



## **PREMESSA**

A seguito di verifica dei documenti redatti e validati nella fase progettuale precedente (PFTE) e sulla base del nuovo progetto esecutivo, non essendovi cambiamenti sostanziali negli elementi oggetto dello studio, si condivide quanto esposto nella seguente relazione.

DIREZIONE OPERE PUBBLICHE

|  |               |   |  |   |      |        |       |
|--|---------------|---|--|---|------|--------|-------|
| COMMITTENTE  |               | COMUNE  |  |   |      |        |       |
| SCR Piemonte   |               | Città di TORINO   |  |   |      |        |       |
| LIVELLO PROGETTUALE  |               |   |  |   |      |        |       |
| PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA  |               |   |  |   |      |        |       |
| CUP  |               | TITOLO INTERVENTO   |  |   |      |        |       |
| C14E21001220001  |               | TORINO, IL SUO PARCO, IL SUO FIUME: MEMORIA E FUTURO"                     |  |   |      |        |       |
| CODICE OPERA   |               | REALIZZAZIONE DELLA BIBLIOTECA CIVICA E RIQUALIFICAZIONE DEL TEATRO NUOVO |  |   |      |        |       |
| 22044D02   |               | PROGETTO DI RIQUALIFICAZIONE DEL TEATRO NUOVO                             |  |   |      |        |       |
| ELABORATO N.   |               | TITOLO ELABORATO  |  |   |      |        |       |
| 001  |               | Relazione sul comfort dell'ambiente interno                               |  |   |      |        |       |
| DATA   |               | SCALA   |  | AREA PROGETTUALE  |      |        |       |
| Maggio 2024  |               | -   |  | QUALITA' DELL'AMBIENTE INTERNO  |      |        |       |
| FORMATO DI STAMPA  |               | CODICE GENERALE ELABORATO   |  | NOME FILE   |      |        |       |
| A4   |               | 22044D02_3_0_P_QI_00_CZ_001_2   |  | 22044D02_3_0_P_QI_00_CZ_001_2_Comfort ambiente interno.dwg  |      |        |       |
| VERSIONE   | DATA          | DESCRIZIONE   |  |   | DIS. | CONTR. | APPR. |
| 0  | Novembre 2023 | Stato di Avanzamento del Progetto al 31.10.2023                           |  |   | BNV  | BNF    | CGG   |
| 1  | Dicembre 2023 | Emissione PFTE per approvazione   |  |   | BNV  | BNF    | CGG   |
| 2  | Maggio 2024   | Recepimento Pareri PFTE   |  |   | BNV  | BNF    | CGG   |
|  |               |   |  |   |      |        |       |
| RTP PROGETTAZIONE  |               |   |  | TIMBRI - FIRME  |      |        |       |
| <p>RAFAEL MONEO <b>Arch. Rafael Moneo</b> (mandante)<br/>Calle Cinca 5 - 28002 Madrid (Spagna)</p> <p><b>ISOLARCHITETTI S.r.l.</b> (mandante)<br/>Via Mazzini, 33 - 10123 Torino</p> <p><b>ICIS S.r.l.</b> (mandataria)<br/>Corso Einaudi, 8 - 10128 Torino</p> <p><b>Ing. Quirico</b> <b>Ing. Giambattista Quirico</b> (mandante)<br/>Corso Giovanni Lanza, 58 - 10131 Torino</p> <p><b>MCM Ingegneria</b> (mandante)<br/>Via Maria Vittoria 18, 10123 Torino</p> <p><b>onleco Srl</b> (mandante)<br/>Via Pigafetta, 3 - 10129 Torino</p> <p><u>Arch. Elisabetta FABBRI</u> per le funzioni teatrali</p> <p><u>Ing. Silvano COVA &amp; Partners</u> per la macchina scenica</p> <p><u>Ing. Raffaele PISANI</u> per l'acustica teatrale</p> <p><u>Prof.ssa Michela COMBA</u> per la ricerca storica</p> <p><u>Arch. Giulia VIALE</u></p> |               |   |  | <p>Direttore Tecnico<br/><b>Ing. Giuseppe Bonfante (ONLECO Srl)</b><br/><b>Professionista</b><br/><b>Ing. Giuseppe Bonfante</b><br/><b>Dott.ssa Chiara Bonvicini</b><br/><b>Ing. Maurizio Fresia (ONLECO Srl)</b></p> <p>Integrazione prestazioni specialistiche:<br/><b>Ing. Luciano Luciani (ICIS Srl)</b><br/><b>Ing. Giuseppe Donna (ICIS Srl)</b><br/><b>Ing. Adolfo Coggiola (ICIS Srl)</b></p> |      |        |       |
| ORGANISMO DI CONTROLLO   |               |   |  | SCR PIEMONTE S.p.A.   |      |        |       |
| SCR PIEMONTE S.p.A.: <b>Arch. Sergio Manto (RUP)</b>   |               |   |  | Responsabile del Procedimento: <b>Arch. Sergio Manto</b>  |      |        |       |

