere il mio relatore, offrendomi la possibilità di portare a termine questo percorso accademico.

INDICE

I. ELENCO DELLE FIGURE

II. ELENCO DELLE TABELLE

SOMMARIO

1. DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO E DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI RICAMBIO ARIA	1
1.1. Geometria dell'edificio	1
1.1.2. Analisi degli spazi	3
1.1.2. Distribuzione delle aree per unità di trattamento dell'aria	5
1.2. Calcolo della portata di ricambio	6
1.2.1. Normativa UNI 10339	7
1.2.2. Normativa UNI 16798	10
1.2.2.1. Metodo 1 - Qualità dell'aria percepita	11
2. RETE DI IMMISSIONE	14
2.1. Scelta dei terminali	19
2.2. Procedura di calcolo	21
2.3. Bilanciamento della rete	28
2.4. Risultati	30
2.4.1. Mandata UTA 1	30
2.4.2. Mandata UTA 2	35
3. RETE DI ESTRAZIONE	42
3.1. Scelta dei terminali	42
3.2. Calcolo progettuale	48
3.3. Bilanciamento della rete	48
3.4. Risultati	48
3.4.1. Ritorno UTA 1	48
3.4.2. Ritorno UTA 2	53
4. PROGETTAZIONE SU REVIT	59
4.1. Famiglie di elementi	59
4.2. Processo di modellazione	61
4.3. Validazione del modello	65
5. CONCLUSIONI	73
III. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	

I. ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1 - SpacePark di Argotec, foto aerea dell'edificio	2
Figura 1.2 - Planimetria dei locali del piano in analisi	3
Figura 1.3 - Distinzione aree per unità di trattamento dell'aria	5
Figura 2.1 - Esempio di configurazioni da evitare e da adottare nella progettazione della rete	14
Figura 2.2 - Layout impianti di immissione	16
Figura 2.3 - Trave fredda attiva AERMEC modello EHT	19
Figura 2.4 - Configuratore dell'apparecchio da catalogo AERMEC	20
Figura 2.5 - Esempio semplificato della rete	22
Figura 2.6 - Diagramma di flusso del calcolo	27
Figura 3.1 - Bocchetta di ventilazione con serranda a scorrimento SCHAKO modello IB-R	43
Figura 3.2 - Determinazione delle perdite di carico da catalogo SCHAKO	42
Figura 3.3 - Valori consigliati del parametro "altezza" del terminale in funzione del diametro della condotta da catalogo SCHAKO	44
Figura 3.4 - Grafico per determinare la geometria del terminale da catalogo SCHAKO	44
Figura 3.5 - Layout impianti di estrazione	46
Figura 4.1 - Vista 3D degli impianti	62
Figura 4.2 - Vista dall'alto degli impianti	63
Figura 4.3 - Cattura da Revit del ramo più sfavorito per ritorno 1	64
Figura 4.4 - Dettaglio della rete in prossimità della bocchetta più critica	64

II. ELENCO DELLE TABELLE

Tabella.1.1 - Destinazione d'uso dei locali	3
Tabella 1.2 - Volumi UTA 1	6
Tabella 1.3 - Volumi UTA 2	6
Tabella 1.4 - Indici di affollamento ns per ogni metro quadro di superficie	7
Tabella 1.5 - Numero di persone ambienti UTA 1	8
Tabella 1.6 - Numero di persone ambienti UTA 2	8
Tabella 1.7 - Portate di aria esterna in edifici adibiti ad uso civile	9
Tabella 1.8 - Portate d'aria di ricambio UTA 1 (UNI 10339)	10
Tabella 1.9 - Portate d'aria di ricambio UTA 2 (UNI 10339)	10
Tabella 1.10 - Esempi di portate di ventilazione di progetto predefinite per un ufficio singolo di 10 m ² in un edificio a basso inquinamento (per persone non adattabile)	11
Tabella 1.11 - Categorie per le portate predefinite di aria di estrazione	12
Tabella 1.12 - Portate d'aria di ricambio UTA 1 (UNI 16798)	12
Tabella 1.13 - Portate d'aria di ricambio UTA 2 (UNI 16798)	12
Tabella 1.14 - Portate massime d'aria di ricambio UTA 1	13
Tabella 1.15 - Portate massime d'aria di ricambio UTA 2	13
Tabella 1.16 - Portate totali di ventilazione per UTA1 e UTA2	13
Tabella 2.1 - Definizione geometria della rete di mandata 1: nodi e lunghezze	17
Tabella 2.2 - Definizione geometria della rete di mandata 2: nodi e lunghezze	18
Tabella 2.3 - Riepilogo modelli terminali UTA 1	20
Tabella 2.4 - Riepilogo modelli terminali UTA 1	20
Tabella 2.5 - Velocità massime ammissibili in un impianto HVAC	22
Tabella 2.6 - Elenco dei diametri standard adottati nella progettazione [mm]	22
Tabella 2.7 - Portate della rete per mandata 1	30
Tabella 2.8 - Sezioni delle condotte e velocità effettive per mandata 1	31
Tabella 2.9 - Perdite totali di carico per mandata 1	32
Tabella 2.10 - Sbilanciamento della rete per mandata 1	33
Tabella 2.11 - Pressioni in ingresso e in uscita per mandata 1	34
Tabella 2.12 - Portate della rete per mandata 2	35
Tabella 2.13 - Sezioni di condotte e velocità effettive per mandata 2	36
Tabella 2.14 - Perdite totali di carico per mandata 2	37
Tabella 2.15 - Sbilanciamento della rete per mandata 2	39
Tabella 2.16 - Pressioni in ingresso e uscita per mandata 2	40
Tabella 3.1 - Portate estratte dai locali per ciascuna UTA	42
Tabella 3.2 - Definizione geometria della rete di ritorno 1: nodi e lunghezze	47
Tabella 3.3 - Definizione geometria della rete di ritorno 2: nodi e lunghezze	47
Tabella 3.4 - Portate della rete per ritorno 1	48
Tabella 3.5 - Sezioni di condotte e velocità effettive per ritorno 1	49
Tabella 3.6 - Perdite totali di carico per ritorno 1	50
Tabella 3.7 - Sbilanciamento della rete per ritorno 1	51
Tabella 3.8 - Pressioni in ingresso e uscita per ritorno 1	52
Tabella 3.9 - Portate della rete per ritorno 2	53
Tabella 3.10 - Sezioni di condotte e velocità effettive per ritorno 2	54

Tabella 3.11 - Perdite totali di carico per ritorno 2	55
Tabella 3.12 - Sbilanciamento della rete per ritorno 2	56
Tabella 3.13 - Pressioni in ingresso e uscita per ritorno 2	57
Tabella 4.1 - Famiglie Revit usate nel progetto	59
Tabella 4.2 - Informazioni sul sistema, report di Revit	65
Tabella 4.3 - Calcoli della perdita di pressione totale per sezioni, report di Revit	66
Tabella 4.4 - Confronto tra i risultati ottenuti per la mandata 1	68
Tabella 4.5 - Confronto tra i risultati ottenuti per la mandata 2	69
Tabella 4.6 - Confronto tra i risultati ottenuti per la ritorno 1	70
Tabella 4.7 - Confronto tra i risultati ottenuti per la ritorno 2	71
Tabella 4.8 - Confronto tra le perdite di carico nei quattro impianti	71

SOMMARIO

Negli ultimi anni, la progettazione degli impianti HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*, ovvero riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria) ha assunto un ruolo sempre più centrale nell'ottimizzazione del comfort indoor, con l'obiettivo di garantire non solo un adeguato ricambio d'aria, ma anche livelli di rumore contenuti e condizioni ambientali ottimali per gli utenti, nel rispetto delle normative vigenti.

Questa tesi si concentra sulla progettazione di un sistema di ventilazione per la zona uffici di un edificio industriale risalente agli anni Settanta, con particolare attenzione al dimensionamento delle condotte, al calcolo delle perdite di carico e al bilanciamento della rete. Il lavoro prevede l'analisi delle portate di ricambio in conformità alle normative UNI 10339 e UNI 16798, seguita dalla progettazione delle reti di mandata ed estrazione dell'aria, due per tipologia, servite da due distinte unità di trattamento dell'aria. In particolare, vengono determinate la geometria del sistema e le sezioni delle condotte, oltre che la velocità del flusso, le perdite di carico e il grado di sbilanciamento delle reti in analisi, con l'obiettivo di individuare il tratto più sfavorito e dimensionare, di conseguenza, il ventilatore.

Il sistema viene sviluppato utilizzando due strumenti di progettazione: AutoCAD e Autodesk Revit. In una prima fase, AutoCAD viene impiegato per la realizzazione dello schema unifilare dell'impianto e per supportare i calcoli preliminari basati sulla metodologia comune di calcolo. Successivamente, il sistema viene modellato tridimensionalmente in ambiente Autodesk Revit, che permette l'estrapolazione automatica di parametri chiave come perdite di pressione e velocità del flusso, utilizzando come input i dati geometrici ricavati dal predimensionamento.

L'obiettivo della tesi è dunque individuare le soluzioni più efficienti per garantire una distribuzione ottimale dell'aria, tenendo conto sia degli aspetti normativi che delle esigenze di comfort termico e acustico. Infine, verranno analizzati e confrontati i risultati ottenuti attraverso i due diversi approcci progettuali allo scopo di validare, alla luce del metodo tradizionale manuale, la correttezza dei risultati forniti automaticamente dalla modellazione in ambito BIM in ambiente Autodesk Revit.

1. DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO E DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI RICAMBIO ARIA

Il punto di partenza per la progettazione è la definizione dell'ambiente in cui verrà realizzato l'impianto, in quanto la morfologia dell'edificio influenzerà la distribuzione delle reti di canalizzazione, pur sempre restando in un'ottica di minimizzazione delle perdite e di ottimizzazione del sistema.

La fase successiva necessaria al dimensionamento della rete e del relativo ventilatore è l'analisi dei terminali di immissione o estrazione presenti, in modo tale da definirne la relativa portata e calcolare così la richiesta totale di aria di ciascun ramo della rete.

1.1. Geometria dell'edificio

L'edificio in cui è prevista la realizzazione dell'impianto è stato immaginato e realizzato negli anni Settanta (1978) da un progetto dell'architetto brasiliano Oscar Niemeyer, a San Mauro Torinese. Originariamente designato per accogliere la sede dirigenziale e amministrativa delle Cartiere Burgo, dopo la chiusura ha ripreso vita come nuova sede di Argotec S.r.l., società che opera nel campo dell'aerospazio e nello specifico, nella produzione di satelliti.

Da un punto di vista tecnico, l'edificio conta una superficie coperta di 11.500 m² su un'area totale di circa 28.000 m². È composto da un terreno adibito ad area produttiva e da due piani superiori destinati agli uffici dei dipendenti, dell'amministrazione e della dirigenza, alle aree comuni, tra cui uno spazio per eventi e zone di servizio per i dipendenti. Questi sono organizzati sia in open space che in uffici chiusi, intervallati da pareti vetrate per favorire l'ingresso di luce naturale.

Gli spazi esterni comprendono un'area verde di circa 17.000 m² con giardini integrati e percorsi per aree relax o lavoro all'aperto.

La particolarità di questo edificio risiede però nella planimetria, circolare, e negli esterni che richiamano la forma di un disco volante.



Figura 1.1 - SpacePark di Argotec, foto aerea dell'edificio

In questo elaborato verrà preso in analisi solo uno dei tre piani, quello relativo agli uffici tecnici dell'azienda.

1.1.2. Analisi degli spazi

Il piano per il quale è prevista la progettazione di cui si occupa questa trattazione è il primo piano. Di seguito una rappresentazione planimetrica:

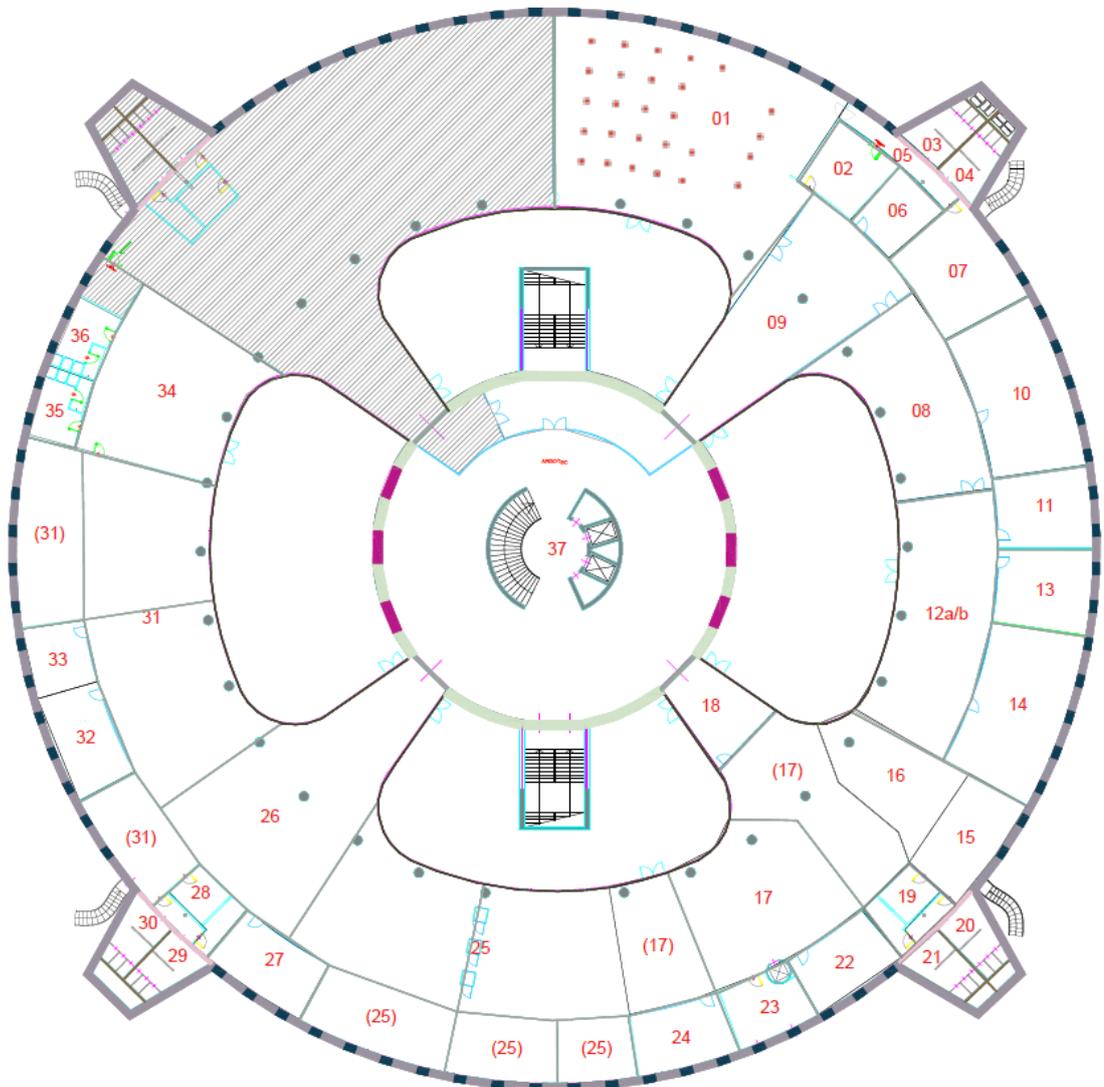


Figura 1.2 - Planimetria dei locali del piano in analisi

Nel quadro di una prima ipotesi di riutilizzo delle aree, si individuano quindi 37 locali totali, la cui destinazione d'uso risulta essere:

Tabella.1.1 - Destinazione d'uso dei locali

N° del locale	Nome del locale → Destinazione d'uso
1	Mensa → Sala da pranzo
2	Lavaggio mensa → Servizi igienici

3	Bagno → Servizi igienici
4	Bagno → Servizi igienici
5	Connettivo → Corridoi e atrii
6	Sala riunione → Locale riunione
7	Ufficio open space → Ufficio open space
8	Ufficio open space → Ufficio open space
9	Area di inclusività aziendale → Ufficio open space
10	Ufficio open space → Ufficio open space
11	Ufficio open space → Ufficio open space
12 a\b ¹	Area accoglienza ospiti → Corridoi e atrii
13	Ufficio open space → Ufficio open space
14	Ufficio open space → Ufficio open space
15	Ufficio open space → Ufficio open space
16	Area di inclusività aziendale → Ufficio open space
17	Ufficio open space → Ufficio open space
18	Ufficio open space → Ufficio open space
19	Bouvette → Servizi igienici
20	Bagno → Servizi igienici
21	Bagno → Servizi igienici
22	Sala riunione → Locale riunione
23	Sala riunione → Locale riunione
24	Sala riunione → Locale riunione
25	Ufficio open space → Ufficio open space
27	Sala riunione → Locale riunione
28	Bouvette → Servizi igienici
29	Bagno → Servizi igienici
30	Bagno → Servizi igienici
26	Area di inclusività aziendale → Ufficio open space
31	Ufficio open space → Ufficio open space
32	Sala riunione → Locale riunione
33	Sala riunione → Locale riunione
34	Palestra → Campi gioco
35	Bagno → Servizi igienici
36	Bagno → Servizi igienici
37	Connettivo → Corridoi e atrii

¹ La distinzione della sala in a/b, come verrà spiegato nel paragrafo 2.1.2, è relativo al fatto che venga attivata o meno un'ulteriore unità di trattamento aria per sopperire alla necessità dovuta all'affluenza straordinaria di persone. Di conseguenza, la destinazione d'uso della stanza si distinguerà in "Uffici open space" per quanto riguarda il caso di massima affluenza, mentre in "Corridoi, atrii" nel restante periodo. Quest'ultimo sarà il dato di cui ci si servirà per il dimensionamento delle condotte d'aria in questa trattazione.

1.1.2. Distribuzione delle aree per unità di trattamento dell'aria

La superficie può essere suddivisa in quattro macroaree, in base al fatto che una zona possa essere servita da un'unità trattamento d'aria (UTA) piuttosto che da un'altra.

In Figura 1 la rappresentazione di come le diverse UTA servano il piano.

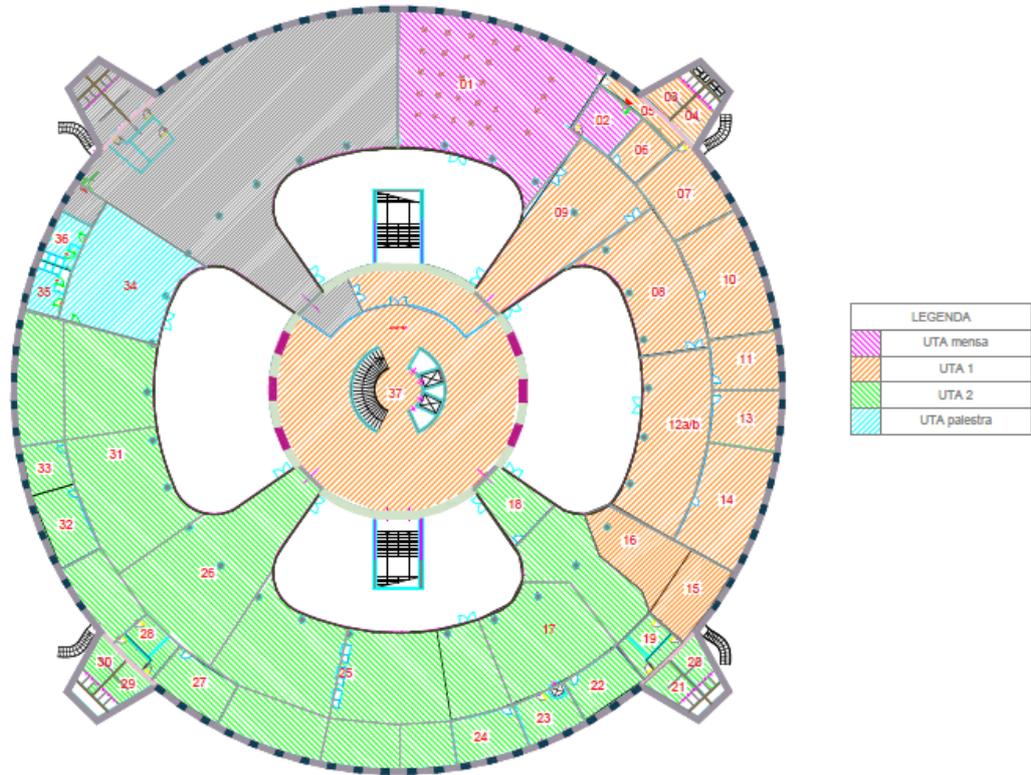


Figura 1.3 - Distinzione aree per unità di trattamento dell'aria

In totale vi sono cinque unità di trattamento dell'aria, una dedicata alla mensa (fucsia in Figura 1), una alla palestra (celeste), una per ciascuna delle due macroaree uffici (arancione e verde) e una specifica per l'area destinata ad accogliere eventuali ospiti, in servizio per l'area numerata 12a. Infatti, essendo un luogo destinato ad accogliere saltuariamente un grande afflusso di persone, necessita di una maggiore portata d'aria su richiesta: è possibile sopperire a questa richiesta mediante l'attivazione di un impianto ad hoc. L'area in grigio non risulta essere di competenza.

In questa analisi saranno considerate esclusivamente le macroaree servite da quelle che in Fig. 3 sono indicate come UTA 1 e UTA 2 (e che verranno d'ora in poi indicate in modo analogo per comodità di trattazione), collocate in appositi spazi tecnici a pian terreno. Le condotte raggiungono il piano da servire attraversando dei

cavedi posti nelle aree perimetrali dell'edificio, i quali fungono da punti di "raccordo" anche per gli altri impianti.

1.2. Calcolo della portata di ricambio

La determinazione della portata d'aria per ogni terminale viene effettuata utilizzando metodi specifici, tenendo conto del volume d'aria complessivo da trattare (per il controllo delle condizioni microclimatiche o della qualità dell'aria negli ambienti) e considerando la distribuzione dell'aria nei locali.

A partire dalla misura delle superfici, nota l'altezza del piano pari a 3 metri, si determina il volume di ciascun locale come (1):

$$\text{Volume del locale} = \text{Area} \cdot \text{altezza} \quad (1)$$

Di seguito i risultati tabulati.

Tabella 1.2 - Volumi UTA 1

N° del locale	Area [m ²]	Volume [m ³]
3	20	60
4	20	60
5	18	54
6	28	84
7	68	204
8	130	390
9	165	495
10	100	300
11	47	141
12a/b	160	480
13	50	150
14	100	300
15	50	150
16	25	75
37	500	1500

Tabella 1.3 - Volumi UTA 2

N° del locale	Area [m ²]	Volume [m ³]
17	300	900
18	40	120
19	20	60
20	20	60
21	20	60
22	38	114
23	32	96
24	39	117
25	400	1200
27	42	126
28	20	60
29	20	60
30	20	60
26	220	660
31	405	1215
32	41	123
33	27	81

Per calcolare il ricambio di portata d'aria si farà riferimento a due normative, la UNI 10339 e la UNI 16798. Per il dimensionamento verrà scelta la portata d'aria massima ottenuta tra le due.

1.2.1. Normativa UNI 10339

In vigore da giugno 1995, è stata ritirata nel 2024 ma resta di riferimento per la progettazione a livello nazionale. Infatti, è sempre stata un consiglio di buona progettazione e non un obbligo da rispettare, motivo per cui è usata tutt'oggi come strumento di supporto. La norma è relativa a *“Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura”* e si occupa, tra le varie cose, di indicare un metodo per la determinazione delle portate d'aria di ricambio per ogni tipologia di ambiente, sia in ambito civile che industriale. In questa trattazione si terranno in considerazione i seguenti prospetti:

- *Prospetto III - Portate di aria esterna in edifici adibiti ad uso civile* (Capitolo 9: “Requisiti degli impianti” – Sezione 9.1.1.: “Portate di aria esterna e di estrazione”);
- *Prospetto VIII - Indici di affollamento n_s per ogni metro quadrato di superficie* (Appendice A: “Indici di affollamento”);

Innanzitutto, bisogna definire il numero di persone presenti in ogni locale, ovvero il cosiddetto “profilo di occupazione”. Per farlo ci si serve del Prospetto VIII, dal quale si ricavano i valori dell'indice di affollamento n_s (per metro quadro di superficie) in base alla tipologia di locale a cui è assimilabile ogni ambiente (*“Destinazione d'uso”*). Gli indici di affollamento vengono fissati solo per i locali destinati alla permanenza di persone, pertanto non rientrano nella definizione i servizi igienici e i corridoi. Nel caso di nostro interesse considereremo quindi:

Tabella 1.4 - Indici di affollamento n_s per ogni metro quadro di superficie

Classificazione degli edifici per categorie	n_s
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	
• Uffici singoli	0,06
• Uffici open space	0,12
• Locali riunione	0,60
• Centri elaborazione dati	0,08

Si procede dunque con il calcolo del numero di persone n per ogni ambiente, dato da (2):

$$n = n_s \cdot Area \quad (2)$$

- n , numero di persone;
- n_s , indice di affollamento;
- Area [m^2], da Tabelle 2 e 3.

Nella tabella sottostante vengono riportati i risultati ottenuti dalla formula, insieme al valore effettivo del numero di persone dedotto dall'arredamento degli ambienti. Per i calcoli, infatti, si farà principalmente riferimento a questo valore mentre quello ricavato tramite normativa sopperirà all'eventuale mancanza di dati.

Tabella 1.5 - Numero di persone ambienti UTA 1

N° del locale	n	Persone previste
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	17	10
7	9	8
8	16	16
9	20	14
10	12	20
11	6	8
12b	-	100
13	6	8
14	12	20
15	6	10
16	3	-
37	-	-

Tabella 1.6 - Numero di persone ambienti UTA 2

N° del locale	n	Persone previste
17	36	36
18	5	10
19	-	-
20	-	-
21	-	-
22	23	14
23	20	10
24	24	14
25	48	63
27	26	14
28	-	-
29	-	-
30	-	-
26	27	-
31	49	66
32	25	20
33	17	10

Le stanze ventilate per estrazione (destinazione d'uso: "bagni, servizi", in tabella 1.5 e 1.6: 3, 4, 19, 20, 21, 28, 29, 30) non verranno considerate per il calcolo perché, da normativa, il numero di ricambi ora è pari a 4 vol/h²(0,0011 vol/s).

Analogamente, gli ambienti di passaggio (destinazione d'uso: "corridoi e atri", in tabella 1.5: 5, 12b, 37) per i quali la normativa non fornisce indicazioni, vengono ventilati per immissione, ipotizzando un numero di ricambi d'aria all'ora pari a 1 vol/h (0,00028 vol/s).

I risultati vengono arrotondati per eccesso.

Successivamente la normativa (Prospetto III) definisce il valore di portata di aria esterna o di estrazione da adottare per le diverse tipologie di destinazione d'uso.

² Prospetto III, "Ricambio richiesto nei servizi igienici per edifici adibiti a residenza e assimilabili".

Tabella 1.7 - Portate di aria esterna³ in edifici adibiti ad uso civile

Categorie di edifici	$Q_{0,p} \left[10^{-3} \frac{m^3}{s} \text{ per persona} \right]$
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	
• Uffici singoli	11
• Uffici open space	11
• Locali riunione	10
• Centri elaborazione dati	7
• Bagni, servizi	Per estrazione

La portata d'aria di ricambio viene quindi calcolata come

- per la portata di immissione:

$$Q_{imm} = n \cdot Q_{0,p} \quad (3)$$

- Q_{imm} , portata di immissione in [m³/h];
- n , numero di persone nell'ambiente, corrisponde al numero di persone previste e nel caso di assenza di questo valore, a quello calcolato da normativa;
- $Q_{0,p}$, portata di aria esterna per persona in 10–3m³per persona.

- per la portata di immissione “corridoi e atrii”:

$$Q_{imm} = \text{volume del locale} \cdot \frac{V_{ric}}{h} \quad (4)$$

- Q_{imm} , portata di immissione in [m³/h];
- $\frac{V_{ric}}{h}$, volumi di ricambio all'ora (pari a 1 vol/h).

- per la portata di estrazione:

$$Q_{estr} = \text{volume del locale} \cdot \frac{V_{ric}}{h} \quad (5)$$

- Q_{estr} , portata di estrazione in [m³/h];
- $\frac{V_{ric}}{h}$, volumi di ricambio all'ora (pari a 4 vol/h).

Di seguito i risultati tabulati.

³ Riferimento alle condizioni normali: T=15°C, p=101,325 kPa, aria secca.

Tabella 1.8 - Portate d'aria di ricambio UTA 1
(UNI 10339)

N° del locale	Q [m³/h]	Q [l/s]
3	240	67
4	240	67
5	55	15
6	350	97
7	320	89
8	640	178
9	560	156
10	800	222
11	320	89
12b	480	133
13	320	89
14	800	222
15	400	111
16	120	33
37	1500	417

Tabella 1.9 - Portate d'aria di ricambio UTA 2
(UNI 10339)

N° del locale	Q [m³/h]	Q [l/s]
17	1440	400
18	400	111
19	240	67
20	240	67
21	240	67
22	490	136
23	350	97
24	490	136
25	2520	700
27	490	136
28	240	67
29	240	67
30	240	67
26	1080	300
31	2640	733
32	700	194
33	350	97

1.2.2. Normativa UNI 16798

La norma **UNI EN 16798 -1**, "*Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici – Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.*", entrata a far parte del corpo normativo nazionale nel Giugno del 2019, analogamente alla normativa trattata nel paragrafo precedente, rientra a far parte delle regole di buona progettazione di una rete aerea non sottoscrivendo però un obbligo.

Per il calcolo delle portate si possono adottare tre metodi distinti, da scegliere in base alle esigenze e ai dati disponibili. Questi metodi non si escludono a vicenda, ma vengono spesso impiegati simultaneamente per garantire una progettazione più accurata e ottenere risultati più dettagliati:

- Primo metodo (M1): Metodo basato sulla qualità dell'aria percepita
- Secondo metodo (M2): Metodo che usa i valori limite per la concentrazione delle sostanze

- Terzo metodo (M3): Metodo basato sulle portate di ventilazione predefinite

In questa elaborato verrà considerato il primo metodo (M1).

1.2.2.1. Metodo 1 - Qualità dell'aria percepita

Per definire la portata d'aria di ventilazione, si tiene conto della seguente formula:

$$q_{tot} = n \cdot q_p + A_R \cdot q_B \quad (6)$$

- q_{tot} , portata totale di ventilazione in [l/s];
- n , numero di persone nell'ambiente, corrisponde al numero di persone previste e nel caso di assenza di questo valore, a quello calcolato da normativa UNI 10339⁴ da Tabella 5 e 6;
- q_p , flusso d'aria per persone non adattabile [l/(s per persona)];
- A_R , superficie del locale da Tabella 2 e 3;
- q_B , portata di aria d'estrazione dall'edificio [l/(s·m²)].

Nel capitolo B.3. “Base per i criteri di qualità dell'aria interna e delle portate di ventilazione.”, la norma propone un metodo generale per la determinazione delle portate di ventilazione per l'edificio. Si riportano i valori tabulati necessari per il calcolo.

Tabella 1.10 - Esempi di portate di ventilazione di progetto predefinite per un ufficio singolo di 10 m² in un edificio a basso inquinamento (per persone non adattabile)

Categoria ⁵	Edificio poco inquinante [l/(s·m ²)]	Flusso d'aria per persone non adattabile [l/(s per persona)]
I	1,0	10
II	0,7	7
III	0,4	4
IV	0,3	2,5

⁴ È importante notare come le normative in analisi interagiscano tra loro, integrandosi reciprocamente senza escludersi.

⁵ Le categorie a cui si fa riferimento sono relative al livello di qualità ambientale interna (Indoor Environmental Quality, IEQ) che si vuole avere, su cui è basata tutta la trattazione della normativa. Si parte così dalla categoria I fa riferimento a IEQ_I, a cui corrisponde un'aspettativa di qualità ambientale elevata (richiesta per occupanti “speciali” quali anziani, bambini, persone con disabilità), così via a scendere fino a IEQ_{IV}, che fa riferimento alla minor richiesta di confort interno, senza però introdurre rischi per la salute delle persone.

Tabella 1.11 - Categorie per le portate predefinite di aria di estrazione

Categoria	Portate d'aria definite in Tabella 10 moltiplicate per:
I	1,4
II	1
III	0,7
IV	0,5

Nel caso in esame, vengono considerati i valori relativi alla seconda categoria, in quanto richiesto dai CAM (Criteri Ambientali Minimi). I valori riportati nella Tabella 10 saranno quindi moltiplicati per 1, rendendo la formula precedentemente presentata generalizzabile come:

$$q_{tot} = n \cdot 7 + A_R \cdot 0,7 \quad (7)$$

Di seguito i risultati tabulati.

Tabella 1.12 - Portate d'aria di ricambio UTA 1
(UNI 16798)

N° del locale	Q [m³/h]	Q [l/s]
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	325	90
7	375	104
8	735	203
9	775	214
10	760	210
11	325	89
12b	-	-
13	330	91
14	760	210
15	380	105
16	145	39
37	-	-

Tabella 1.13 - Portate d'aria di ricambio UTA 2
(UNI 16798)

N° del locale	Q [m³/h]	Q [l/s]
17	1665	462
18	355	98
19	-	-
20	-	-
21	-	-
22	450	125
23	335	93
24	455	126
25	2600	721
27	465	128
28	-	-
29	-	-
30	-	-
26	1235	343
31	2690	746
32	610	169
33	325	89

Le stanze ventilate per estrazione (destinazione d'uso: "bagni, servizi", in tabella 1.12 e 1.13: 3, 4, 19, 20, 21, 28, 29, 30) non verranno considerate per il calcolo,

analogamente gli ambienti di passaggio (destinazione d'uso: "corridoi e atri", in tabella 1.12: 5, 12b, 37).

I risultati vengono arrotondati per eccesso.

In conclusione, le portate considerate per l'immissione e la ripresa per i singoli ambienti saranno:

Tabella 1.14 - Portate massime d'aria di ricambio UTA 1

N° del locale	Q _{imm} [m³/h]	Q _{estr} [m³/h]
3	-	240
4	-	240
5	55	-
6	350	-
7	375	-
8	735	-
9	775	-
10	800	-
11	325	-
12b	480	-
13	330	-
14	800	-
15	400	-
16	145	-
37	1500	-

Tabella 1.15 - Portate massime d'aria di ricambio UTA 2

N° del locale	Q _{imm} [m³/h]	Q _{estr} [m³/h]
17	1665	-
18	400	-
19	-	240
20	-	240
21	-	240
22	490	-
23	350	-
24	490	-
25	2600	-
27	490	-
28	-	240
29	-	240
30	-	240
26	1235	-
31	2690	-
32	700	-
33	350	-

Ovvero le massime portate ricavate seguendo le due normative.

Le portate totali di ventilazione risulteranno così essere:

Tabella 1.16 – Portate totali di ventilazione per UTA1 e UTA2

	Immissione Q _{TOT,I} [m³/h]	Estrazione Q _{TOT,E} [m³/h]
UTA 1	7070	480
UTA 2	11455	1440

2. RETE DI IMMISSIONE

Stabilite le portate richieste dalla normativa, si procede con la definizione del layout della rete di mandata per i vari ambienti. In questa fase, è necessario determinare la portata totale d'aria immessa che sarà processata dall'unità di trattamento dell'aria e distribuita ai terminali tramite la rete dei canali.

Una volta stabilito il numero di terminali per ciascun ambiente e la loro ubicazione nel layout, si passa alla rappresentazione della rete. È fondamentale considerare che lo schema dovrà configurarsi come una rete "ad albero", aperta (senza ricircolo d'aria) e, soprattutto, il più possibile simmetrica, per distribuire equamente le portate ed evitare significativi sbilanciamenti all'interno del sistema, garantendo così l'uniformità della rete.

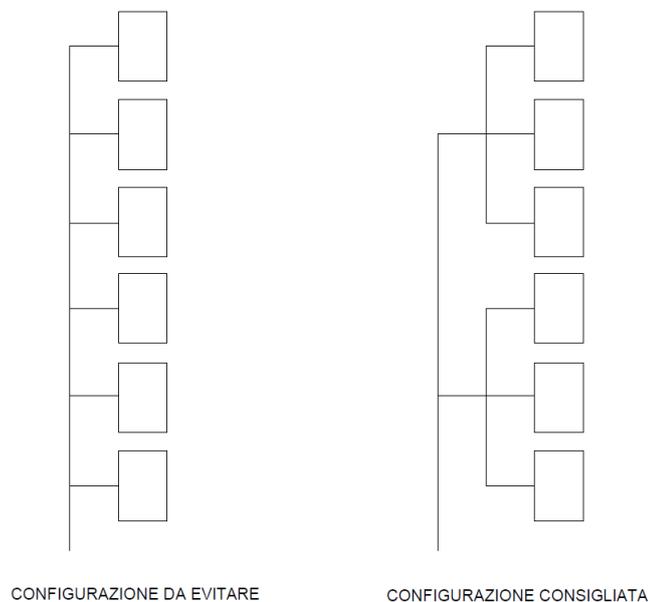


Figura 2.1 - Esempio di configurazioni da evitare e da adottare nella progettazione della rete

Lo schema unifilare viene ottenuto tramite vari tentativi, con l'obiettivo di trovare la soluzione più efficiente dal punto di vista operativo, senza considerare eventuali costi associati all'aumento delle metrature.

Definiti i punti chiave del sistema, si procede infine alla rappresentazione della rete per entrambe le macroaree.

Per necessità legate alla trattazione, si anticipa⁶ che il numero delle travi fredde nel caso delle due mandate è pari a 45 per UTA 1 e 56 per UTA 2.

Una volta ottenuto il grafo ad albero, si procede alla numerazione dei nodi del sistema con incrementi di 10, per ragioni pratiche. I nodi corrispondenti ai terminali verranno numerati con valori intermedi (facendo un esempio, come 35, 35,37,45,46,55, e così via), proseguendo con incrementi di unità. La rete di ciascuna UTA avrà una numerazione distinta.

Di seguito vengono riportati:

- la rappresentazione degli schemi unifilari, denominati analogamente al caso delle UTA come “mandata 1” e “mandata 2” (a seconda dell’unità che servono), eseguita con il software AutoCAD (Figura 2.2);
- l’elenco dei nodi rappresentativi dei tratti in analisi con la relativa lunghezza (Tabelle 2.1 e 2.2).

⁶ La scelta delle bocchette verrà esplicitata meglio nel paragrafo che segue 3.1, “Scelta dei terminali”.

Tabella 2.1 - Definizione geometria della rete di mandata 1: nodi e lunghezze

MANDATA 1											
Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]
10	20	2.5	120	140	1.5	210	240	2	340	345	0.3
20	30	21.5	140	145	0.3	240	245	0.3	340	346	6
30	40	0.5	140	146	5	240	246	5	300	350	20
40	50	6.5	110	150	5	170	250	26	350	360	5.5
50	60	1.5	150	155	2	250	260	2	360	365	0.3
60	65	0.3	150	160	1.5	260	265	0.3	360	366	7
60	66	4	160	165	0.3	260	270	6	350	370	5
50	70	2.5	160	166	3.5	270	275	0.3	370	375	0.3
70	75	0.3	20	170	18	270	276	4	370	380	5.5
70	76	3	170	180	3	250	280	2	380	385	0.3
40	80	5.5	180	190	2.5	280	285	0.3	380	386	5.5
80	90	1.5	190	195	2	280	290	6.5	300	390	24
90	95	0.3	190	196	5	290	295	0.3	390	395	3
90	96	2.5	180	200	5	290	296	3.5	390	400	2
80	100	1.5	200	205	2	20	300	36	400	405	0.3
100	105	0.3	200	206	2	300	310	15	400	406	6.5
100	106	4	170	210	23	310	320	2	390	410	7
30	110	27	210	220	1.5	320	325	0.3	410	415	1.5
110	120	6	220	225	0.3	320	326	6	410	416	2
120	130	1.5	220	230	6	310	330	4	-	-	-
130	135	0.3	230	235	0.3	330	335	0.3	-	-	-
130	136	4	230	236	4	330	340	5.5	-	-	-

Tabella 2.2 - Definizione geometria della rete di mandata 2: nodi e lunghezze

MANDATA 2											
Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]
10	20	5	160	170	4.5	200	300	65	440	445	0.3
20	30	3	170	175	0.3	300	310	9	440	446	4
30	40	22	170	176	3.5	310	320	2	400	450	10
40	50	11	160	180	1	320	325	0.3	450	460	1
50	70	3	180	185	0.3	320	326	3	460	465	0.3
70	75	0.3	180	190	2.3	310	330	1	460	470	3.5
70	76	7	190	195	0.3	330	335	0.3	470	475	0.3
50	60	3.5	190	196	2.6	330	340	3	470	476	4
60	65	0.3	20	200	12	340	345	0.3	450	480	3
60	66	3	200	210	90	340	346	4	480	485	0.3
40	80	15	210	220	23	300	350	6.5	480	486	4
80	90	1.5	220	230	1	350	360	1	390	490	3
90	95	0.3	230	235	0.3	360	365	0.3	490	500	7
90	100	5.5	230	240	4	360	366	4	500	510	2
100	105	0.3	240	245	0.3	350	370	1.5	510	515	0.3
100	106	6	240	246	3.5	370	375	1.5	510	516	3.5
80	110	2	220	250	2.5	370	380	8	500	520	1.5
110	115	0.3	250	255	0.3	380	385	2	520	525	0.3
110	116	5.5	250	260	3	380	386	4	520	526	4
30	120	80	260	265	0.3	20	390	12.5	490	530	12
120	130	15	260	266	3.5	390	400	45	530	540	3.5
130	140	4.5	210	270	1	400	410	8	540	545	0.3
140	145	0.3	270	280	1.5	410	420	1	540	546	4
140	146	3.5	280	285	0.3	420	425	0.3	530	550	3.5
130	150	2	280	286	3	420	430	3.5	550	555	0.3
150	155	0.3	270	290	1.5	430	435	0.3	550	556	7
150	156	3	290	295	0.3	430	436	4	-	-	-
120	160	15	290	296	3.5	410	440	2.5	-	-	-

2.1. Scelta dei terminali

Nel caso della mandata i terminali selezionati sono le travi fredde attive di AERMEC modello EHT (in figura 2.3), utili per la realizzazione di un sistema di climatizzazione efficiente in quanto garantiscono un raffreddamento e un riscaldamento uniforme a seconda della necessità stagionale. Inoltre, assicurano elevate prestazioni acustiche, garantendo che i livelli di rumore rimangano entro i limiti richiesti per gli ambienti lavorativi.