## Sommario

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | PREMESSA .....   | 2  |
| 2     | DESCRIZIONE DEL PROGETTO .....   | 3  |
| 3     | ILLUMINAMENTO NATURALE.....  | 8  |
| 3.1   | Metriche utilizzate e valori di riferimento.....                                       | 8  |
| 3.1.1 | Legislazione e normativa tecnica .....   | 8  |
| 3.1.2 | Metriche dinamiche.....  | 9  |
| 3.2   | Individuazione degli ambienti oggetto di verifica.....                                 | 10 |
| 3.3   | Software di simulazione .....  | 11 |
| 3.3.1 | Modello 3D.....  | 11 |
| 3.3.2 | Modellazione della variazione dinamica del contesto climatico nel corso dell'anno..... | 11 |
| 3.3.3 | Griglia dei punti di misura.....   | 11 |
| 3.3.4 | Materiali .....  | 12 |
| 3.3.5 | Parametri di simulazione .....   | 12 |
| 3.3.6 | Profilo di utilizzo.....   | 12 |
| 3.4   | Risultati dei calcoli.....   | 13 |
| 3.5   | Conclusioni.....   | 19 |
| 4     | COMFORT TERMO-IGROMETRICO.....   | 20 |
| 4.1   | Metriche utilizzate e valori di riferimento.....                                       | 20 |
| 4.2   | Individuazione degli ambienti oggetto di verifica.....                                 | 22 |
| 4.3   | Software di simulazione .....  | 23 |
| 4.3.1 | DesignBuilder.....   | 23 |
| 4.3.2 | Vento AEC .....  | 23 |
| 4.3.3 | Definizione delle condizioni al contorno.....  | 23 |
| 4.4   | Risultati dei calcoli: software DesignBuilder.....                                     | 28 |
| 4.4.1 | AMBIENTE A: Piano primo – Ridotto 01-01.....   | 28 |
| 4.4.2 | AMBIENTE B: Piano primo – Ridotto 01-04.....   | 30 |
| 4.4.3 | AMBIENTE C: Piano primo – Sala prove 01-18.....  | 32 |
| 4.4.4 | AMBIENTE D: Piano primo – Uffici 01-22,01-23,01-24 .....                               | 34 |
| 4.5   | Discomfort locale .....  | 37 |
| 4.6   | Risultati dei calcoli: software Vento AEC .....  | 39 |
| 4.6.1 | AMBIENTE E: piano terreno e primo – Sala principale.....                               | 39 |
| 4.6.2 | Risultati della <i>Simulazione generale</i> .....                                      | 41 |
| 4.6.3 | Risultati della <i>Simulazione di dettaglio</i> .....                                  | 47 |
| 4.6.4 | Ulteriori indicazioni relative alla <i>Sala principale</i> .....                       | 51 |
| 4.7   | Conclusioni.....   | 52 |

# 1 PREMESSA

La presente relazione tratta dei temi del comfort dell'ambiente interno riferiti alla porzione del complesso *TORINO ESPOSIZIONI* destinata ad ospitare il *Teatro Nuovo di Torino*.

Tali valutazioni hanno una duplice utilità, in quanto oltre a permettere di valutare i livelli di comfort che caratterizzeranno l'edificio a seguito dell'intervento di riqualificazione, permettono di verificare il rispetto dei requisiti prestazionali introdotti dalla normativa nazionale.

In merito si specifica infatti come l'edificio in esame, essendo di proprietà pubblica, ricada nel campo d'azione del Decreto 23 giugno 2022 - Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi. Con riferimento a tale Decreto sono stati analizzati i seguenti requisiti di comfort abitativo:

- **2.4.7 Illuminamento naturale:** nei progetti di ristrutturazione edilizia nonché di restauro e risanamento conservativo, all'interno dei locali regolarmente occupati il decreto richiede che il valore del fattore medio di luce diurna (FLDm) risulti maggiore del 2%. Essendo l'edificio in esame sottoposto a tutela dei beni architettonici dal *Decreto Legislativo 42/2004*, sarebbe possibile prevedere una deroga al rispetto del requisito sopra riportato nel caso in cui il suo rispetto non sia compatibile con i doveri di tutela e conservazione del bene storico definiti dal Decreto. A livello nazionale, è previsto inoltre il raggiungimento di un valore pari all'1% per i locali destinati ad uso ufficio dal *Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975* e *Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 22 novembre 1974, n.13011*;
- **2.4.11 Prestazioni e comfort acustico:** risulta necessario che:
  - o i valori prestazionali dei requisiti acustici passivi dei singoli elementi tecnici dell'edificio, partizioni orizzontali e verticali, facciate, impianti tecnici, definiti dalla norma UNI 11367 corrispondono almeno a quelli della classe II del prospetto 1 di tale norma;
  - o Gli ambienti interni rispettano i valori indicati nell'appendice C della UNI 11367;
- **2.4.6 Benessere termico:** le condizioni di comfort interne devono essere conformi almeno alla *classe B* secondo la norma *UNI EN ISO 7730:2006* in termini di *PMV* (Voto medio previsto) e di *PPD* (Percentuale prevista di insoddisfatti).

All'interno del presente elaborato in particolare si riportano i risultati delle analisi svolte per la verifica dei requisiti di comfort termo-igrometrico e di quelli connessi all'illuminazione naturale caratterizzanti l'edificio, mentre per quanto attiene il comfort acustico si rimanda alla relazione specifica *22044D02\_3\_0\_P\_AC\_00\_CZ\_002\_0\_Requisiti acustici passivi*.

Prima di procedere oltre nella trattazione dei temi sopracitati, si evidenzia nuovamente come l'edificio in esame ricada nell'ambito della disciplina della parte seconda e dell'articolo 136, comma 1, lettere b) e c), del *D.lgs. 22 gennaio 2004, n. 42*, recante il *Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio*. Tale vincolo sostanzialmente impedisce la realizzazione di quegli interventi che andrebbero a compromettere il carattere storico e architettonico del fabbricato, permettendo inoltre in alcuni casi di derogare la verifica dei valori prestazionali richiesti dalla normativa vigente (cfr. quanto sopra indicato per la verifica del FLDm).

L'Appaltatore con la sua offerta assume l'impegno a rispettare le prestazioni di cui al presente elaborato, tenendo in considerazione tutte le indicazioni e i vincoli contenuti nel progetto a base di gara. Le attività conseguenti sono parte integrante della prestazione di progettazione esecutiva e di esecuzione dei lavori e come tali **sono da intendersi comprese nel prezzo contrattuale**.

## 2 DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il progetto consiste nella riqualificazione di una parte degli edifici che costituiscono il *Complesso di Torino Esposizioni*. L'intervento in seguito descritto si propone come operazione rigeneratrice di straordinaria importanza e riguarda i padiglioni ospitanti il *Teatro Nuovo di Torino*. In Figura 1 si riporta una vista aerea del complesso, con indicazione, in rosso della porzione oggetto di intervento.