Figura. 2.3 - Trave fredda attiva AERMEC modello EHT

Poiché le portate da gestire variano in base alle esigenze specifiche dei locali, sono state adottate dimensioni differenziate per garantire un'adeguata risposta a ogni richiesta. Inoltre, si è cercato di distribuire l'immissione nel modo più uniforme possibile, suddividendo la portata richiesta su più terminali, così da garantire una migliore omogeneità del flusso.

Si ottengono così:

- 45 terminali per l'unità trattamento d'aria 1
- 56 terminali per l'unità trattamento d'aria 2

L'approccio di selezione è stato orientato a mantenere una perdita di carico costante di 100 Pa (circa 10,204 mm_{H₂O}) alle bocchette di ogni terminale, in quanto questo valore rappresenta un parametro di input. Nel caso in cui non fossero disponibili terminali in grado di assicurare esattamente la portata richiesta, si è optato per soluzioni con una portata molto simile, con una differenza minima di pochi metri cubi all'ora.

I modelli selezionati sono dunque:

Tabella 2.3 - Riepilogo modelli terminali UTA 1

Q [m ³ /h]	N° terminali	Modello
188	2	EHT 6094
160	5	EHT 6211
163	2	EHT 6123
165	2	EHT 6123
200	6	EHT 6301
155	5	EHT 6241
184	4	EHT 6094
96	5	EHT 6092
73	2	EHT 6240
150	10	EHT 6241
350	1	EHT 6154
55	1	EHT 6180

Tabella 2.4 - Riepilogo modelli terminali UTA 2

Q [m ³ /h]	N° terminali	Modello
245	6	EHT 6212
173	15	EHT 6271
179	15	EHT 6152
233	3	EHT 6094
175	2	EHT 6152
206	6	EHT 6123
278	6	EHT 6183
200	2	EHT 6123
350	1	EHT 6154

Le caratteristiche dei modelli sono deducibili dal “nome” con il supporto della sottostante tabella fornita da catalogo (Figura 2.4):

Larghezza nominale	
6	600 mm
Lunghezza nominale	
09	900 mm
12	1200 mm
15	1500 mm
18	1800 mm
21	2100 mm
24	2400 mm
27	2700 mm
30	3000 mm
Range di portata	
0	Portata aria XS
1	Portata aria S
2	Portata aria M
3	Portata aria L
4	Portata aria XL

Esempio: EHT 6-09-4

6 – Larghezza nominale di 600 mm
 09 – Lunghezza nominale di 900 mm
 4 – Range di portata d’aria XL

Figura 2.4 - Configuratore dell'apparecchio da catalogo AERMEC

2.2. Procedura di calcolo

Note le portate ai terminali e la lunghezza stessa dei rami di distribuzione, si procede alla determinazione della geometria dei condotti.

In primo luogo, si determinano le portate tratto per tratto sommando la portata di tutti i terminali alimentati dal tratto in oggetto. Quindi, in formula:

$$Q_i = \sum_{j=1}^N q_j \quad (8)$$

- Q_i , portata di aria dell' i -esimo tratto considerato in [m³/h];
- N , numero di terminali considerato;
- q_j , portata di aria dei terminali (o più genericamente delle diramazioni) in [m³/h].

Successivamente, si passa al dimensionamento vero e proprio della rete. Esistono due approcci alternativi:

- il primo prevede un predimensionamento basato sull'imposizione iniziale di velocità adeguate per i vari tratti, seguito da una verifica dell'equilibratura che permette di apportare eventuali correzioni a specifici rami;
- il secondo metodo, invece, mira fin da subito a garantire l'equilibrio delle pressioni in tutti i nodi, considerando le trasformazioni tra pressione statica e dinamica.

In questa trattazione si adotta il secondo metodo, che prevede di dimensionare la rete partendo sempre dal tratto più sfavorito e procedendo a ritroso dal terminale fino al primo nodo. L'analisi si sviluppa quindi dal nodo di valle a quello di monte, determinando diverse informazioni, tra cui i salti di velocità tra un tratto e l'altro. Se fosse possibile adottare esattamente i valori di velocità ottenuti, la rete sarebbe sempre perfettamente bilanciata. Tuttavia, la necessità di impiegare sezioni con dimensioni standard disponibili in commercio e di rispettare i limiti di velocità massima rende spesso impossibile l'equilibrio perfetto di tutti i rami. Infatti, questo approccio non esime dalla verifica costante del rispetto dei valori massimi ammissibili (Tabella 2.5) e della progressiva riduzione della velocità da monte a valle.

Si definiscono quindi le velocità massime imponibili, stabilendo un valore di riferimento per le bocchette (2,5 m/s) e una velocità massima per i tratti principali del sistema.

Tabella 2.5 - Velocità massime ammissibili in un impianto HVAC

Tratto di condotto	Velocità massime	
	Condotti rettangolari	Condotti circolari
Rami principali	7÷10 m/s	8÷12 m/s
Rami terminali	2÷3,5 m/s	2,5÷4 m/s

Poiché il calcolo è ricorsivo, per evitare ridondanze verrà illustrato nel dettaglio il procedimento adottato per i tratti terminali, lo stesso che verrà applicato anche ai rami successivi.

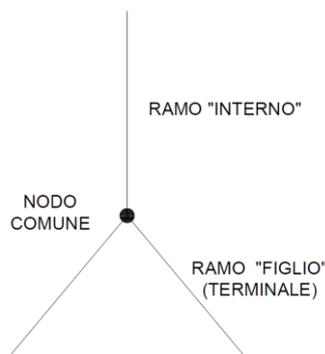


Figura 2.5 - Esempio semplificato della rete

Si procede dunque calcolando il diametro del condotto terminale utilizzando la formula:

$$d_i = \sqrt{\frac{Q_i \cdot 4}{3600 \cdot v \cdot \pi}} \quad (9)$$

- d_i , diametro di primo dimensionamento del ramo i-esimo [m];
- Q_i , portata di aria dell'i-esimo tratto considerato [m³/h];
- v , velocità massima ammissibile pari a 2,5 m/s.

Il valore ottenuto viene arrotondato al valore prossimo tra i diametri commerciali disponibili:

Tabella 2.6 - Elenco dei diametri standard adottati nella progettazione [mm]

D_{std}	160	180	200	224	250	280	300	315	355	400	450
------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Ricavato il diametro standard D_{std} , si procede al ricalcolo della velocità effettiva dell'aria con il nuovo valore, come:

$$v_{eff} = \frac{4 \cdot Q_i}{\pi \cdot D_i^2} \quad (10)$$

- v_{eff} , velocità effettiva ricavata [m/s];
- Q_i , portata di aria dell'i-esimo tratto considerato [m³/h];
- D_i , diametro commerciale del ramo i-esimo [m].

Si determina la lunghezza equivalente, tenendo conto delle perdite di carico e della configurazione del sistema di condotti, come:

$$L_{eq} = 15 \cdot D_{eq} \quad (11)$$

- L_{eq} , lunghezza equivalente [m];
- 15, valore moltiplicativo costante utilizzato come rappresentativo dell'intero sistema, tiene conto di una generica singolarità;
- D_{eq} , diametro equivalente, nel caso di condotte circolari equivale al valore di diametro normato mentre nel caso di condotte rettangolari, vedere formula (13) [m].

Si determinano ora le perdite di carico distribuite per l'i-esimo tratto, come:

$$H_{i,distr}^* = 8,12 \cdot 1,2^{0,852} \cdot \frac{c_i^{1,924}}{d_i^{1,281}} \quad (12)$$

- $H_{i,distr}^*$, perdite di carico distribuite per unità di lunghezza dovute al moto dell'aria nella condotta [Pa];
- c_i , velocità dell'aria all'interno del ramo [m/s];
- d_i , diametro equivalente del tratto [m].

La formula è applicabile anche a condotti rettangolari, precisazione necessaria poiché si adatterà questa soluzione per ridurre la velocità del flusso senza aumentare eccessivamente il diametro, fatto che causerebbe inevitabili problemi di ingombro, soprattutto nei tratti iniziali della rete dove sono presenti portate elevate.

Nel caso in cui la sezione del condotto sia rettangolare, si calcola il diametro equivalente utilizzando la formula di Huebscher:

$$D_{eq} = 1,3 \cdot \frac{(b \cdot h)^{0,625}}{(b + h)^{0,25}} \quad (13)$$

- Q_i , diametro del canale circolare equivalente [m];
- b, h , lati della sezione rettangolare [m].

La quale permette di ottenere una sezione che, con le stesse portate, dia le stesse perdite di carico della sezione rettangolare.

La formula (12) restituisce il valore delle perdite relative a una lunghezza unitaria di condotta, per cui si otterranno le perdite complessive del tratto i -esimo come:

$$H_{i,distr} = H_{i,distr}^* \cdot L \quad (14)$$

- $H_{i,distr}$, perdite di carico distribuite relative al tratto [Pa];
- $H_{i,distr}^*$, perdite di carico distribuite per unità di lunghezza [Pa];
- L , lunghezza reale del tratto [m].

Per determinare le perdite di carico concentrate si utilizza un metodo semplificato che, tramite l'uso della cosiddetta lunghezza equivalente, consente di tenere in considerazione le singolarità presenti lungo il percorso, come curve, gomiti, restringimenti ecc. Elegantemente, le perdite concentrate si valutano come un'aggiunta di tubatura pari a L_{eq} , il cui contributo sarà visibile nel momento in cui si andrà a calcolare la perdita distribuita su una condotta la cui lunghezza sarà pari alla somma della metratura reale e di quella equivalente. In formula, per l' i -esimo tratto:

$$H_{i,conc} = H_{i,distr}^* \cdot L_{eq} \quad (15)$$

- $H_{i,conc}$, perdite di carico concentrate relative al tratto [Pa];
- $H_{i,distr}^*$, perdite di carico distribuite per unità di lunghezza [Pa];
- L_{eq} , lunghezza equivalente del tratto [m].

Le perdite di carico totali relative al tratto i -esimo si valutano quindi con la seguente formula semplificata:

$$H_{i,tot} = H_{i,distr} + H_{i,conc} - R_{stat} \quad (16)$$

- $H_{i,tot}$, perdite di carico totali [Pa];
- $H_{i,distr}$, perdite di carico distribuite dovute al moto dell'aria nella condotta [Pa];
- $H_{i,conc}$, perdite di carico concentrate dovute a discontinuità presenti all'interno della condotta [Pa];
- R_{stat} , recupero di pressione statica all'imbocco del ramo [Pa].

Da un'ultima analisi sulle perdite, per gli impianti in studio si ha che il recupero di pressione statica, ovvero l'aumento di pressione che si verifica a seguito di una riduzione di velocità del fluido, sarà nullo e nel caso di necessità di imporre ulteriori cadute di pressione mediante l'uso di serrande, si avrà un valore aggiuntivo di perdite concentrate pari a $H_{i,conc,s}$.

Nel nostro caso la formula (16) sarà perciò esplicitata come:

$$H_{i,tot} = (L + L_{eq}) \cdot H_{i,distr} + H_{i,conc,s} \quad (17)$$

È possibile definire, in ultima istanza, il valore della pressione nel nodo iniziale. Infatti, la pressione al terminale è nota in quanto è un valore imposto dal modello scelto. Nel caso di mandata $p_{out} = 100 Pa$ e quindi la pressione in ingresso al nodo è pari a:

$$p_{in} = p_{out} + H_{i,tot} \quad (18)$$

- p_{in} , pressione in ingresso al tratto [Pa];
- p_{out} , pressione in uscita dal tratto (in funzione della scelta del terminale) [Pa];
- $H_{i,tot}$, perdite di carico totali [Pa];

La valutazione dello sbilanciamento della rete verrà effettuata dopo la determinazione di tutti i parametri geometrici e di pressione. L'argomento verrà trattato successivamente nel paragrafo 3.3 *Bilanciamento della rete*.

Una volta valutate le pressioni in ingresso ai rami terminali, per procedere al dimensionamento del resto della rete, si effettuano le seguenti valutazioni:

- Identificazione del ramo più favorito e di quello più sfavorito tra quelli terminali "figli" del prossimo tratto analizzato ("interno" in figura 2.5).
- Confronto delle velocità tra i rami terminali: in caso valori significativamente differenti, si procede con un recupero di pressione statica prima di definire la velocità (situazione che non si verifica nella trattazione); in caso contrario, si impone la velocità del ramo più favorito come valore iniziale per il dimensionamento.
- Si impone al nodo finale la pressione iniziale del ramo più favorito, quindi quello con la pressione maggiore.

Avendo quindi una nuova pressione finale e una nuova velocità di primo dimensionamento, si procede ripetendo la procedura appena descritta in maniera ciclica fino al calcolo dell'intera rete. Le considerazioni da tenere conto sono:

- Il diametro
- o commerciale ricavato è maggiore o uguale a quello dei rami ottenuti nei cicli di dimensionamento precedenti.
- La velocità effettiva ricavata è maggiore o uguale a quella dei rami ottenuti nei cicli di dimensionamento precedenti.
- La velocità effettiva deve rientrare nei limiti massimi accettabili per il comfort interno. Nel caso in cui il valore risultasse eccessivamente alto, è necessario aumentare la sezione per ridurre la velocità. In questo scenario, potrebbe rendersi necessario il passaggio a una sezione rettangolare per rispettare i vincoli di ingombro imposti.

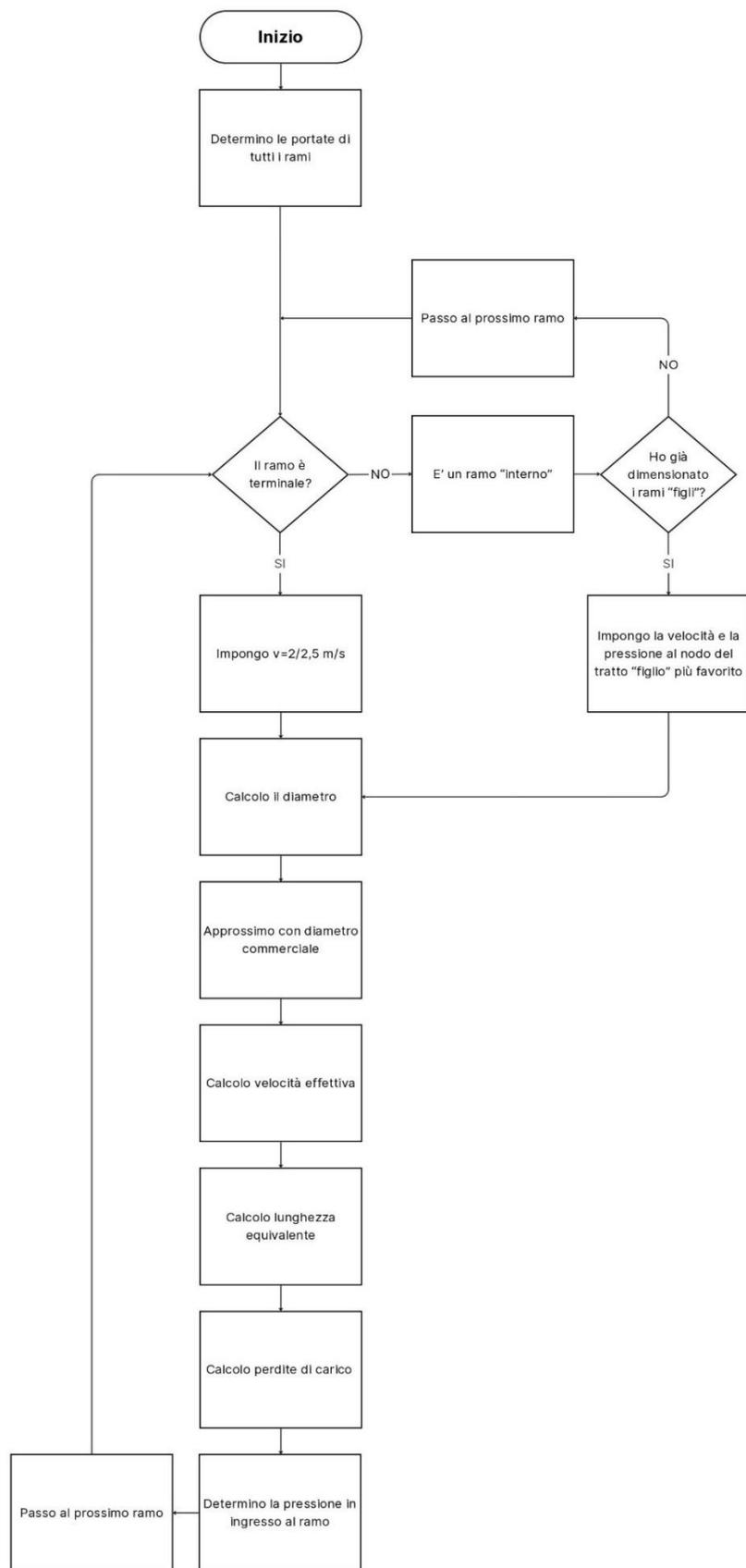


Figura.2.6 - Diagramma di flusso del calcolo

2.3. Bilanciamento della rete

Una volta determinati i valori minimi di pressione necessari a garantire in ogni ramo la portata nominale, è fondamentale valutare il bilanciamento della rete. Bilanciare significa assicurarsi che le perdite di carico totali di ciascun ramo siano uguali a quelle del tratto più sfavorito.

Lo squilibrio di pressione all'imbocco di un ramo si determina come la differenza tra la pressione effettivamente disponibile al nodo e la pressione minima necessaria, secondo la seguente formula:

$$\Delta H_i = MAX(H_N) - (H_N)_i \quad (19)$$

- ΔH_i , squilibrio di pressione all'imbocco del ramo i-esimo [Pa];
- $MAX(H_N)$, valore massimo di pressione tra le minime richieste al nodo [Pa];
- $(H_N)_i$, la pressione minima richiesta al ramo i-esimo [Pa].

Se il valore di ΔH_i è positivo, significa che c'è più pressione disponibile di quella necessaria per il ramo i-esimo, il che potrebbe indicare uno squilibrio o una sovrabbondanza di pressione per quel ramo. Se ΔH_i è vicino a zero o molto basso, la pressione disponibile nel nodo è sufficiente per soddisfare le esigenze del ramo.

Per verificare questa ipotesi si valuta l'errore relativo percentuale, calcolabile come:

$$\frac{\Delta H_i}{(H_N)_i} \quad (20)$$

Il sistema si considera bilanciato quando questo valore risulta essere nell'intorno di 20÷25 %.

Se lo sbilanciamento supera significativamente questo intervallo, sarà necessario introdurre una perdita di carico localizzata per riequilibrare il sistema. A tal fine si possono impiegare serrande di regolazione, diaframmi forati, ugelli calibrati, o altri dispositivi la cui scelta dipende principalmente dalla forma della condotta, nonché dalla necessità di imporre una determinata caduta di pressione.

Per l'impianto in analisi, nelle condotte interne verranno utilizzate serrande a chiusura a farfalla, mentre per i terminali di ripresa sarà sufficiente regolare le serrande a scorrimento già integrate al loro interno. (3.1 Scelta dei terminali).

Concludendo, la perdita di carico totale caratteristica della rete sarà determinata sommando le perdite lungo tutti i rami attraversati dall'aria nel suo percorso, dal punto di origine fino all'utenza più sfavorita, in formula:

$$H_{TOT} = \sum_{i=1}^n H_{i,tot} = \sum_{i=1}^n (H_{i,distr} + H_{i,conc} - R_{stat}) \quad (21)$$

Questo dato sarà fondamentale per il dimensionamento del ventilatore.

Infatti, la perdita totale di carico può essere vista come la variazione di pressione tra il valore che si ha a monte dell'impianto e il valore imposto a valle (in funzione del terminale scelto).

Ipotizzando un rendimento pari a 95%, la potenza richiesta per garantire la portata richiesta ad ogni bocchetta sarà pari a:

$$P_{vent} = \frac{Q_{TOT} \cdot \Delta P}{\eta} \quad (22)$$

- P_{vent} , potenza del ventilatore [W];
- Q_{TOT} , portata totale richiesta dall'impianto [m³/s];
- H_{TOT} , perdita di carico totale [Pa];
- η , rendimento del ventilatore posto pari a 0,95 [/].

2.4. Risultati

Di seguito verranno riportati i risultati tabulati del dimensionamento ottenuto, distinti per unità di trattamento d'aria servita.

A ogni tabella, seguiranno le relative osservazioni.

2.4.1. Mandata UTA 1

Per quanto riguarda il calcolo delle portate, si ha:

Tabella 2.7 - Portate della rete per mandata 1

Ni	Nf	Qi [m ³ /h]									
10	20	7070	120	140	365	210	240	192	340	345	150
20	30	2630	140	145	165	240	245	96	340	346	150
30	40	1338	140	146	200	240	246	96	300	350	750
40	50	695	110	150	600	170	250	737	350	360	300
50	60	375	150	155	200	250	260	265	360	365	150
60	65	188	150	160	400	260	265	73	360	366	150
60	66	188	160	165	200	260	270	192	350	370	450
50	70	320	160	166	200	270	275	96	370	375	150
70	75	160	20	170	2070	270	276	96	370	380	300
70	76	160	170	180	678	250	280	473	380	385	150
40	80	643	180	190	310	280	285	73	380	386	150
80	90	320	190	195	155	280	290	400	300	390	870
90	95	160	190	196	155	290	295	200	390	395	155
90	96	160	180	200	368	290	296	200	390	400	310
80	100	323	200	205	184	20	300	2370	400	405	155
100	105	160	200	206	184	300	310	750	400	406	155
100	106	163	170	210	656	310	320	300	390	410	405
30	110	1293	210	220	464	320	325	150	410	415	350
110	120	693	220	225	96	320	326	150	410	416	55
120	130	328	220	230	368	310	330	450	-	-	-
130	135	165	230	235	184	330	335	150	-	-	-
130	136	163	230	236	184	330	340	300	-	-	-

In seguito, si determinano le sezioni e le velocità:

Tabella 2.8 - Sezioni delle condotte e velocità effettive per mandata 1

Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]
10	20	600x500	6.55	160	166	180	2.18	20	300	400	5.24
20	30	400	5.81	20	170	355	5.81	300	310	280	3.38
30	40	300	5.26	170	180	250	3.83	310	320	224	2.11
40	50	250	3.93	180	190	224	2.19	320	325	160	2.07
50	60	224	2.64	190	195	160	2.14	320	326	160	2.07
60	65	180	2.05	190	196	160	2.14	310	330	250	2.55
60	66	180	2.05	180	200	224	2.59	330	335	160	2.07
50	70	224	2.26	200	205	180	2.01	330	340	224	2.11
70	75	160	2.21	200	206	180	2.01	340	345	160	2.07
70	76	160	2.21	170	210	280	2.96	340	346	160	2.07
40	80	250	3.64	210	220	250	2.62	300	350	280	3.38
80	90	224	2.26	220	225	125	2.17	350	360	224	2.11
90	95	160	2.21	220	230	224	2.59	360	365	160	2.07
90	96	160	2.21	230	235	180	2.01	360	366	160	2.07
80	100	224	2.27	230	236	180	2.01	350	370	280	2.03
100	105	160	2.21	210	240	180	2.10	370	375	160	2.07
100	106	160	2.25	240	245	125	2.17	370	380	224	2.11
30	110	300	5.08	240	246	125	2.17	380	385	160	2.07
110	120	280	3.12	170	250	280	3.32	380	386	160	2.07
120	130	224	2.31	250	260	200	2.34	300	390	280	3.92
130	135	160	2.28	260	265	112	2.04	390	395	160	2.14
130	136	160	2.25	260	270	180	2.10	390	400	224	2.19
120	140	224	2.57	270	275	125	2.17	400	405	160	2.14
140	145	160	2.28	270	276	125	2.17	400	406	160	2.14
140	146	180	2.18	250	280	250	2.67	390	410	224	2.85
110	150	280	2.71	280	285	315	2.04	410	415	224	2.47
150	155	180	2.18	280	290	250	2.26	410	416	100	1.95
150	160	250	2.26	290	295	180	2.18	-	-	-	-
160	165	180	2.18	290	296	180	2.18	-	-	-	-

Osservazioni:

- I diametri sono decrescenti e variano in un range da 400 mm a 100 mm.
- Il primo tratto (10-20), con sezione rettangolare 600x500 mm, presenta un diametro equivalente non commerciale.
- La velocità massima si verifica nel primo tratto (10-20) ed è pari a 6,55 m/s, un valore che rientra nei limiti per garantire il confort.
- Ai terminali la velocità media è di 2 m/s, con un massimo di 2,47 m/s (nel tratto 410-415), valore che rientra comunque nei limiti imposti da normativa.

Successivamente, si ricavano le perdite di carico totali nella condotta:

Tabella 2.9 - Perdite totali di carico per mandata 1

Ni	Nf	H _{tot} [Pa]									
10	20	9.55	120	140	2.08	210	240	1.80	340	345	1.17
20	30	26.90	140	145	1.41	240	245	1.42	340	346	3.65
30	40	5.82	140	146	3.18	240	246	4.49	300	350	13.19
40	50	8.63	110	150	3.27	170	250	15.92	350	360	2.60
50	60	2.19	150	155	1.94	250	260	2.06	360	365	1.17
60	65	1.10	150	160	1.53	260	265	1.32	360	366	4.09
60	66	2.45	160	165	1.24	260	270	3.32	350	370	1.88
50	70	1.95	160	166	2.56	270	275	1.42	370	375	1.17
70	75	1.33	20	170	26.55	270	276	3.84	370	380	2.60
70	76	2.66	170	180	5.41	250	280	2.30	380	385	1.17
40	80	6.70	180	190	1.83	280	285	0.02	380	386	3.44
80	90	1.62	190	195	2.04	280	290	2.98	300	390	20.46
90	95	1.33	190	196	3.43	290	295	1.24	390	395	2.50
90	96	2.41	180	200	3.63	290	296	2.56	390	400	1.68
80	100	1.64	200	205	1.65	20	300	33.63	400	405	1.25
100	105	1.33	200	206	1.65	300	310	10.47	400	406	4.12
100	106	3.25	170	210	11.45	310	320	1.57	390	410	5.42
30	110	34.35	210	220	2.03	320	325	1.17	410	415	1.92
110	120	4.77	220	225	1.42	320	326	3.65	410	416	2.46
120	130	1.69	220	230	4.06	310	330	2.83	-	-	-
130	135	1.41	230	235	1.05	330	335	1.17	-	-	-
130	136	3.25	230	236	2.35	330	340	2.60	-	-	-

Osservazioni:

- Le perdite maggiori si verificano in corrispondenza dei tratti iniziali, dove le portate e i diametri sono maggiori e le lunghezze più significative.
- Si nota che i suddetti tratti sono tutti posti in sequenza tra loro:
 - 20-30 → 30-110
 - 20-170 → 170-250
 - 20-300 → 300-390

Per quanto riguarda la valutazione degli sbilanciamenti:

Tabella 2.10 - Sbilanciamento della rete per mandata 1

Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %
10	20	0.00	0.0%	160	166	0.00	0.0%	20	300	9.32	5.8%
20	30	0.00	0.0%	20	170	19.60	12.9%	300	310	8.79	7.4%
30	40	25.29	21.2%	170	180	14.46	13.1%	310	320	3.86	3.7%
40	50	0.00	0.0%	180	190	0.02	0.0%	320	325	2.48	2.4%
50	60	0.00	0.0%	190	195	1.39	1.4%	320	326	0.00	0.0%
60	65	1.35	1.3%	190	196	0.00	0.0%	310	330	0.00	0.0%
60	66	0.00	0.0%	180	200	0.00	0.0%	330	335	5.08	5.0%
50	70	0.03	0.0%	200	205	0.00	0.0%	330	340	0.00	0.0%
70	75	1.33	1.3%	200	206	0.00	0.0%	340	345	2.48	2.4%
70	76	0.00	0.0%	170	210	5.26	4.4%	340	346	0.00	0.0%
40	80	1.69	1.5%	210	220	0.00	0.0%	300	350	7.23	6.0%
80	90	0.86	0.8%	220	225	4.99	4.9%	350	360	1.23	1.1%
90	95	1.08	1.1%	220	230	0.00	0.0%	360	365	2.91	2.9%
90	96	0.00	0.0%	230	235	1.30	1.3%	360	366	0.00	0.0%
80	100	0.00	0.0%	230	236	0.00	0.0%	350	370	0.00	0.0%
100	105	1.92	1.9%	210	240	2.15	2.0%	370	375	4.86	4.8%
100	106	0.00	0.0%	240	245	3.07	3.0%	370	380	0.00	0.0%
30	110	0.00	0.0%	240	246	0.00	0.0%	380	385	2.26	2.2%
110	120	0.00	0.0%	170	250	0.00	0.0%	380	386	0.00	0.0%
120	130	0.33	0.3%	250	260	0.00	0.0%	300	390	0.00	0.0%
130	135	1.84	1.8%	260	265	5.84	5.8%	390	395	5.38	5.2%
130	136	0.00	0.0%	260	270	0.00	0.0%	390	400	2.08	2.0%
120	140	0.00	0.0%	270	275	2.42	2.4%	400	405	2.87	2.8%
140	145	1.77	1.7%	270	276	0.00	0.0%	400	406	0.00	0.0%
140	146	0.00	0.0%	250	280	1.38	1.3%	390	410	0.00	0.0%
110	150	2.68	2.5%	280	285	5.53	5.5%	410	415	0.54	0.5%
150	155	2.15	2.1%	280	290	0.00	0.0%	410	416	0.00	0.0%
150	160	0.00	0.0%	290	295	1.32	1.3%	-	-	-	-
160	165	1.32	1.3%	290	296	0.00	0.0%	-	-	-	-

Osservazioni:

- La rete di mandata servita dall'UTA 1 risulta essere complessivamente ben bilanciata, tanto da non richiedere l'inserimento di alcuna serranda.
- Il tratto più critico presenta uno sbilanciamento percentuale pari a 21,2% (tratto 30-40), valore che rientra nel range richiesto.

Infine, si valutano i valori di pressione in ingresso e uscita da ciascun tratto:

Tabella 2.11 - Pressioni in ingresso e in uscita per mandata 1

Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]	Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]	Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]
10	20	180.85	171.29	160	166	102.56	100.00	20	300	161.97	128.34
20	30	171.29	144.39	20	170	151.70	125.15	300	310	119.55	109.08
30	40	119.10	113.27	170	180	110.69	105.28	310	320	105.23	103.65
40	50	113.27	104.64	180	190	105.26	103.43	320	325	101.17	100.00
50	60	104.64	102.45	190	195	102.04	100.00	320	326	103.65	100.00
60	65	101.10	100.00	190	196	103.43	100.00	310	330	109.08	106.26
60	66	102.45	100.00	180	200	105.28	101.65	330	335	101.17	100.00
50	70	104.61	102.66	200	205	101.65	100.00	330	340	106.26	103.65
70	75	101.33	100.00	200	206	101.65	100.00	340	345	101.17	100.00
70	76	102.66	100.00	170	210	119.89	108.44	340	346	103.65	100.00
40	80	111.58	104.89	210	220	108.44	106.42	300	350	121.11	107.92
80	90	104.03	102.41	220	225	101.42	100.00	350	360	106.69	104.09
90	95	101.33	100.00	220	230	106.42	102.35	360	365	101.17	100.00
90	96	102.41	100.00	230	235	101.05	100.00	360	366	104.09	100.00
80	100	104.89	103.25	230	236	102.35	100.00	350	370	107.92	106.04
100	105	101.33	100.00	210	240	106.29	104.49	370	375	101.17	100.00
100	106	103.25	100.00	240	245	101.42	100.00	370	380	106.04	103.44
30	110	144.39	110.04	240	246	104.49	100.00	380	385	101.17	100.00
110	120	110.04	105.27	170	250	125.15	109.23	380	386	103.44	100.00
120	130	104.94	103.25	250	260	109.23	107.16	300	390	128.34	107.88
130	135	101.41	100.00	260	265	101.32	100.00	390	395	102.50	100.00
130	136	103.25	100.00	260	270	107.16	103.84	390	400	105.80	104.12
120	140	105.27	103.18	270	275	101.42	100.00	400	405	101.25	100.00
140	145	101.41	100.00	270	276	103.84	100.00	400	406	104.12	100.00
140	146	103.18	100.00	250	280	107.85	105.54	390	410	107.88	102.46
110	150	107.36	104.09	280	285	100.02	100.00	410	415	101.92	100.00
150	155	101.94	100.00	280	290	105.54	102.56	410	416	102.46	100.00
150	160	104.09	102.56	290	295	101.24	100.00	-	-	-	-
160	165	101.24	100.00	290	296	102.56	100.00	-	-	-	-

Osservazioni:

- Il percorso più sfavorito risulta essere: 10-20, 20-30, 30-110, 110-120, 120-140, 140-146.

La perdita di pressione tra monte e valle sarà pari a:

$$\Delta P = p_{in,10-20} - p_{out,terminale} = 180,85 - 100,00 = 80,85 \text{ Pa}$$

Per cui la potenza minima richiesta al ventilatore:

$$P_{vent} = \frac{Q_{TOT} \cdot \Delta P}{\eta} = \frac{7070 \cdot 80,85}{3600 \cdot 0,95} = 167,14 \text{ W}$$

2.4.2. Mandata UTA 2

Per quanto riguarda il calcolo delle portate, si ha:

Tabella 2.12 - Portate della rete per mandata 2

Ni	Nf	Qi [m ³ /h]									
10	20	11455	160	170	359	200	300	1,926	440	445	173
20	30	3917	170	175	179	300	310	897	440	446	173
30	40	2022	170	176	179	310	320	359	400	450	865
40	50	1085	160	180	700	320	325	179	450	460	519
50	70	595	180	185	233	320	326	179	460	465	173
70	75	350	180	190	467	310	330	538	460	470	346
70	76	245	190	195	233	330	335	179	470	475	173
50	60	490	190	196	233	330	340	359	470	476	173
60	65	245	20	200	3710	340	345	179	450	480	346
60	66	245	200	210	1785	340	346	179	480	485	173
40	80	937	210	220	1067	300	350	1,029	480	486	173
80	90	591	220	230	538	350	360	412	390	490	2065
90	95	173	230	235	179	360	365	206	490	500	1110
90	100	418	230	240	359	360	366	206	500	510	555
100	105	173	240	245	179	350	370	617	510	515	278
100	106	245	240	246	179	370	375	206	510	516	278
80	110	346	220	250	529	370	380	412	500	520	555
110	115	173	250	255	179	380	385	206	520	525	278
110	116	173	250	260	350	380	386	206	520	526	278
30	120	1895	260	265	175	20	390	3828	490	530	955
120	130	836	260	266	175	390	400	1763	530	540	400
130	140	346	210	270	717	400	410	898	540	545	200
140	145	173	270	280	359	410	420	552	540	546	200
140	146	173	280	285	179	420	425	173	530	550	555
130	150	490	280	286	179	420	430	379	550	555	278
150	155	245	270	290	359	430	435	173	550	556	278
150	156	245	290	295	179	430	436	206	-	-	-
120	160	1059	290	296	179	410	440	346	-	-	-

In seguito, si determinano le sezioni e le velocità:

Tabella 2.13 - Sezioni di condotte e velocità effettive per mandata 2

Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]
10	20	700x650	6.99	200	210	315	6.36	380	386	180	2.25
20	30	450	6.84	210	220	280	4.81	20	390	450	6.69
30	40	355	5.67	220	230	280	2.43	390	400	300	6.93
40	50	280	4.89	230	235	160	2.48	400	410	250	5.08
50	70	224	4.19	230	240	224	2.53	410	420	250	3.12
70	75	224	2.47	240	245	160	2.48	420	425	160	2.39
70	76	180	2.17	240	246	160	2.48	420	430	250	2.14
50	60	224	3.45	220	250	280	2.39	430	435	160	2.39
60	65	200	2.17	250	255	160	2.48	430	436	180	2.25
60	66	200	2.17	250	260	224	2.47	410	440	224	2.44
40	80	250	5.30	260	265	160	2.42	440	445	160	2.39
80	90	224	4.17	260	266	160	2.42	440	446	160	2.39
90	95	160	2.39	210	270	280	3.24	400	450	280	3.90
90	100	224	2.95	270	280	224	2.53	450	460	280	2.34
100	105	160	2.39	280	285	160	2.48	460	465	160	2.39
100	106	180	2.17	280	286	160	2.48	460	470	224	2.44
80	110	224	2.44	270	290	224	2.53	470	475	160	2.39
110	115	160	2.39	290	295	160	2.48	470	476	160	2.39
110	116	160	2.39	290	296	160	2.48	450	480	224	2.44
30	120	350	5.47	200	300	315	6.86	480	485	160	2.39
120	130	280	3.77	300	310	280	4.04	480	486	160	2.39
130	140	224	2.44	310	320	224	2.53	390	490	355	5.80
140	145	160	2.39	320	325	160	2.48	490	500	300	4.36
140	146	160	2.39	320	326	160	2.48	500	510	224	3.91
130	150	250	2.77	310	330	280	2.43	510	515	200	2.45
150	155	200	2.17	330	335	160	2.48	510	516	200	2.45
150	156	200	2.17	330	340	224	2.53	500	520	224	3.91
120	160	280	4.78	340	345	160	2.48	520	525	200	2.45
160	170	224	2.53	340	346	160	2.48	520	526	200	2.45
170	175	160	2.48	300	350	280	4.64	490	530	250	5.40
170	176	160	2.48	350	360	250	2.33	530	540	224	2.82
160	180	280	3.16	360	365	180	2.25	540	545	180	2.18
180	185	200	2.06	360	366	180	2.25	540	546	180	2.18
180	190	250	2.64	350	370	280	2.79	530	550	224	3.91
190	195	200	2.06	370	375	180	2.25	550	555	200	2.45
190	196	200	2.06	370	380	250	2.33	550	556	200	2.45
20	200	450	6.48	380	385	180	2.25	-	-	-	-

Osservazioni:

- I diametri variano in un range da 450 mm a 160 mm.

- Il primo tratto (10-20) presenta sezione rettangolare di 700x650 mm ed un diametro equivalente di 737 mm.
- La velocità massima si verifica nel primo tratto ed è pari a 6,99 m/s, valore che rientra nei limiti.
- Ai terminali si registra invece una velocità massima di 2,48 m/s in diversi tratti, valore che rientra comunque nei limiti imposti da normativa.