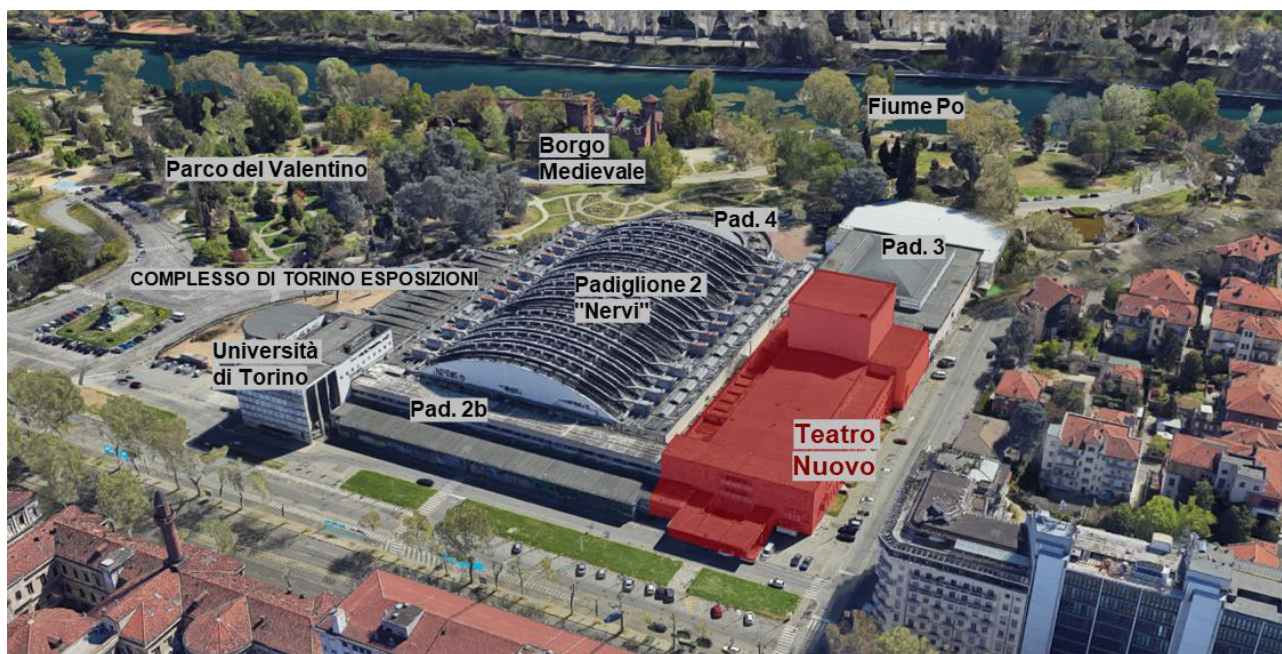


Figura 1– Vista aerea del Complesso con indicazione, in rosso, degli edifici oggetto di intervento.

Come anticipato in premessa, il padiglione riqualificato sarà destinato ad ospitare il *Teatro Nuovo*, il quale presenterà al suo interno locali con le seguenti destinazioni d'uso:

- *Sala principale*: ambiente principale della struttura, costituito dalla platea/galleria in cui sono collocate 1.055 sedure per il pubblico e dal palco, ove è collocata inoltre la torre scenica. Tali ambienti si sviluppano prevalentemente al piano terreno e sono dotati di altezze interne elevate. Alle superfici dello stato di fatto ne verranno aggiunte di nuove ipogee, ottenute scavando un nuovo piano interrato, le quali ospiteranno l'orchestra (condizione che avverrà solo per lo svolgimento di particolari tipologie di spettacolo);
- *Sale conferenze* (denominate *Ridotto 01-01* e *Ridotto 01-04*), localizzate al piano primo e caratterizzate cadauna da una capienza pari a 149 posti a sedere;
- Locali a destinazione d'uso *ufficio*, a servizio del personale della struttura;
- *Sala prove 01-18*, collocata al piano primo sul lato settentrionale dell'edificio, ove sarà possibile effettuare delle esercitazioni connesse all'attività teatrale;
- *Ambienti distributivi, servizi igienici e camerini*, caratterizzati da un'occupazione non continuativa da parte dei fruitori della struttura e del personale (ambienti esclusi pertanto dalle verifiche ivi riportate).

In Figura 2 e Figura 3 si riportano le viste assonometriche dell'edificio oggetto di intervento, con la distribuzione delle funzioni previste a progetto ai diversi piani.