Successivamente, si ricavano le perdite di carico totali nella condotta:

Tabella 2.14 - Perdite totali di carico per mandata 2

Ni	Nf	H _{tot} [Pa]									
10	20	11.58	160	170	3.26	200	300	127.52	440	445	1.54
20	30	41.24	170	175	1.66	300	310	10.15	440	446	3.66
30	40	59.75	170	176	3.62	310	320	2.22	400	450	10.19
40	50	16.86	160	180	2.48	320	325	1.66	450	460	1.40
50	70	6.98	180	185	1.07	320	326	3.31	460	465	1.54
70	75	1.45	180	190	2.37	310	330	1.50	460	470	2.65
70	76	3.56	190	195	1.07	330	335	1.66	470	475	1.54
50	60	5.18	190	196	1.81	330	340	2.63	470	476	3.66
60	65	1.17	20	200	19.44	340	345	1.66	450	480	2.46
60	66	2.13	200	210	149.64	340	346	3.92	480	485	1.54
40	80	28.06	210	220	29.24	300	350	10.72	480	486	3.66
80	90	5.26	220	230	1.50	350	360	1.46	390	490	39.45
90	95	1.54	230	235	1.66	360	365	1.31	490	500	9.36
90	100	4.93	230	240	3.05	360	366	2.93	500	510	5.14
100	105	1.54	240	245	1.66	350	370	2.14	510	515	1.49
100	106	3.20	240	246	3.62	370	375	1.83	510	516	2.94
80	110	2.07	220	250	1.87	370	380	3.61	500	520	4.66
110	115	1.54	250	255	1.66	380	385	2.05	520	525	1.49
110	116	4.52	250	260	2.51	380	386	2.93	520	526	3.17
30	120	88.02	260	265	1.58	20	390	50.61	490	530	24.45
120	130	12.90	260	266	3.45	390	400	98.10	530	540	3.51
130	140	3.04	210	270	32.02	400	410	16.20	540	545	1.24
140	145	1.54	270	280	2.01	410	420	2.57	540	546	2.77
140	146	3.38	280	285	1.66	420	425	1.54	530	550	6.58
130	150	2.47	280	286	3.31	420	430	1.90	550	555	1.49
150	155	1.17	270	290	2.01	430	435	1.54	550	556	4.52
150	156	2.13	290	295	1.66	430	436	2.93	-	-	-
120	160	20.32	290	296	3.62	410	440	2.27	-	-	-

Osservazioni:

- Le perdite maggiori si verificano nei tratti iniziali, analogamente ai risultati ottenuti per l'impianto descritto in precedenza.
- È presente un numero maggiore di tratti con perdite, e per alcuni di essi queste risultano significativamente più elevate.
- I tratti sono:
 - 20-30 → 30-40 → 40-80
 - 20-30 → 30-120
 - 20-200 → 200-210 → 210-220
 - 20-200 → 200-210 → 210-270
 - 20-200 → 200-300
 - 20-390 → 390-400
 - 20-390 → 390-490 → 490-530

Nel caso della rete servita dall'UTA 2 si riscontrano alcuni sbilanciamenti che, pur non essendo gravi, rendono consigliabile un intervento sulla rete mediante l'uso di serrande per imporre una perdita di pressione di 30 Pa (considerate nel calcolo di H_{tot}).

I tratti critici individuati sono:

- 20-30
- 30-40
- 210-270
- 20-390
- 390-490

Di seguito i valori relativi alla rete bilanciata:

Tabella 2.15 - Sbilanciamento della rete per mandata 2

Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %
10	20	0.00	0.0%	200	210	0.00	0.0%	380	386	0.00	0.0%
20	30	50.89	19.8%	210	220	0.85	0.6%	20	390	34.42	12.6%
30	40	14.01	7.0%	220	230	0.00	0.0%	390	400	0.00	0.0%
40	50	14.05	11.0%	230	235	5.01	4.9%	400	410	0.00	0.0%
50	70	0.00	0.0%	230	240	0.00	0.0%	410	420	0.00	0.0%
70	75	2.11	2.1%	240	245	1.96	1.9%	420	425	3.29	3.2%
70	76	0.00	0.0%	240	246	0.00	0.0%	420	430	0.00	0.0%
50	60	3.22	3.0%	220	250	0.33	0.3%	430	435	1.39	1.4%
60	65	0.96	0.9%	250	255	4.31	4.2%	430	436	0.00	0.0%
60	66	0.00	0.0%	250	260	0.00	0.0%	410	440	1.47	1.4%
40	80	0.00	0.0%	260	265	1.87	1.8%	440	445	2.12	2.1%
80	90	0.00	0.0%	260	266	0.00	0.0%	440	446	0.00	0.0%
90	95	6.58	6.5%	210	270	0.00	0.0%	400	450	5.70	4.8%
90	100	0.00	0.0%	270	280	0.31	0.3%	450	460	0.00	0.0%
100	105	1.66	1.6%	280	285	1.66	1.6%	460	465	4.77	4.7%
100	106	0.00	0.0%	280	286	0.00	0.0%	460	470	0.00	0.0%
80	110	6.80	6.4%	270	290	0.00	0.0%	470	475	2.12	2.1%
110	115	2.98	2.9%	290	295	1.96	1.9%	470	476	0.00	0.0%
110	116	0.00	0.0%	290	296	0.00	0.0%	450	480	1.59	1.5%
30	120	0.00	0.0%	200	300	40.97	16.6%	480	485	2.12	2.1%
120	130	7.88	6.6%	300	310	1.20	1.0%	480	486	0.00	0.0%
130	140	0.00	0.0%	310	320	2.52	2.4%	390	490	46.70	26.7%
140	145	1.83	1.8%	320	325	1.66	1.6%	490	500	18.11	15.4%
140	146	0.00	0.0%	320	326	0.00	0.0%	500	510	0.00	0.0%
130	150	1.81	1.7%	310	330	0.00	0.0%	510	515	1.45	1.4%
150	155	0.96	0.9%	330	335	4.90	4.8%	510	516	0.00	0.0%
150	156	0.00	0.0%	330	340	0.00	0.0%	500	520	0.25	0.2%
120	160	0.00	0.0%	340	345	2.27	2.2%	520	525	1.67	1.6%
160	170	0.00	0.0%	340	346	0.00	0.0%	520	526	0.00	0.0%
170	175	1.96	1.9%	300	350	0.00	0.0%	490	530	0.00	0.0%
170	176	0.00	0.0%	350	360	4.29	4.1%	530	540	4.83	4.5%
160	180	0.21	0.2%	360	365	1.62	1.6%	540	545	1.53	1.5%
180	185	3.11	3.1%	360	366	0.00	0.0%	540	546	0.00	0.0%
180	190	0.00	0.0%	350	370	0.00	0.0%	530	550	0.00	0.0%
190	195	0.75	0.7%	370	375	4.70	4.6%	550	555	3.03	3.0%
190	196	0.00	0.0%	370	380	0.00	0.0%	550	556	0.00	0.0%
20	200	0.00	0.0%	380	385	0.87	0.9%	-	-	-	-

Osservazioni:

- I tratti 20-30 e 390-490 presentano ancora uno sbilanciamento, ma rientrano nell'intervallo di accettabilità.
- In particolare, il tratto 390-340 risulta essere il più critico.

Infine, si valutano i valori di pressione in ingresso e uscita dal tratto:

Tabella 2.16 - Pressioni in ingresso e uscita per mandata 2

Ni	Nf	Pin [m/s]	Pout [m/s]	Ni	Nf	Pin [m/s]	Pout [m/s]	Ni	Nf	Pin [m/s]	Pout [m/s]
10	20	318.91	307.33	200	210	287.89	138.25	380	386	102.93	100.00
20	30	256.45	215.21	210	220	137.40	108.16	20	390	272.92	221.70
30	40	201.20	141.45	220	230	108.16	106.67	390	400	221.70	123.60
40	50	127.40	110.53	230	235	101.66	100.00	400	410	123.60	107.40
50	70	110.53	103.56	230	240	106.67	103.62	410	420	107.40	104.83
70	75	101.45	100.00	240	245	101.66	100.00	420	425	101.54	100.00
70	76	103.56	100.00	240	246	103.62	100.00	420	430	104.83	102.93
50	60	107.31	102.13	220	250	107.83	105.96	430	435	101.54	100.00
60	65	101.17	100.00	250	255	101.66	100.00	430	436	102.93	100.00
60	66	102.13	100.00	250	260	105.96	103.45	410	440	105.93	103.66
40	80	141.45	113.39	260	265	101.58	100.00	440	445	101.54	100.00
80	90	113.39	108.13	260	266	103.45	100.00	440	446	103.66	100.00
90	95	101.54	100.00	210	270	138.25	105.63	400	450	117.90	107.71
90	100	108.13	103.20	270	280	105.32	103.31	450	460	107.71	106.31
100	105	101.54	100.00	280	285	101.66	100.00	460	465	101.54	100.00
100	106	103.20	100.00	280	286	103.31	100.00	460	470	106.31	103.66
80	110	106.59	104.52	270	290	105.63	103.62	470	475	101.54	100.00
110	115	101.54	100.00	290	295	101.66	100.00	470	476	103.66	100.00
110	116	104.52	100.00	290	296	103.62	100.00	450	480	106.12	103.66
30	120	215.21	127.19	200	300	246.92	119.40	480	485	101.54	100.00
120	130	119.31	106.41	300	310	118.20	108.05	480	486	103.66	100.00
130	140	106.41	103.38	310	320	105.53	103.31	390	490	175.00	135.55
140	145	101.54	100.00	320	325	101.66	100.00	490	500	117.44	108.08
140	146	103.38	100.00	320	326	103.31	100.00	500	510	108.08	102.94
130	150	104.61	102.13	310	330	108.05	106.56	510	515	101.49	100.00
150	155	101.17	100.00	330	335	101.66	100.00	510	516	102.94	100.00
150	156	102.13	100.00	330	340	106.56	103.92	500	520	107.83	103.17
120	160	127.19	106.87	340	345	101.66	100.00	520	525	101.49	100.00
160	170	106.87	103.62	340	346	103.92	100.00	520	526	103.17	100.00
170	175	101.66	100.00	300	350	119.40	108.68	490	530	135.55	111.10
170	176	103.62	100.00	350	360	104.39	102.93	530	540	106.27	102.77
160	180	106.66	104.18	360	365	101.31	100.00	540	545	101.24	100.00
180	185	101.07	100.00	360	366	102.93	100.00	540	546	102.77	100.00
180	190	104.18	101.81	350	370	108.68	106.54	530	550	111.10	104.52
190	195	101.07	100.00	370	375	101.83	100.00	550	555	101.49	100.00
190	196	101.81	100.00	370	380	106.54	102.93	550	556	104.52	100.00
20	200	307.33	287.89	380	385	102.05	100.00	-	-	-	-

Osservazioni:

- Il percorso più sfavorito risulta essere: 10-20, 20-200, 200-210, 210-270, 270-290, 290-296.

La perdita di pressione tra monte e valle sarà pari a:

$$\Delta P = p_{in,10-20} - p_{out,terminale} = 318,91 - 100,00 = 218,91 \text{ Pa}$$

Per cui la potenza minima richiesta al ventilatore:

$$P_{vent} = \frac{Q_{TOT} \cdot \Delta P}{\eta} = \frac{11455 \cdot 218,91}{3600 \cdot 0,95} = 733,22 \text{ W}$$

3. RETE DI ESTRAZIONE

Per il dimensionamento della rete d'estrazione ci si basa sulla logica presentata nel capitolo precedente (2. Rete di immissione). Dopo aver stabilito la portata totale d'aria immessa secondo normativa, si ricavano le portate d'aria da estrarre dai vari ambienti note quelle richieste dai servizi igienici, in modo tale da mantenere costante la portata tra mandata ed estrazione. Affinché l'aria percorra tutti i locali dal punto di immissione a quello di estrazione, è inoltre necessario imporre un certo gradiente di pressione così da rendere gli ambienti di mandata in sovrappressione rispetto all'ambiente esterno. La portata estratta dai locali sarà dunque inferiore alla differenza delle portate di immissione e estrazione attraverso i servizi igienici di un coefficiente pari a 0,9, come in formula:

$$Q_{estr,locali} = 0,9 \cdot (Q_{TOT,I} - Q_{TOT,E}) \quad (23)$$

- $Q_{estr,locali}$, portata da estrarre dai locali in [m³/h];
- 0,9 indica che verrà estratto solo il 90% della portata mentre l'eccesso uscirà dei serramenti garantendo così che non entri in area non trattata dall'esterno;
- $Q_{TOT,I}$, portata totale di immissione [m³/h];
- $Q_{TOT,E}$, portata totale di estrazione dai servizi igienici [m³/h].

Otengo così il volume di aria totale da estrarre, in tabella:

Tabella 3.1 - Portate estratte dai locali per ciascuna UTA

	$Q_{estr,locali}$ [m ³ /h]
UTA 1	6000
UTA 2	9200

3.1. Scelta dei terminali

Per quanto riguarda la scelta dei terminali d'estrazione, si può individuare un diffusore idoneo per l'intero edificio, considerando che i volumi d'aria da gestire sono di 6000 e di 9200 m³/h. Nei locali come uffici e sale riunioni, le bocchette saranno posizionate in modo strategico per garantire la privacy. Negli open space, invece, l'estrazione d'aria avverrà nelle zone di transito delle persone.

Nella scelta della bocchetta, sarà fondamentale garantire che il livello sonoro non superi i 30 dB, con un massimo tollerabile di circa 35 dB.

Si è scelta una bocchetta di ventilazione con serranda a scorrimento SCHAKO modello IB-R (in figura 3.1), adatta per essere montata su canali circolari.



Figura 3.1 - Bocchetta di ventilazione con serranda a scorrimento SCHAKO modello IB-R

Si stabilisce che ogni terminale elabori una portata di 200 m³/h, consentendo così di aumentare il numero di bocchette che si possono distribuire in maniera da avere un prelievo di aria più uniforme. In questo modo, si otterranno:

- 30 terminali per l'unità trattamento d'aria 1
- 46 terminali per l'unità trattamento d'aria 2

Il passaggio successivo prevede l'imposizione di una velocità frontale di ripresa pari a 2 m/s, valore scelto in modo tale da rispettare il limite massimo di velocità ammissibile di 2,5 m/s per un terminale (tabella 2.5) e per facilitare la scelta della bocchetta in base alle tabelle sotto riportate.

Per definire il dimensionamento dell'impianto, si analizza la perdita di pressione associata a ciascun terminale che costituisce un dato di ingresso nel calcolo. Supponendo che la serranda a scorrimento sia completamente aperta (posizione di normale funzionamento), si ottiene una caduta di pressione di circa 13 Pa (1,326 mmH₂O), come in figura 3.2.

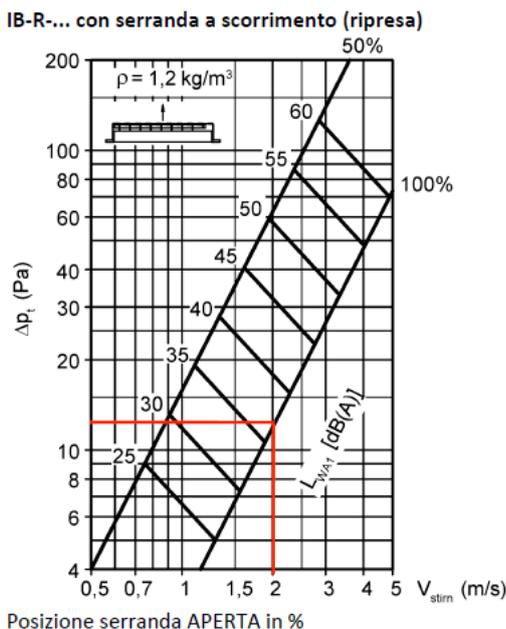


Figura 3.2 - Determinazione delle perdite di carico da catalogo SCHAKO

È possibile ora definire anche a livello geometrico il terminale. L'altezza della bocchetta, dato il modello, viene scelta pari a $H=65$ mm (come si evince in figura 3.3).

Diametro del canale

IB-R H	øD		
	min.	ideale	max.
65	140	250	400
115	300	500	800
215	600	750	1250

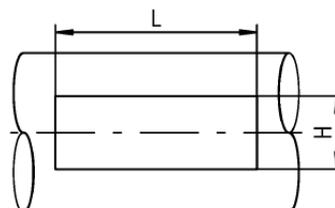


Figura 3.3 - Valori consigliati del parametro "altezza" del terminale in funzione del diametro della condotta da catalogo SCHAKO

Infatti, le bocchette sono montate su delle condotte circolari che nel caso in analisi hanno un diametro compreso tra il valore minimo di $\text{Ø}140$ mm e quello massimo di $\text{Ø}400$ mm (nella maggioranza dei casi pari a $\text{Ø}200$ mm).

Si può determinare ora l'altra dimensione del terminale, quella corrispondente alla lunghezza, pari a $L=515/615$ mm.

Velocità frontale ripresa

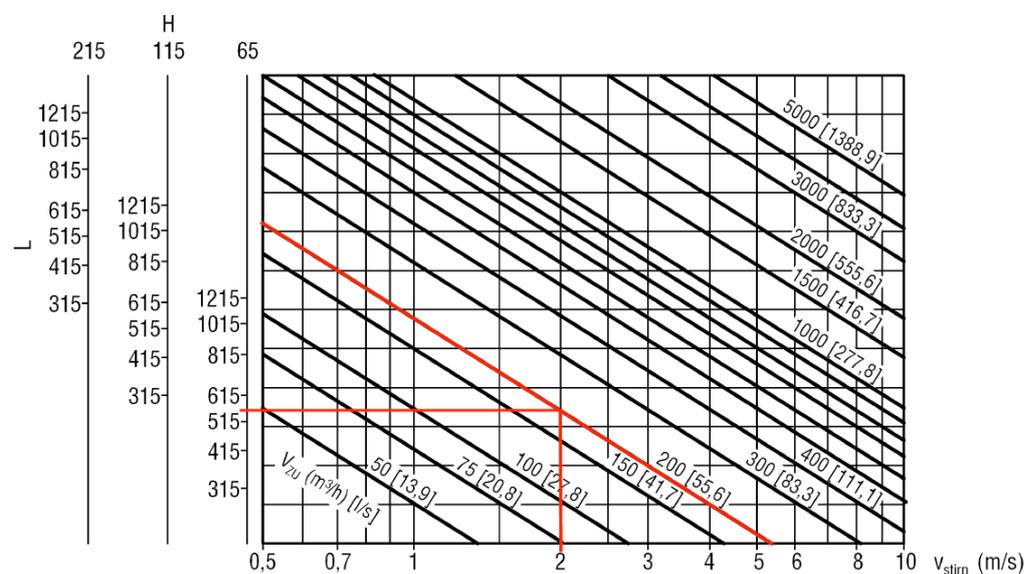


Figura 3.4 - Grafico per determinare la geometria del terminale da catalogo SCHAKO

Si opta per considerare una velocità leggermente superiore a 2 s/s, $v \cong 2,15$ m/s, la quale comporta relativamente al grafico di figura 3.4:

- un lieve aumento della caduta di pressione, che possiamo in conclusione porre pari a $\Delta p = 14$ Pa;

- un irrilevante aumento legato all'emissione sonora, sempre nell'intorno dei 35 dB.

La dimensione finale del terminale è dunque pari a 515x65 mm (LxH).

Una volta stabilito il numero di terminali per ciascun ambiente e la loro ubicazione nel layout, si si passa alla rappresentazione della rete per entrambe le macroaree.

Di seguito vengono riportati:

- la rappresentazione degli schemi unifilari, denominati analogamente al caso delle UTA come "ritorno 1" e "ritorno 2" (a seconda dell'unità che servono), eseguita con il software AutoCAD (Figura 3.5);
- l'elenco dei nodi rappresentativi dei tratti in analisi con la relativa lunghezza (Tabelle 3.2 e 3.3).

Tabella 3.2 - Definizione geometria della rete di ritorno 1: nodi e lunghezze

RITORNO 1											
Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]
10	20	1.36	100	106	9	170	176	3	240	250	7.5
20	30	12	90	110	4	160	180	1	250	255	0.3
30	40	3.5	110	115	0.3	180	185	3	250	256	7.5
40	50	0.5	110	116	6.5	180	186	3	190	260	33
50	60	8.5	30	120	15	20	190	14	260	270	2.5
60	65	1.5	120	130	0.5	190	200	1	270	275	0.3
60	70	2	130	140	3.5	200	210	7	270	280	6
70	75	0.3	140	145	0.3	210	215	2	280	285	0.3
70	76	3	140	146	8	210	220	1.5	280	286	9
50	80	3	130	150	5.5	220	225	0.3	260	290	5
80	85	2	150	155	0.3	220	226	3.5	290	295	0.3
80	86	3.5	150	156	10	200	230	7	290	300	7
40	90	25	120	160	18	230	235	2	300	305	0.3
90	100	2.5	160	170	0.5	230	240	6	300	306	6
100	105	0.3	170	175	7	240	245	0.3	-	-	-

Tabella 3.3 - Definizione geometria della rete di ritorno 2: nodi e lunghezze

RITORNO 2											
Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]	Ni	Nf	L [m]
10	20	10	140	145	1.5	20	250	60	360	370	0.5
20	30	3	140	146	1.5	250	260	17	370	375	3
30	40	30	30	150	60	260	270	2	370	380	2
40	50	9.5	150	160	6	270	275	0.3	380	385	0.3
50	60	1.5	160	170	5.5	270	280	6.5	380	386	2
60	65	0.3	170	180	0.5	280	285	0.3	360	390	1
60	70	4	180	185	0.3	280	286	7	390	395	3
70	75	0.3	180	186	3	260	290	6	390	400	1.5
70	76	9	170	190	0.5	290	295	0.3	400	405	0.3
50	80	2	190	195	0.3	290	296	7	400	406	2.5
80	85	0.3	190	196	1.5	250	300	17	350	410	8
80	90	5.5	160	200	8	300	310	4	410	415	0.3
90	95	0.3	200	205	1.5	310	315	0.3	410	420	7
90	96	5.5	200	206	5	310	320	5.5	420	425	0.3
40	100	23	150	210	18	320	325	0.3	420	426	7.5
100	110	2	210	220	4.5	320	326	5	350	430	8
110	115	0.3	220	225	0.3	300	330	2.5	430	435	0.3
110	120	5.5	220	226	4	330	335	0.3	430	440	6.5
120	125	0.3	210	230	1.5	330	340	7	440	445	0.3
120	126	5.5	230	235	0.3	340	345	0.3	440	446	7
100	130	2	230	240	5.5	340	346	5.5	-	-	-
130	135	0.3	240	245	0.3	20	350	20	-	-	-
130	140	6	240	246	4.5	350	360	4	-	-	-

3.2. Calcolo progettuale

La procedura di calcolo è uguale a quella presentata nel caso della mandata (2.2. *Calcolo progettuale*), per cui di seguito si riporteranno esclusivamente i risultati. Le uniche osservazioni da fare sono relative ai dati di input, una relativa alla velocità iniziale limite per il predimensionamento delle condotte dei terminali, pari in questo caso a 2,1 m/s (come spiegato nel paragrafo precedente 3.1. *Scelta dei terminali*) e l'altra relativa alla pressione che si ha al nodo in uscita del ramo terminale, pari a $p_{out} = 14 Pa$.

3.3. Bilanciamento della rete

Si utilizzeranno le serrande con chiusura a farfalla per la regolazione delle perdite nelle condotte circolari, mentre le bocchette verranno regolate grazie alla serranda a scorrimento inclusa nel modello scelto.

3.4. Risultati

3.4.1. Ritorno UTA 1

Per quanto riguarda il calcolo delle portate, si ha:

Tabella 3.4 - Portate della rete per ritorno 1

Ni	Nf	Qi [m ³ /h]									
10	20	6000	100	106	200	170	176	200	240	250	400
20	30	3400	90	110	400	160	180	400	250	255	200
30	40	1800	110	115	200	180	185	200	250	256	200
40	50	1000	110	116	200	180	186	200	190	260	1200
50	60	600	30	120	1600	20	190	2600	260	270	600
60	65	200	120	130	800	190	200	1400	270	275	200
60	70	400	130	140	400	200	210	600	270	280	400
70	75	200	140	145	200	210	215	200	280	285	200
70	76	200	140	146	200	210	220	400	280	286	200
50	80	400	130	150	400	220	225	200	260	290	600
80	85	200	150	155	200	220	226	200	290	295	200
80	86	200	150	156	200	200	230	800	290	300	400
40	90	800	120	160	800	230	235	200	300	305	200
90	100	400	160	170	400	230	240	600	300	306	200
100	105	200	170	175	200	240	245	200	-	-	-

In seguito, si determinano le sezioni e le velocità:

Tabella 3.5 - Sezioni di condotte e velocità effettive per ritorno 1

Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]
10	20	600x400	6.94	120	130	280	3.61	220	226	200	1.77
20	30	400x400	5.90	130	140	224	2.82	200	230	280	3.61
30	40	355	5.05	140	145	200	1.77	230	235	200	1.77
40	50	280	4.51	140	146	200	1.77	230	240	250	3.40
50	60	280	2.71	130	150	224	2.82	240	245	200	1.77
60	65	200	1.77	150	155	200	1.77	240	250	224	2.82
60	70	224	2.82	150	156	200	1.77	250	255	200	1.77
70	75	200	1.77	120	160	280	3.61	250	256	200	1.77
70	76	200	1.77	160	170	224	2.82	190	260	280	5.41
50	80	224	2.82	170	175	200	1.77	260	270	280	2.71
80	85	200	1.77	170	176	200	1.77	270	275	200	1.77
80	86	200	1.77	160	180	224	2.82	270	280	250	2.26
40	90	280	3.61	180	185	200	1.77	280	285	200	1.77
90	100	224	2.82	180	186	200	1.77	280	286	200	1.77
100	105	200	1.77	20	190	450x300	5.35	260	290	280	2.71
100	106	200	1.77	190	200	300x300	4.32	290	295	200	1.77
90	110	224	2.82	200	210	250	3.40	290	300	250	2.26
110	115	200	1.77	210	215	200	1.77	300	305	200	1.77
110	116	200	1.77	210	220	224	2.82	300	306	200	1.77
30	120	315	5.70	220	225	200	1.77	-	-	-	-

Osservazioni:

- I diametri diminuiscono da 355 mm a 200 mm.
- Sono presenti quattro tratti a sezione rettangolare, tutti finalizzati a ridurre gli ingombri. I rispettivi diametri equivalenti sono:
 - 533 per la sezione 600x400 mm
 - 437 per la sezione 400x400 mm
 - 400 per la sezione 450x300 mm
 - 328 per la sezione 300x300 mm
- Si nota che la velocità massima si verifica nel primo tratto ed è pari a 6,94 m/s, un valore accettabile.
- Ai terminali la velocità è di 1,77 m/s, valore che rientra nei limiti imposti di 2 m/s, fissati per evitare il disagio causato dal rumore.

Successivamente, si ricavano le perdite di carico totali nella condotta:

Tabella 3.6 - Perdite totali di carico per ritorno 1

Ni	Nf	H _{tot} [Pa]									
10	20	10.28	100	106	2.89	170	176	1.44	240	250	5.55
20	30	18.84	90	110	3.76	160	180	2.23	250	255	0.79
30	40	12.68	110	115	0.79	180	185	1.44	250	256	2.53
40	50	9.46	110	116	2.29	180	186	1.44	190	260	50.10
50	60	4.51	30	120	25.26	20	190	19.23	260	270	2.38
60	65	6.09	120	130	12.91	190	200	34.79	270	275	5.80
60	70	2.74	130	140	3.51	200	210	16.83	270	280	2.84
70	75	0.79	140	145	0.79	210	215	1.20	280	285	0.79
70	76	1.44	140	146	2.65	210	220	2.48	280	286	2.89
50	80	8.25	130	150	4.53	220	225	0.79	260	290	3.27
80	85	1.20	150	155	0.79	220	226	1.57	290	295	5.80
80	86	1.57	150	156	3.13	200	230	6.91	290	300	3.13
40	90	18.03	120	160	13.70	230	235	11.01	300	305	0.79
90	100	2.99	160	170	1.97	230	240	6.19	300	306	2.17
100	105	0.79	170	175	2.41	240	245	5.80	-	-	-

Osservazioni:

- Il sistema presenta perdite in alcuni tratti, in termini assoluti non eccessivamente gravose.
- I tratti coinvolti sono:
 - 20-30 → 30-120
 - 20-190 → 190-200 → 210-220
 - 20-190 → 190-260

L'impianto di ripresa servito dall'UTA 1 presenta diversi sbilanciamenti che richiedono l'intervento mediante l'uso di serrande. I tratti critici individuati e il valore di perdita imposta dalla singolarità sono:

- 30-40 → 5 Pa
- 40-50 → 5 Pa
- 60-65 → 5 Pa
- 50-80 → 5 Pa
- 120-130 → 10 Pa
- 190-200 → 30 Pa
- 200-210 → 10 Pa
- 230-235 → 10 Pa

- 240-245 → 5 Pa
- 270-275 → 5 Pa
- 290-295 → 5 Pa

Queste perdite localizzate sono state preventivamente considerate nel calcolo delle perdite di carico totali riportate in tabella 3.6.

Di seguito i valori relativi alla rete bilanciata:

Tabella 3.7 - Sbilanciamento della rete per ritorno 1

Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %
10	20	0.00	0.0%	120	130	0.00	0.0%	220	226	0.00	0.0%
20	30	13.73	17.5%	130	140	1.50	7.5%	200	230	0.00	0.0%
30	40	9.07	17.9%	140	145	1.85	12.5%	230	235	3.26	13.0%
40	50	4.02	11.8%	140	146	0.00	0.0%	230	240	0.00	0.0%
50	60	0.00	0.0%	130	150	0.00	0.0%	240	245	2.28	11.5%
60	65	0.00	0.0%	150	155	2.34	15.8%	240	250	0.00	0.0%
60	70	1.90	10.5%	150	156	0.00	0.0%	250	255	1.73	11.7%
70	75	0.65	4.4%	120	160	2.48	7.7%	250	256	0.00	0.0%
70	76	0.00	0.0%	160	170	0.00	0.0%	190	260	0.00	0.0%
50	80	0.78	3.3%	170	175	0.00	0.0%	260	270	0.89	4.0%
80	85	0.36	2.4%	170	176	0.96	6.2%	270	275	0.00	0.0%
80	86	0.00	0.0%	160	180	0.71	4.0%	270	280	0.07	0.4%
40	90	0.00	0.0%	180	185	0.00	0.0%	280	285	2.09	14.2%
90	100	0.16	0.8%	180	186	0.00	0.0%	280	286	0.00	0.0%
100	105	2.09	14.2%	20	190	0.00	0.0%	260	290	0.00	0.0%
100	106	0.00	0.0%	190	200	3.20	4.6%	290	295	0.00	0.0%
90	110	0.00	0.0%	200	210	0.30	0.9%	290	300	0.50	2.6%
110	115	1.49	10.1%	210	215	2.84	18.7%	300	305	1.37	9.3%
110	116	0.00	0.0%	210	220	0.00	0.0%	300	306	0.00	0.0%
30	120	0.00	0.0%	220	225	0.77	5.2%	-	-	-	-

Osservazioni:

- Il tratto più sbilanciato risulta essere il 210-215, con uno sbilanciamento percentuale di 18,7% (valore inferiore al limite ammissibile).
- Alcuni tratti (30-40, 40-50, 230-235) su cui si è intervenuti con una serranda rimangono sbilanciati, ma di una percentuale più che accettabile.

Infine, si valutano i valori di pressione in ingresso e uscita dal tratto:

Tabella 3.8 - Pressioni in ingresso e uscita per ritorno 1

Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]	Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]	Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]
10	20	102.67	92.39	120	130	34.56	21.66	220	226	15.56	14.00
20	30	78.66	59.82	130	140	20.15	16.65	200	230	35.18	28.26
30	40	50.75	38.07	140	145	14.79	14.00	230	235	25.01	14.00
40	50	34.05	24.59	140	146	16.65	14.00	230	240	28.26	22.08
50	60	24.59	20.09	130	150	21.66	17.13	240	245	19.80	14.00
60	65	20.09	14.00	150	155	14.79	14.00	240	250	22.08	16.53
60	70	18.18	15.44	150	156	17.13	14.00	250	255	14.79	14.00
70	75	14.79	14.00	120	160	32.08	18.38	250	256	16.53	14.00
70	76	15.44	14.00	160	170	18.38	16.41	190	260	73.16	23.06
50	80	23.82	15.56	170	175	16.41	14.00	260	270	22.17	19.80
80	85	15.20	14.00	170	176	15.44	14.00	270	275	19.80	14.00
80	86	15.56	14.00	160	180	17.67	15.44	270	280	19.72	16.89
40	90	38.07	20.05	180	185	15.44	14.00	280	285	14.79	14.00
90	100	19.88	16.89	180	186	15.44	14.00	280	286	16.89	14.00
100	105	14.79	14.00	20	190	92.39	73.16	260	290	23.06	19.80
100	106	16.89	14.00	190	200	69.97	35.18	290	295	19.80	14.00
90	110	20.05	16.29	200	210	34.88	18.05	290	300	19.29	16.17
110	115	14.79	14.00	210	215	15.20	14.00	300	305	14.79	14.00
110	116	16.29	14.00	210	220	18.05	15.56	300	306	16.17	14.00
30	120	59.82	34.56	220	225	14.79	14.00	-	-	-	-

Osservazioni:

- Il percorso più sfavorito risulta essere: 10-20, 20-190, 190-260, 260-290, 290-295.

La perdita di pressione tra monte e valle sarà pari a:

$$\Delta P = p_{in,10-20} - p_{out,terminale} = 102,67 - 14,00 = 88,67 \text{ Pa}$$

Per cui la potenza minima richiesta al ventilatore:

$$P_{vent} = \frac{Q_{TOT} \cdot \Delta P}{\eta} = \frac{6000 \cdot 88,67}{3600 \cdot 0,95} = 155,56 \text{ W}$$

3.4.2. Ritorno UTA 2

Per quanto riguarda il calcolo delle portate, si ha:

Tabella 3.9 - Portate della rete per ritorno 2

Ni	Nf	Qi [m ³ /h]									
10	20	9200	140	145	200	20	250	2200	360	370	600
20	30	4600	140	146	200	250	260	1000	370	375	200
30	40	2400	30	150	2200	260	270	600	370	380	400
40	50	1200	150	160	1200	270	275	200	380	385	200
50	60	600	160	170	800	270	280	400	380	386	200
60	65	200	170	180	400	280	285	200	360	390	600
60	70	400	180	185	200	280	286	200	390	395	200
70	75	200	180	186	200	260	290	400	390	400	400
70	76	200	170	190	400	290	295	200	400	405	200
50	80	600	190	195	200	290	296	200	400	406	200
80	85	200	190	196	200	250	300	1200	350	410	600
80	90	400	160	200	400	300	310	600	410	415	200
90	95	200	200	205	200	310	315	200	410	420	400
90	96	200	200	206	200	310	320	400	420	425	200
40	100	1200	150	210	1000	320	325	200	420	426	200
100	110	600	210	220	400	320	326	200	350	430	600
110	115	200	220	225	200	300	330	600	430	435	200
110	120	400	220	226	200	330	335	200	430	440	400
120	125	200	210	230	600	330	340	400	440	445	200
120	126	200	230	235	200	340	345	200	440	446	200
100	130	600	230	240	400	340	346	200	-	-	-
130	135	200	240	245	200	20	350	2400	-	-	-
130	140	400	240	246	200	350	360	1200	-	-	-

In seguito, si determinano le sezioni e le velocità:

Tabella 3.10 - Sezioni di condotte e velocità effettive per ritorno 2

Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]	Ni	Nf	D/LxH [mm]	v [m/s]
10	20	650x600	6.55	180	186	200	1.77	320	325	200	1.77
20	30	500x450	5.68	170	190	224	2.82	320	326	200	1.77
30	40	400	5.31	190	195	200	1.77	300	330	280	2.71
40	50	300	4.72	190	196	200	1.77	330	335	200	1.77
50	60	280	2.71	160	200	224	2.82	330	340	224	2.82
60	65	200	1.77	200	205	200	1.77	340	345	200	1.77
60	70	224	2.82	200	206	200	1.77	340	346	200	1.77
70	75	200	1.77	150	210	280	4.51	20	350	355	6.74
70	76	200	1.77	210	220	224	2.82	350	360	280	5.41
50	80	280	2.71	220	225	200	1.77	360	370	250	3.40
80	85	200	1.77	220	226	200	1.77	370	375	200	1.77
80	90	224	2.82	210	230	280	2.71	370	380	224	2.82
90	95	200	1.77	230	235	200	1.77	380	385	200	1.77
90	96	200	1.77	230	240	224	2.82	380	386	200	1.77
40	100	280	5.41	240	245	200	1.77	360	390	250	3.40
100	110	280	2.71	240	246	200	1.77	390	395	200	1.77
110	115	200	1.77	20	250	355	6.17	390	400	224	2.82
110	120	224	2.82	250	260	280	4.51	400	405	200	1.77
120	125	200	1.77	260	270	280	2.71	400	406	200	1.77
120	126	200	1.77	270	275	200	1.77	350	410	250	3.40
100	130	280	2.71	270	280	224	2.82	410	415	200	1.77
130	135	200	1.77	280	285	200	1.77	410	420	224	2.82
130	140	224	2.82	280	286	200	1.77	420	425	200	1.77
140	145	200	1.77	260	290	224	2.82	420	426	200	1.77
140	146	200	1.77	290	295	200	1.77	350	430	250	3.40
30	150	355	6.17	290	296	200	1.77	430	435	200	1.77
150	160	280	5.41	250	300	280	5.41	430	440	224	2.82
160	170	280	3.61	300	310	280	2.71	440	445	200	1.77
170	180	224	2.82	310	315	200	1.77	440	446	200	1.77
180	185	200	1.77	310	320	224	2.82	-	-	-	-

Osservazioni:

- I diametri si snodano in un range tra 400 mm e 200 mm.
- I primi due tratti, 10-20 e 20-30, sono rettangolari e presentano un diametro equivalente rispettivamente di 683 mm e 518 mm.
- La velocità massima si registra nel primo tratto e è pari a 6,55 m/s.
- La velocità in uscita dalle bocchette è di 1,77 m/s, quindi al di sotto della soglia limite stabilita durante la scelta dei terminali.

Successivamente, si ricavano le perdite di carico totali per ogni tratto:

Tabella 3.11 - Perdite totali di carico per ritorno 2

Ni	Nf	H _{tot} [Pa]									
10	20	14.21	140	145	1.08	20	250	83.60	360	370	2.70
20	30	8.18	140	146	1.08	250	260	20.10	370	375	1.44
30	40	59.55	30	150	83.60	260	270	2.20	370	380	2.74
40	50	43.26	150	160	13.74	270	275	5.80	380	385	0.79
50	60	2.02	160	170	5.99	270	280	5.04	380	386	1.20
60	65	5.80	170	180	1.97	280	285	0.79	360	390	3.01
60	70	3.76	180	185	0.79	280	286	2.41	390	395	1.44
70	75	0.79	180	186	1.44	260	290	4.78	390	400	2.48
70	76	2.89	170	190	1.97	290	295	0.79	400	405	0.79
50	80	2.20	190	195	0.79	290	296	2.41	400	406	1.32
80	85	5.80	190	196	1.08	250	300	28.55	350	410	7.46
80	90	4.53	160	200	5.80	300	310	2.91	410	415	5.80
90	95	0.79	200	205	1.08	310	315	5.80	410	420	5.29
90	96	2.05	200	206	1.93	310	320	4.53	420	425	0.79
40	100	36.63	150	210	21.05	320	325	0.79	420	426	2.53
100	110	2.20	210	220	4.02	320	326	1.93	350	430	7.46
110	115	5.80	220	225	0.79	300	330	2.38	430	435	5.80
110	120	4.53	220	226	1.69	330	335	5.80	430	440	5.04
120	125	0.79	210	230	2.02	330	340	5.29	440	445	0.79
120	126	2.05	230	235	5.80	340	345	0.79	440	446	2.41
100	130	2.20	230	240	4.53	340	346	2.05	-	-	-
130	135	5.80	240	245	0.79	20	350	68.34	-	-	-
130	140	4.78	240	246	1.81	350	360	11.04	-	-	-

Osservazioni:

- Il sistema presenta diverse perdite lungo le condotte, in particolare lungo:
 - 30-40 → 40-50
 - 30-40 → 40-100
 - 30-150 → 150-210
 - 20-250 → 250-260
 - 20-250 → 250-300
 - 20-350

Anche per questo ultimo impianto si riscontrano diversi sbilanciamenti per i quali è richiesto l'utilizzo di serrande. I tratti critici individuati e il valore di perdita imposta dalla singolarità sono:

- 30-40 → 30 Pa
- 40-50 → 30 Pa
- 60-65 → 5 Pa
- 80-85 → 5 Pa
- 110-115 → 5 Pa
- 130-135 → 5 Pa
- 230-235 → 5 Pa
- 270-275 → 5 Pa
- 310-315 → 5 Pa
- 330-335 → 5 Pa
- 20-350 → 30 Pa
- 410-415 → 5 Pa
- 430-435 → 5 Pa

Queste perdite localizzate sono state preventivamente considerate nel calcolo delle perdite di carico totali riportate in tabella 3.11.