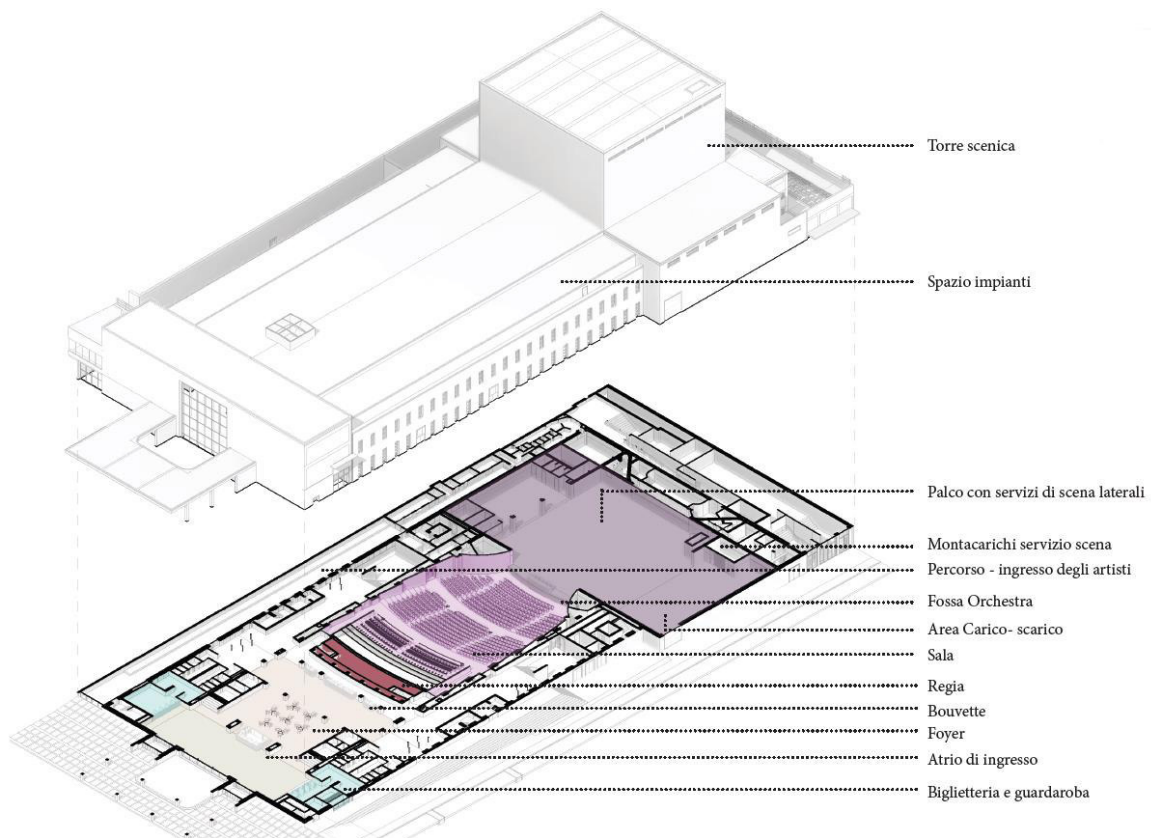


Figura 2– Stato di progetto: piano terra - assonometria delle funzioni

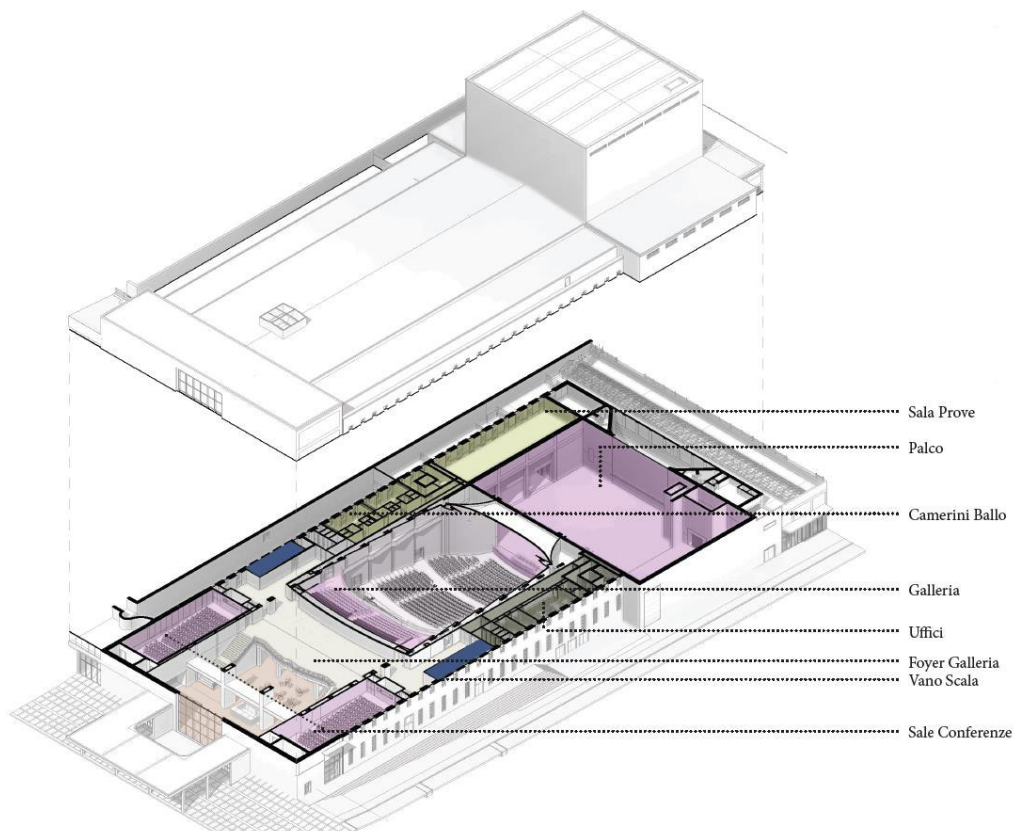
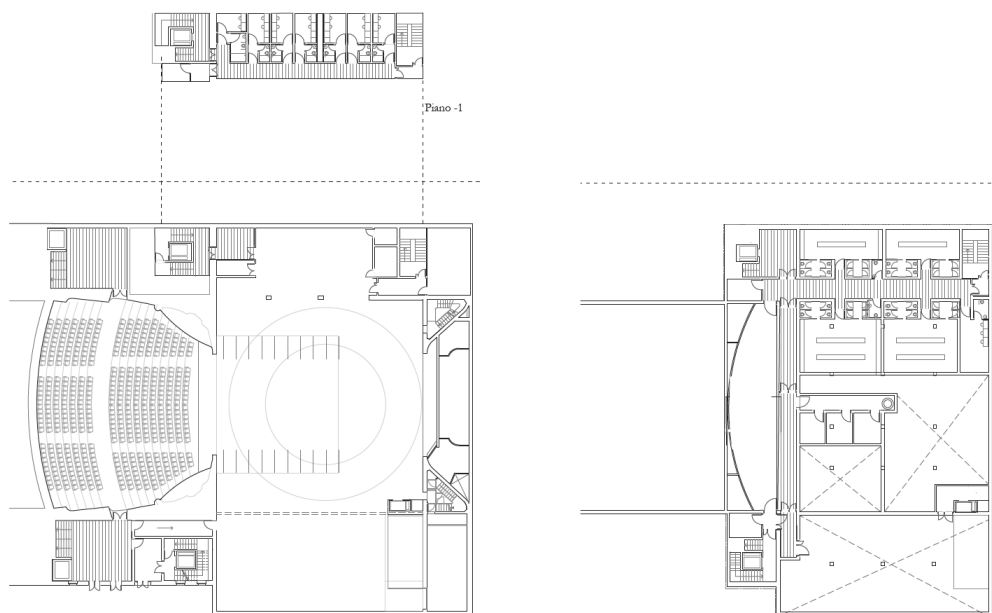
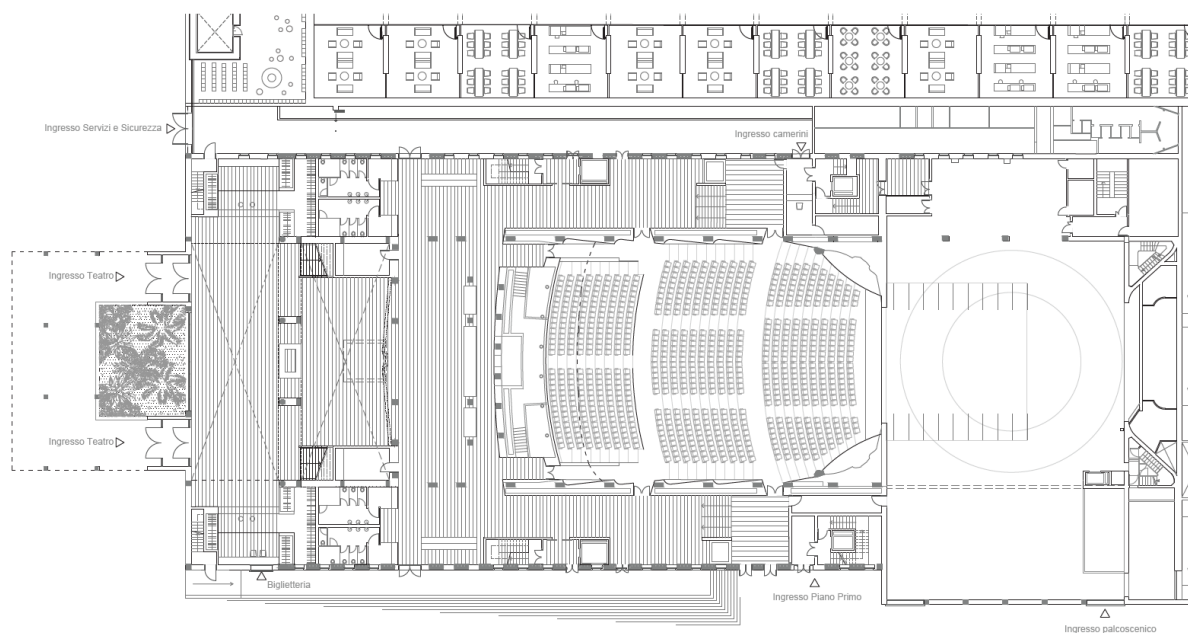


Figura 3– Stato di progetto: piano primo - assonometria delle funzioni

Per permettere una maggior comprensione dei volumi in gioco, in Figura 4, Figura 5 e Figura 6 si riportano le piante dei piani interrati, terra e primo dell'edificio oggetto di intervento, mentre in Figura 7 e Figura 8 si riportano alcune sezioni significative. In Figura 9 e Figura 10 si riportano alcune viste renderizzate degli ambienti interni in progetto. Per gli elaborati completi e in scala si rimanda alle tavole architettoniche.