Di seguito i valori relativi alla rete bilanciata:

Tabella 3.12 - Sbilanciamento della rete per ritorno 2

Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %	Ni	Nf	Sbil. [Pa]	Sbil. %
10	20	0.00	0.0%	180	186	0.00	0.0%	320	325	1.13	7.7%
20	30	0.68	0.5%	170	190	0.36	2.1%	320	326	0.00	0.0%
30	40	1.43	1.1%	190	195	0.29	2.0%	300	330	0.00	0.0%
40	50	0.00	0.0%	190	196	0.00	0.0%	330	335	1.54	7.8%
50	60	0.10	0.4%	160	200	1.67	7.7%	330	340	0.00	0.0%
60	65	0.85	4.3%	200	205	0.84	5.6%	340	345	1.25	8.5%
60	70	0.00	0.0%	200	206	0.00	0.0%	340	346	0.00	0.0%
70	75	2.09	14.2%	150	210	0.00	0.0%	20	350	35.67	35.6%
70	76	0.00	0.0%	210	220	2.65	13.5%	350	360	0.00	0.0%
50	80	0.00	0.0%	220	225	0.89	6.0%	360	370	0.18	0.9%
80	85	0.78	3.9%	220	226	0.00	0.0%	370	375	2.50	16.2%
80	90	0.00	0.0%	210	230	0.00	0.0%	370	380	0.00	0.0%
90	95	1.25	8.5%	230	235	0.54	2.7%	380	385	0.41	2.8%
90	96	0.00	0.0%	230	240	0.00	0.0%	380	386	0.00	0.0%
40	100	6.62	11.1%	240	245	1.01	6.8%	360	390	0.00	0.0%
100	110	0.00	0.0%	240	246	0.00	0.0%	390	395	2.36	15.3%
110	115	0.78	3.9%	20	250	0.00	0.0%	390	400	0.00	0.0%
110	120	0.00	0.0%	250	260	8.52	19.5%	400	405	0.53	3.6%

120	125	1.25	8.5%	260	270	0.00	0.0%	400	406	0.00	0.0%
120	126	0.00	0.0%	270	275	1.65	8.3%	350	410	2.59	8.8%
100	130	0.00	0.0%	270	280	0.00	0.0%	410	415	2.02	10.2%
130	135	0.71	3.2%	280	285	1.61	10.9%	410	420	0.00	0.0%
130	140	0.07	0.3%	280	286	0.00	0.0%	420	425	1.73	11.7%
140	145	0.00	0.0%	260	290	2.46	11.6%	420	426	0.00	0.0%
140	146	0.00	0.0%	290	295	1.61	10.9%	350	430	2.96	10.3%
30	150	0.00	0.0%	290	296	0.00	0.0%	430	435	1.65	8.3%
150	160	0.00	0.0%	250	300	0.00	0.0%	430	440	0.00	0.0%
160	170	6.27	16.9%	300	310	0.35	1.5%	440	445	1.61	10.9%
170	180	0.00	0.0%	310	315	0.66	3.3%	440	446	0.00	0.0%
180	185	0.65	4.4%	310	320	0.00	0.0%	-	-	-	-

Alcuni tratti continuano a presentare sbilanciamenti di piccola entità, mentre il tratto 20-350 mostra uno sbilanciamento più significativo. Tuttavia, questo non rappresenta un problema, poiché, sebbene leggermente più elevato, non compromette il funzionamento dell'impianto.

Infine, si valutano i valori di pressione in ingresso e uscita dal tratto:

Tabella 3.13 - Pressioni in ingresso e uscita per ritorno 2

Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]	Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]	Ni	Nf	P _{in} [m/s]	P _{out} [m/s]
10	20	150.09	135.87	180	186	15.44	14.00	320	325	14.79	14.00
20	30	135.19	127.01	170	190	17.05	15.08	320	326	15.92	14.00
30	40	125.58	66.03	190	195	14.79	14.00	300	330	23.72	21.34
40	50	66.03	22.77	190	196	15.08	14.00	330	335	19.80	14.00
50	60	22.67	20.65	160	200	21.73	15.92	330	340	21.34	16.05
60	65	19.80	14.00	200	205	15.08	14.00	340	345	14.79	14.00
60	70	20.65	16.89	200	206	15.92	14.00	340	346	16.05	14.00
70	75	14.79	14.00	150	210	43.41	22.35	20	350	100.20	31.87
70	76	16.89	14.00	210	220	19.70	15.68	350	360	31.87	20.82
50	80	22.77	20.57	220	225	14.79	14.00	360	370	20.64	17.94
80	85	19.80	14.00	220	226	15.68	14.00	370	375	15.44	14.00
80	90	20.57	16.05	210	230	22.35	20.33	370	380	17.94	15.20
90	95	14.79	14.00	230	235	19.80	14.00	380	385	14.79	14.00
90	96	16.05	14.00	230	240	20.33	15.80	380	386	15.20	14.00
40	100	59.41	22.77	240	245	14.79	14.00	360	390	20.82	17.81
100	110	22.77	20.57	240	246	15.80	14.00	390	395	15.44	14.00
110	115	19.80	14.00	20	250	135.87	52.27	390	400	17.81	15.32
110	120	20.57	16.05	250	260	43.75	23.65	400	405	14.79	14.00
120	125	14.79	14.00	260	270	23.65	21.44	400	406	15.32	14.00
120	126	16.05	14.00	270	275	19.80	14.00	350	410	29.28	21.82
100	130	22.07	19.86	270	280	21.44	16.41	410	415	19.80	14.00
130	135	19.80	14.00	280	285	14.79	14.00	410	420	21.82	16.53
130	140	19.86	15.08	280	286	16.41	14.00	420	425	14.79	14.00

140	145	15.08	14.00	260	290	21.19	16.41	420	426	16.53	14.00
140	146	15.08	14.00	290	295	14.79	14.00	350	430	28.90	21.44
30	150	127.01	43.41	290	296	16.41	14.00	430	435	19.80	14.00
150	160	37.14	23.40	250	300	52.27	23.72	430	440	21.44	16.41
160	170	23.40	17.42	300	310	23.36	20.45	440	445	14.79	14.00
170	180	17.42	15.44	310	315	19.80	14.00	440	446	16.41	14.00
180	185	14.79	14.00	310	320	20.45	15.92	-	-	-	-

Osservazioni:

- Il percorso più sfavorito risulta essere: 10-20, 20-250, 250-300, 300-330, 330-340, 340-346.

La perdita di pressione tra monte e valle sarà pari a:

$$\Delta P = p_{in,10-20} - p_{out,terminale} = 150,09 - 14,00 = 136,09 \text{ Pa}$$

Per cui la potenza minima richiesta al ventilatore:

$$P_{vent} = \frac{Q_{TOT} \cdot \Delta P}{\eta} = \frac{9200 \cdot 136,09}{3600 \cdot 0,95} = 366,09 \text{ W}$$

4. PROGETTAZIONE SU REVIT

Dopo aver effettuato un dimensionamento preliminare dell'intero sistema, si è proceduto alla simulazione tridimensionale della rete aerea utilizzando il software BIM Autodesk Revit.

Questo programma consente di importare file .dwg realizzati in AutoCAD e di modellare l'intera rete prendendo come riferimento gli schemi unifilari.

Attraverso l'uso delle famiglie, è possibile impostare le grandezze geometriche relative a sezioni e lunghezze, nonché la portata. Una volta posizionati i terminali e definita la relativa richiesta di perdita di pressione, il software è in grado di determinare i parametri precedentemente calcolati, consentendo così di verificare la coerenza dei risultati ottenuti e validare la progettazione mediante strumenti digitali.

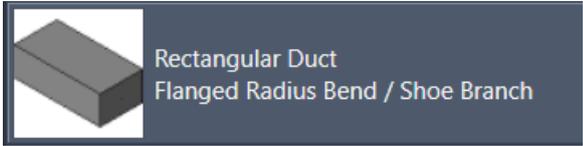
4.1. Famiglie di elementi

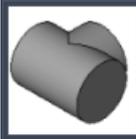
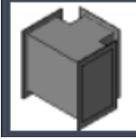
Nel processo di progettazione BIM le famiglie rappresentano gli elementi fondamentali utilizzati per modellare e descrivere le diverse parti di un impianto. Per la progettazione delle condotte di ventilazione, le famiglie consentono di definire le caratteristiche geometriche, di pressione e materiali dei componenti della rete, come condotti, giunti, raccordi e bocchette.

Una selezione accurata delle famiglie è essenziale per garantire un'integrazione ottimale dei componenti e per realizzare un modello coerente con i calcoli di dimensionamento eseguiti manualmente in fase preliminare. Durante la progettazione, sono state impiegate diverse tipologie di famiglie, alcune già disponibili nel template di Revit per elementi standard come i condotti di ventilazione, giunti e raccordi, altre create ex novo per soddisfare esigenze specifiche, come nel caso dei terminali.

Di seguito un elenco delle famiglie utilizzate (catture da Revit).

Tabella 4.1 - Famiglie Revit usate nel progetto

Famiglia	Parametri da impostare
<ul style="list-style-type: none">• Condotti di ventilazione rettangolari 	<ul style="list-style-type: none">- Base e altezza- Flusso

<ul style="list-style-type: none"> • Condotti di ventilazione circolari  <p>Round Duct Segmented Bend / Equal Tee</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diametro - Flusso
<ul style="list-style-type: none"> • Giunti di collegamento  <p>Round Tee Standard</p>  <p>Round Cross Standard</p>  <p>Rectangular Square Tee - Flanged Standard</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diametri - Base, altezza
<ul style="list-style-type: none"> • Raccordi (curve, riduzioni, transizioni)  <p>Rectangular Shoe Branch - Flanged Standard</p>  <p>Round Segmented Bend - Slip Joint Standard</p>  <p>Rectangular Medium Radius Bend - Flanged Standard</p>  <p>Round Taper - Slip Joint Standard</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diametri - Base, altezza

 <p>Rectangular - Round Transformation - Flanged Standard</p>	
<ul style="list-style-type: none"> Terminali⁷ <div data-bbox="363 479 938 622">  <p>Supply Diffuser 600 x 600 Face 300 x 300 Connection</p> </div> <div data-bbox="363 667 938 810">  <p>Return Diffuser 600 x 600 Face 300 x 300 Connection</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> - Diametro di allaccio alla condotta principale - Geometria della bocchetta - Flusso - Caduta di pressione

4.2. Processo di modellazione

L'obiettivo è quello di riprodurre fedelmente la rete di ventilazione, imponendo i valori geometrici e di flusso determinati nel capitolo precedente (nel caso dei terminali, definendo anche le cadute di pressione).

Si sceglie quindi il template MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing), utilizzato per la modellazione impiantistica. Successivamente, si impostano i livelli di riferimento, corrispondenti alle altezze dei piani dell'edificio. Questo passaggio è fondamentale per comprendere meglio l'ingombro verticale, considerando la necessità di rispettare determinati valori minimi di altezza dal pavimento al soffitto nei vari ambienti, evitando un abbassamento eccessivo del controsoffitto. Infine, si imposta il sistema metrico desiderato.

In questo caso, la progettazione è stata eseguita partendo dal primo tratto e proseguendo lungo l'intera rete fino ai terminali. Le condotte sono state collocate seguendo la traccia fornita da AutoCAD e impostando i diametri e le relative portate.

L'inserimento dei condotti avviene tramite la modalità *Automatic Routing*, che consente il collegamento automatico tra i vari tratti, con la possibilità di modificarlo

⁷ La dimensione riportata per i terminali non corrisponde a quella effettiva usata per il progetto, in quanto è la denominazione standard che si ha per i diffusori di ripresa e mandata su Revit. Per la dimensione effettiva delle bocchette vedere paragrafi 2.1 e 3.1 *Scelta dei terminali*.

successivamente in caso di necessità. È comunque possibile inserire manualmente gli elementi di connessione desiderati.

Per curve, gomiti, riduzioni e giunzioni, se inseriti manualmente, è necessario specificare le dimensioni della sezione; in alternativa, il programma provvederà a dimensionare automaticamente l'oggetto. Inoltre, per uniformare la metodologia di calcolo, conviene inserire manualmente i coefficienti di perdita in base alla normativa seguita.

Infine, le bocchette di ventilazione vengono posizionate nei punti previsti dal progetto.

Oltre alla verifica altimetrica, la modellazione ha permesso di controllare l'ingombro effettivo della rete all'interno del sistema, garantendo una migliore visione d'insieme del progetto.

Di seguito alcune catture di quello che risulta essere l'intero impianto.

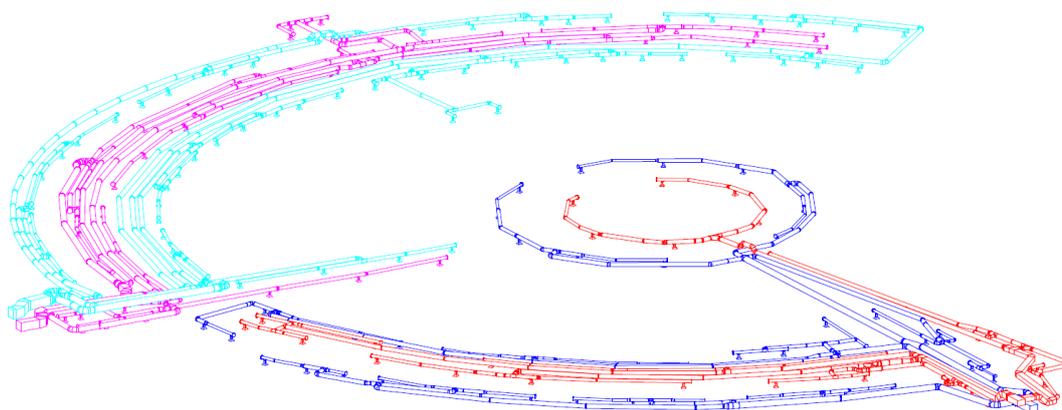


Figura 4.1 - Vista 3D degli impianti

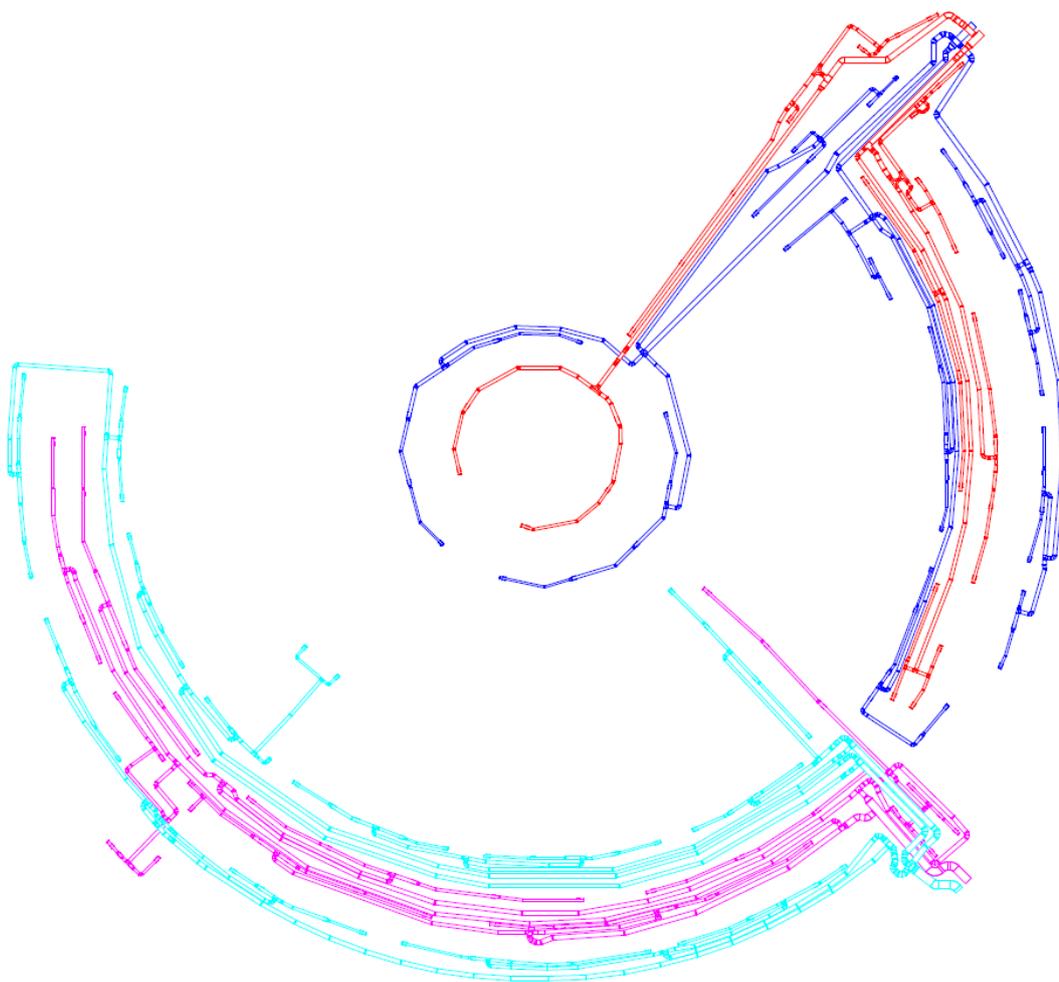


Figura 4.2 - Vista dall'alto degli impianti

Una volta realizzato l'intero sistema, come anticipato, Revit è in grado di generare automaticamente un report dettagliato dei calcoli eseguiti, basandosi sugli input forniti. In particolare, il software è in grado di evidenziare graficamente la rete più critica, mediante l'uso di frecce rappresentative: rosse per il ramo più sfavorito, blu per tutti gli altri rami.

Di seguito sono riportate due catture che mostrano il percorso più critico dell'impianto di ripresa relativo all'unità di trattamento dell'aria 1. È importante osservare il verso delle frecce, che indicano il flusso da valle verso monte, consentendo così di verificare la corretta impostazione della direzione del flusso. Nel caso della mandata, invece, il verso sarebbe opposto.

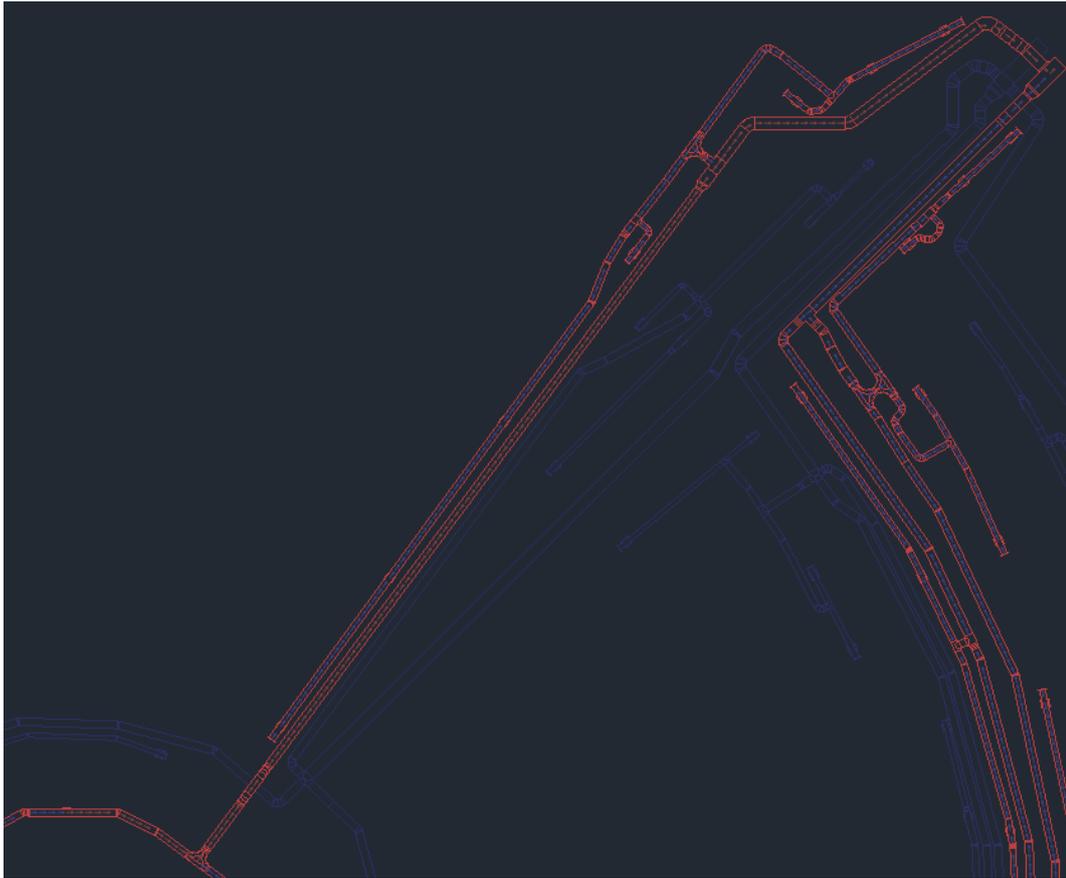


Figura 4.3 - Cattura da Revit del ramo più sfavorito per ritorno 1

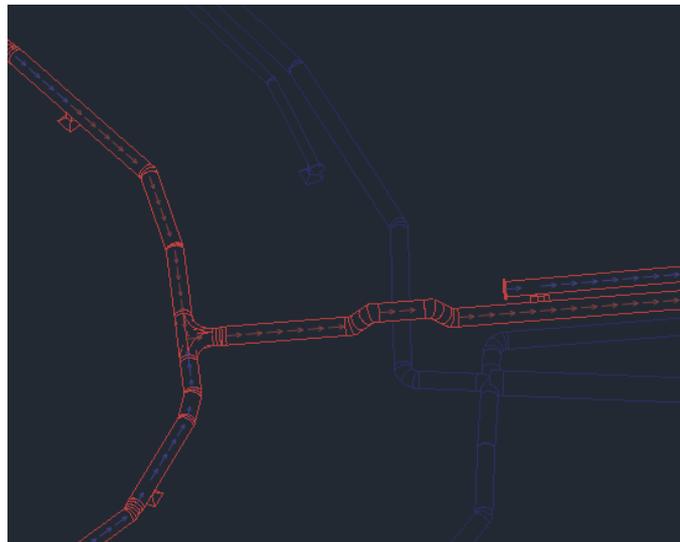


Figura 4.4 - Dettaglio della rete in prossimità della bocchetta più critica

In aggiunta, è possibile ottenere il report delle perdite di pressione selezionando un sistema alla volta. Affinché il report sia completo e utile per l'analisi, è

fondamentale selezionare accuratamente le grandezze desiderate, come diametri, lunghezze, velocità, pressioni statiche e dinamiche, nonché le perdite di carico. Revit consente inoltre di generare report specifici relativi ai singoli tratti rettilinei e alle specificità dell'impianto. Ciò offre un quadro più approfondito sul comportamento di ogni componente, facilitando la diagnosi di eventuali criticità o inefficienze.