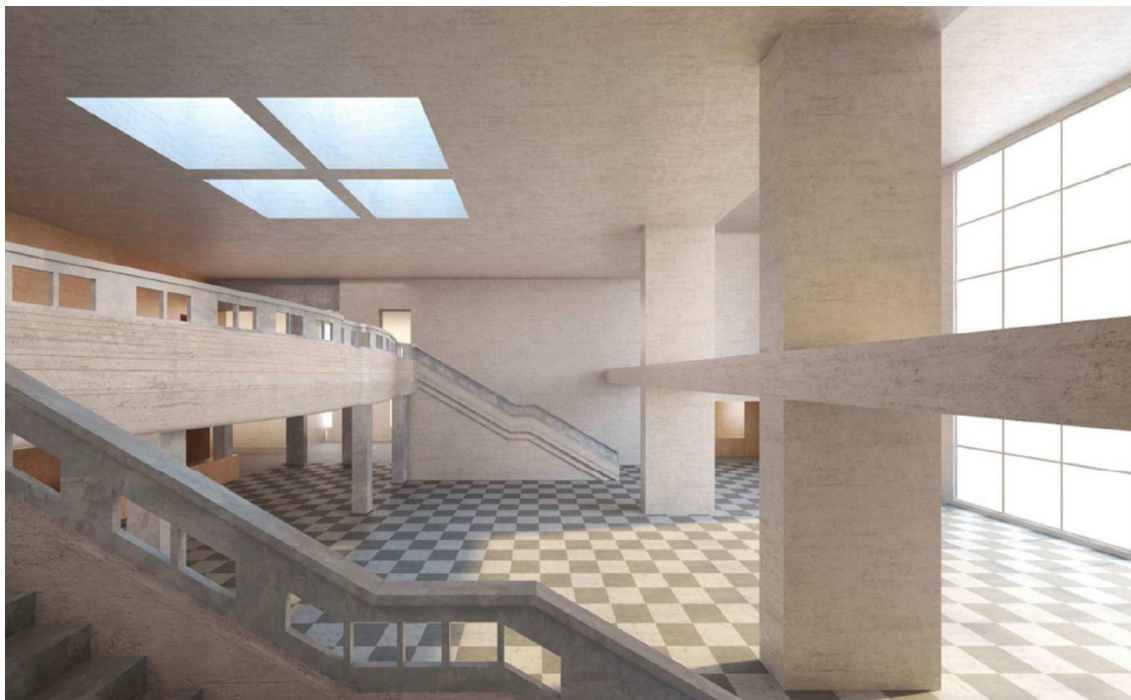
*Figura 4– Stato di progetto. Pianta piano interrato.*



*Figura 5– Stato di progetto. Pianta piano terra.*







*Figura 9– Stato di progetto. Vista degli ambienti interni.*



*Figura 10– Stato di progetto. Vista degli ambienti interni.*

## 3 ILLUMINAMENTO NATURALE

### 3.1 Metriche utilizzate e valori di riferimento

#### 3.1.1 Legislazione e normativa tecnica

Il presente capitolo descrive le analisi della disponibilità di illuminazione naturale (*daylighting*) attraverso la metrica del **fattore di luce diurna medio (FLDm)**.

A livello nazionale, tale parametro è stato introdotto per la prima volta dal *Decreto Ministeriale Sanità 5 luglio 1975* relativamente ai locali di abitazione ed è definibile come il rapporto, espresso in percentuale, tra l'illuminamento medio dell'ambiente dovuto alla sola illuminazione naturale e l'illuminamento che si ha nello stesso istante su una superficie orizzontale esterna non ostruita esposta alla volta celeste con cielo coperto (escludendo la componente solare diretta).

Come accennato nei paragrafi precedenti, l'edificio in esame ospiterà prevalentemente gli ambienti a servizio del *Teatro Nuovo di Torino*. Per tale destinazione d'uso (teatro), non è disponibile un decreto specifico a livello nazionale contenente dei requisiti per l'illuminamento naturale.

Oltre a quanto sopra riportato, si segnala che essendo un edificio pubblico, sono validi anche i requisiti introdotti dal decreto legislativo sui *CAM (Criteri Ambientali Minimi): Decreto 23 giugno 2022 - Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi.*

Secondo tale decreto, normalmente nei locali regolarmente occupati deve essere garantito un *fattore medio di luce diurna* maggiore del 2%, ma, essendo l'edificio sottoposto a tutela secondo *D.lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, recante il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio*, vi è la possibilità di derogare tale criterio, qualora il suo rispetto comportasse l'esecuzione di opere in contrasto con la conservazione del bene.