Il metodo di lettura e interpretazione dei dati sarà illustrato nel paragrafo successivo, corredato da alcune schermate esemplificative del report generato.

4.3. Validazione del modello

La validazione del modello avviene attraverso il confronto del percorso più critico dell'impianto. Si confrontano quindi i risultati ottenuti con Revit e quelli ottenuti nel paragrafo precedente, in particolar modo le perdite di pressione.

Il report si presenta sotto forma di tabelle: "System Information", "Total Pressure Loss Calculations by Sections", "Detail Information of Straight Segment by Sections" e "Fitting and Accessory Loss Coefficient Summary by Sections".

La prima tabella contiene le informazioni relative al sistema, configurate direttamente dall'utente.

Tabella 4.2 - Informazioni sul sistema, report di Revit

System Information	
System Classification	Return Air
System Type	UTA 1 R
System Name	Mechanical UTA 1 R 1
Abbreviation	UTA 1 R

Di seguito, si ottiene quello che è l'elenco completo delle informazioni necessarie per il dimensionamento.

Sono state riportate solo le informazioni relative al tratto più sfavorito del ritorno 1, una scelta dettata dall'esigenza di semplificare la trattazione e alleggerire la presentazione a titolo di esempio.

Tabella 4.3 - Calcoli della perdita di pressione totale per sezioni, report di Revit

Total Pressure Loss Calculations by Sections										
Section	Element	Flow	Size	Velocity	Velocity Pressure	Length	Loss Coeff.	Friction	Total Pressure Loss	Section Pressure Loss
92	Duct	6000 m³/h	600x400	6.9 m/s	-	548	-	1.01 Pa/m	0.6 Pa	0.6 Pa
22	Duct	2600 m³/h	450x300	5.3 m/s	-	12370	-	0.88 Pa/m	10.9 Pa	19.7 Pa
	Fittings	2600 m³/h	-	5.3 m/s	17.2 Pa	-	0.5	-	8.8 Pa	
19	Fittings	1200 m³/h	-	5.4 m/s	282.0 Pa	-	0	-	6.5 Pa	6.5 Pa
20	Duct	1200 m³/h	300ø	5.4 m/s	-	29101	-	0.88 Pa/m	25.5 Pa	44.2 Pa
	Fittings	1200 m³/h	-	5.4 m/s	13.4 Pa	-	1.4	-	18.7 Pa	
21	Duct	1200 m³/h	300ø	5.4 m/s	-	530	-	0.22 Pa/m	0.1 Pa	0.1 Pa
	Fittings	1200 m³/h	-	5.4 m/s	3.7 Pa	-	0	-	0.0 Pa	
9	Duct	600 m³/h	280ø	2.7 m/s	-	4590	-	0.35 Pa/m	1.6 Pa	6.0 Pa
	Fittings	600 m³/h	-	2.7 m/s	4.4 Pa	-	1	-	4.4 Pa	
1	Duct	200 m³/h	200ø	1.7 m/s	-	130	-	4.68 Pa/m	0.6 Pa	19.6 Pa
	Fittings	200 m³/h	-	1.7 m/s	18.6 Pa	-	0	-	0.0 Pa	
	Air Terminal	200 m³/h	-	-	-	-	-	-	19.0 Pa	
Critical Path : 1-9-21-20-19-22-92 ; Total Pressure Loss : 96.7 Pa										

Analizzando sinteticamente le informazioni fornite dalla tabella, si osserva che:

- La prima colonna, denominata “Section”, contiene numeri che identificano l’indice assegnato da Revit a ciascun tratto. Ogni tratto è costituito da un insieme di segmenti rettilinei (“Duct”) e singolarità (“Fittings”) aventi la stessa portata e geometria.
- La colonna “Element” elenca le componenti prese in considerazione per il calcolo della perdita di carico, in particolare: segmenti rettilinei, giunzioni e terminali.
- Le colonne successive, di più immediata comprensione, riportano: la portata (“Flow”), la geometria (“Size”) e la velocità del flusso (“Velocity”).
- Segue la colonna dedicata alla pressione dinamica (“Velocity Pressure”), utilizzata da Revit per calcolare le perdite nelle giunzioni. Il valore riportato viene moltiplicato per il corrispondente coefficiente di perdita (“Loss Coefficient”, in funzione del tipo di singolarità) situato due colonne più avanti, ottenendo così il valore complessivo di perdita di carico.

- Le ultime due colonne contengono informazioni fondamentali per il calcolo: la lunghezza del tratto (“Length”) e la perdita di carico per unità di lunghezza (“Friction”). Il loro prodotto restituisce la perdita di pressione totale nei tratti rettilinei.
- Infine, l’ultima colonna mostra la perdita di pressione complessiva del tratto (“Section Pressure Loss”), somma delle perdite dovute sia alle singolarità sia all’attrito lungo le condotte.

In questo modo, si ottengono i risultati necessari per il confronto.

Le altre due tabelle riportano le stesse informazioni utili al calcolo, con l’aggiunta di un numero identificativo che consente di individuare sul software l’elemento specifico, inserendolo nell’apposita sezione di ricerca elemento.

Dal momento che si vuole avere la massima precisione nell’analisi delle perdite determinate nei due modi, essendoci una differenza tra le lunghezze dei tratti riportati nei capitoli 2 e 3 e quelle dei tratti realizzati in Revit, si uniformano i valori imponendo nei calcoli le lunghezze ottenute in quest’ultimo caso.

Il tratto, inoltre, presenterà una doppia denominazione: la prima relativa alla numerazione precedentemente dichiarata di nodo in ingresso-nodo in uscita, l’altra relativa alla numerazione effettuata in automatico da Revit per i tratti e le singolarità (come mostrato in colonna 1 della tabella 4.3).

Di seguito i risultati ottenuti.

Tabella 4.4 - Confronto tra i risultati ottenuti per la mandata 1

		MANDATA 1					
		REVIT		CALCOLO TRAD.		DELTA	
Tratto	L [m]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	\Delta v [m/s]	\Delta H _{i,TOT} [Pa]
10-20 (13)	1.8	6.50	1.50	6.55	8.97	0.05	7.47
20-30 (69,70)	19.5	5.80	31.90	5.81	24.95	0.01	6.95
30-110 (71,72)	23.8	5.00	38.30	5.08	30.86	0.08	7.44
110-120 (73)	4.8	3.10	4.20	3.12	4.21	0.02	0.01
120-140 (80)	1.1	2.50	0.50	2.57	1.91	0.07	1.41
140-146 (83,84)	3.8	2.10	3.60	2.18	2.69	0.08	0.91

Osservazioni:

- Le velocità differiscono esclusivamente per l'arrotondamento.
- I tratti con le maggiori differenze nelle perdite di pressione sono 10-20, 20-30 e 30-110. Il primo tratto presenta una differenza di circa 7 Pascal, probabilmente dovuta al fatto che, in ambiente Revit, il tratto è molto corto e privo di effettive perdite concentrate, che invece vengono ipotizzate e considerate nell'approssimazione del calcolo eseguito secondo normativa. Il secondo e il terzo tratto, analogamente al primo, mostrano una differenza di circa 7 Pascal, presumibilmente a causa di una maggiore precisione nella definizione delle singolarità lungo il tratto considerato in ambiente BIM.

Tabella 4.5 - Confronto tra i risultati ottenuti per la mandata 2

		MANDATA 2					
		REVIT		CALCOLO TRAD.		DELTA	
Tratto	L [m]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	\Delta v [m/s]	\Delta H _{i,TOT} [Pa]
10-20 (1,2)	2.9	7	24.9	6.99	10.6	0.01	14.3
20-200 (3)	9.4	6.4	21.3	6.48	16.74	0.08	4.56
200-210 (43)	84	6.3	140	6.36	140.16	0.06	0.16
210-270 (64)	0.74	3.2	31.2	3.24	32.49	0.04	1.29
270-290 (65,67)	1.4	2.5	1.3	2.53	1.97	0.03	0.67
290-296 (68,69)	3.1	2.4	2.8	2.48	3.37	0.08	0.57

Osservazioni:

- Le velocità coincidono salvo gli effetti dell'arrotondamento.
- Le perdite si discostano di poco fatta eccezione per il primo tratto, nel quale si ha il delta maggiore pari a 14 Pascal, dovuto presumibilmente a un discostamento tra l'approssimazione del calcolo e la maggior precisione nel definire le perdite dovute alle singolarità su Revit.

Tabella 4.6 - Confronto tra i risultati ottenuti per la ritorno 1

		RITORNO 1					
		REVIT		CALCOLO TRAD.		DELTA	
Tratto	L [m]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	\Delta v [m/s]	\Delta H _{i,TOT} [Pa]
10-20 (92)	0.6	6.9	0.6	6.94	9.44	0.04	8.84
20-190 (22)	12.4	5.3	19.7	5.35	17.69	0.05	2.01
190-260 (19,20,21)	29.3	5.4	50.8	5.41	45.52	0.01	13.38
260-290 (9)	4.6	2.7	6.0	2.71	3.12	0.01	2.88
290-295 (1)	0.1	1.7	5.6	1.77	5.75	0.07	0.15

Osservazioni:

- Le velocità coincidono a meno dell'arrotondamento.
- Vi sono due tratti in cui le perdite di pressione differiscono. Il primo è il tratto iniziale, 10-20, che presenta una differenza di poco meno di 9 Pascal, probabilmente dovuta al fatto che nel calcolo tradizionale viene considerata una lunghezza equivalente maggiore rispetto a quella reale. Questo è il risultato della semplificazione dell'approccio, che assume le perdite concentrate come "costanti" per unità di lunghezza. Nella rappresentazione su Revit, invece, il tratto risulta essere non solo molto corto, ma anche semplice, senza singolarità presunte che potrebbero aumentare il valore delle perdite concentrate. Il secondo tratto che presenta una differenza di pressione, la più significativa, è il tratto 20-190, con una variazione di circa 13 Pascal. Questa discrepanza può essere giustificata dalla maggiore complessità rappresentativa della rete, che prevede una deviazione in altezza nella zona dei corridoi del piano per consentire l'incrocio del sistema con l'impianto di mandata.

Tabella 4.7 - Confronto tra i risultati ottenuti per la ritorno 2

		RITORNO 2					
		REVIT		CALCOLO TRAD.		DELTA	
Tratto	L [m]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	v [m/s]	H _{i,TOT} [Pa]	\Delta v [m/s]	\Delta H _{i,TOT} [Pa]
10-20 (47,48)	9.8	6.6	14.1	6.55	14.07	0.05	0.03
20-250 (49,93)	57	6.2	79.5	6.17	79.76	0.03	0.26
250-300 (111)	17.2	5.4	36.1	5.41	28.82	0.01	7.28
300-330 (121,123)	2.6	2.7	1.8	2.71	2.41	0.01	0.61
330-340 (124,126)	6.6	2.8	4.2	2.82	5.09	0.02	0.89
340-346 (128,128)	4.6	1.8	2.1	1.77	1.82	0.03	0.28

Osservazioni:

- Le velocità risultano pressoché coincidenti.
- Le perdite di pressione sui singoli tratti risultano essere pressoché le stesse fatta eccezione per il tratto 250-300 il quale presenta un discostamento nei due metodi di circa 7 Pascal, probabilmente dovuto a una differenza nella presenza di discontinuità tra il modello lineare e quello tridimensionale.

Tabella 4.8 – Confronto tra le perdite di carico nei quattro impianti

IMPIANTO	Perdita di carico totale $\sum H_{i,TOT}$ [Pa]		
	REVIT	CALCOLO TRAD.	DELTA
Mandata UTA 1	80.00	73.59	6.41 (8.7%)
Mandata UTA 2	221.50	205.33	16.17 (7.9%)
Ritorno UTA 1	82.70	81.52	1.18 (1,4%)
Ritorno UTA 2	137.80	131.97	5.83 (4,4%)

Si può notare che, per tutti gli impianti, nonostante vi siano differenze di qualche Pascal tra un metodo e l'altro, esse rientrano in una deviazione percentuale inferiore al 10%.

Tali differenze possono essere dovute sia al diverso approccio fisico adottato da Revit, che implementa calcoli differenti rispetto a quelli utilizzati per il

dimensionamento in questa trattazione, sia ai limiti della macchina di calcolo, che risulta più rigida sia a livello computazionale che nell'analisi del sistema. Infatti, poiché analizza fedelmente ogni tratto e singolarità, una scarsa precisione nella realizzazione del sistema può portare a errori che non si verificano nel calcolo, dove tutto risulta più aderente al progetto concettuale. Una maggiore precisione nella progettazione garantisce sicuramente un risultato più attendibile.

Si osserva comunque che i calcoli eseguiti con Revit determinano una pressione richiesta al ventilatore lievemente superiore, il che non rappresenta necessariamente un problema. Il calcolo basato sulla normativa, infatti, è di per sé affidabile per il dimensionamento e, restituendo valori leggermente inferiori, consente di affermare che il metodo di Revit tende a sovrastimare il risultato di qualche punto percentuale. Questo comporta un lieve sovradimensionamento del sistema che, nella progettazione ingegneristica, si traduce in un maggiore margine di sicurezza. Un ventilatore più performante garantisce infatti il corretto funzionamento dell'intero impianto, a differenza di un possibile sottodimensionamento che potrebbe comprometterne l'efficacia.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la progettazione di una rete di canalizzazione dell'aria per la zona uffici di un edificio industriale, adottando inizialmente un approccio tradizionale basato sia sul dimensionamento manuale secondo normativa sia sull'implementazione del sistema in ambiente BIM, tramite l'uso del software Autodesk Revit.

Il primo passo per il dimensionamento dell'impianto è stato determinare le portate d'aria di ricambio necessarie, facendo riferimento alle normative UNI 10339 e UNI 16798. Successivamente, si è proceduto alla definizione del layout della rete di mandata e ritorno, individuando la posizione dei terminali e sviluppando l'intera rete di canalizzazione.

In seguito, sono stati ricavati tutti i parametri chiave del dimensionamento impiantistico: le portate in gioco, la geometria delle condotte, la velocità del fluido e le perdite di carico. Il calcolo è stato effettuato con un approccio iterativo, volto a garantire il bilanciamento della rete e l'ottimizzazione delle condizioni di distribuzione dell'aria nei vari ambienti.

I risultati ottenuti hanno permesso il predimensionamento degli impianti e sono ritenuti attendibili, in quanto derivano da normative consolidate e sono validati da anni di applicazione nel settore. La successiva implementazione del sistema su Autodesk Revit ha consentito di ottenere una modellazione tridimensionale accurata, facilitando la visualizzazione realistica della rete e migliorando la gestione delle interferenze tra i vari impianti.

Inoltre, la possibilità di generare report automatici ha permesso l'estrapolazione immediata dei parametri chiave precedentemente valutati, come velocità e perdite di pressione. L'analisi comparativa tra i due approcci ha evidenziato come l'utilizzo del BIM consenta una maggiore rapidità di elaborazione e una riduzione degli errori dovuti all'inserimento manuale dei dati, pur richiedendo una fase iniziale di setup più onerosa.

Altro aspetto da evidenziare è relativo al fatto che il software permetta un ricalcolo automatico ogni volta che si verifica una modifica topografica della rete. Questo processo avviene in modo rapido e preciso, a seguito di qualsiasi intervento che alteri la rete, come interferenze con altri impianti o strutture, modifiche del layout architettonico.

Un limite riscontrato è la necessità di un'elevata precisione nella realizzazione della

rete su Revit, che, elaborando le informazioni in modo rigoroso, risulta più sensibile a eventuali imprecisioni nello schema.

Il confronto dei risultati con quelli del calcolo manuale ha permesso di validare l'accuratezza dei dati generati dal software, confermandone l'affidabilità.

In aggiunta, il BIM consente di associare direttamente agli elementi virtuali della rete i valori economici relativi al computo metrico estimativo. In questo modo, non solo è possibile ottenere una valutazione dei costi basata sul computo metrico tradizionale, ma anche monitorare l'evoluzione dinamica dei costi, che si adattano automaticamente alle modifiche nei tracciati e nei dimensionamenti, come ad esempio le modifiche dovute a interferenze o cambiamenti progettuali.

Un ulteriore vantaggio offerto dal metodo BIM è la possibilità di attribuire agli oggetti del modello – e quindi anche ai componenti della rete impiantistica – parametri specifici che permettono di definire la tempistica di realizzazione di ciascun elemento all'interno del cronoprogramma generale di cantiere. Questo approccio, basato sulla metodologia WBS (Work Breakdown Structure, struttura di scomposizione del lavoro), consente di integrare la progettazione tecnica con la pianificazione temporale ed esecutiva, migliorando il controllo dell'avanzamento lavori e l'efficienza operativa.

L'utilizzo del BIM non solo garantisce un controllo avanzato sugli aspetti tecnici del progetto, validati attraverso questa analisi, ma offre anche strumenti efficaci per la gestione economica e organizzativa del cantiere. Grazie alla possibilità di integrare dati tecnici, temporali e gestionali all'interno di un'unica piattaforma software, il BIM si conferma una risorsa fondamentale per ottimizzare il processo edilizio, dalla fase di progettazione fino alla realizzazione e manutenzione dell'opera.

In conclusione, l'integrazione tra dimensionamento tradizionale e modellazione BIM si rivela particolarmente utile per studi di progettazione e aziende che operano nel settore HVAC, permettendo di ridurre i margini di errore, migliorare la gestione delle risorse e velocizzare le fasi di sviluppo dei progetti.

Per quanto riguarda le prospettive future, ulteriori studi potrebbero approfondire l'integrazione del BIM con strumenti di simulazione fluidodinamica (CFD) per valutare con maggiore precisione la distribuzione dell'aria e l'efficienza degli impianti in diverse condizioni operative.

Infine, l'implementazione di algoritmi di ottimizzazione automatica per la progettazione delle reti di canalizzazione potrebbe portare a soluzioni ancora più efficienti, sia in termini di prestazioni energetiche che di riduzione dei costi.

III. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. <https://www.argotecgroup.com/spacepark/spacepark-hub>
2. UNI 10339, GIUGNO 1995, “*Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*” (Ritirata 2024).
3. UNI EN 16798-1, GIUGNO 2019, “*Prestazione energetica degli edifici- Ventilazione per gli edifici – Parte 1: Parametri di ingresso dell’ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell’aria interna, all’ambiente termico, all’illuminazione e all’acustica – Modulo M1-6*”.
4. Masoero, Marco Carlo. 2022/2023. *Dispense del corso di Impianti termotecnici e refrigerazione industriale*. Politecnico di Torino.
5. Metodologie di calcolo, documento interno fornito dall’ingegnere Origlia Fabrizio.
6. AERMEC. Catalogo prodotti – *Travi fredde attive, modello EHT*.
7. SCHAKO. Catalogo prodotti – *Bocchetta di ventilazione con serranda a scorrimento, modello IB-R*. Recuperato da: <https://schako.com/it/schako-product-category/lueftungsgitter-lueftungsgitter/>