A livello nazionale, è previsto inoltre il raggiungimento di un valore pari all'1% per i locali destinati ad uso ufficio dal *Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975* e *Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 22 novembre 1974, n.13011*.

In merito al caso in esame, si specifica inoltre che:

- la *Sala principale* è adibita ad ospitare spettacoli teatrali (spettacoli di prosa, musicali, operetta ed eventi di danza);
- le due sale ridotte localizzate al piano primo (*Ridotto 01-01* e *Ridotto 01-04*), possono anch'esse ospitare delle rappresentazioni o delle proiezioni cinematografiche.

Per tali funzioni, l'illuminazione della scena e degli ambienti riveste un ruolo centrale nella rappresentazione ed è sempre artificiale. Non sono infatti richiesti normalmente dei particolari livelli di illuminamento per l'esecuzione di compiti visivi per il pubblico, ma la luce è sempre funzionale allo spettacolo rappresentato in quel momento (si pensi ad esempio alle proiezioni cinematografiche, in cui la possibile presenza di luce naturale andrebbe ad intaccare la resa della proiezione stessa).

Oltre a ciò, si evidenzia come:

- per la *Sala principale* non sono presenti al momento delle aperture dirette verso l'esterno;
- per le due sale ridotte (*Ridotto 01-01* e *Ridotto 01-04*) sono presenti rispettivamente 3 e 5 serramenti affacciati verso l'esterno, tutti di dimensioni contenute e analoghe a quelle degli altri elementi di facciata.

La realizzazione di nuove aperture non è stata presa in considerazione in quanto andrebbe a modificare sensibilmente le facciate del fabbricato, variando l'immagine e i caratteri storico-architettonici dell'edificio stesso.

Per le ragioni sopra riportate, non si sono effettuate delle simulazioni atte alla verifica dei parametri illuminotecnici connessi alla luce naturale per la *Sala principale*, mentre per le due sale ridotte (*Ridotto 01-01* e *Ridotto 01-04*), sebbene si riportino i risultati dei calcoli effettuati, questi hanno solo valore indicativo circa le condizioni di illuminazione presenti negli ambienti.

Per gli altri locali, caratterizzati da un'occupazione più continua e che possono necessitare di illuminazione naturale per lo svolgimento di compiti visivi (uffici e sala prove), si sono invece svolte le simulazioni descritte a seguire.

### 3.1.2 Metriche dinamiche

Considerando che il concetto di *fattore di luce diurna medio* fa riferimento al caso (peggiorativo) di una condizione di cielo coperto, si è ritenuto opportuno condurre ulteriori analisi di *daylighting* utilizzando metriche cosiddette 'dinamiche'. Queste metriche fanno riferimento ad un'analisi annuale che tiene conto del clima specifico della città di progetto, pertanto considerando il comportamento dinamico della luce naturale nel corso dell'anno (alternanza di cieli sereni, intermedi, coperti; posizione del sole; etc.).

Le metriche usate fanno riferimento al seguente documento:

*IES Daylight Metrics Committee. IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). Daylight Metrics Committee. Approved Method IES LM-83-12. Illuminating Engineering Society of North America, 2012.*

Tale documento rappresenta il riferimento scientifico in cui sono stati definiti i concetti di '*spatial Daylight Autonomy sDA*' e '*Annual Sunlight Exposure ASE*', successivamente implementati nel protocollo *LEED*. Il documento IES fornisce anche i valori di riferimento per l'accettazione di uno spazio in termini di *daylighting* e numerose indicazioni sullo svolgimento delle analisi illuminotecniche tramite simulazione dinamica e sui relativi settaggi (come, ad esempio, i parametri di simulazione, le proprietà dei materiali da usare per le tende mobili e così via).

Le analisi di *daylighting* richieste dal protocollo *LEED v4.1* sopra richiamato contemplano la verifica simultanea dei seguenti due requisiti:

- ***spatial Daylight Autonomy sDA<sub>300,50%</sub>***: è la frazione di spazio dell'ambiente considerato in cui il valore della *Daylight Autonomy (DA)*, calcolato per un illuminamento di 300 lux, è pari o superiore al 50%. La *DA* è definita come percentuale (frequenza) di ore durante il profilo di utilizzo in cui l'illuminamento dovuto alla sola luce naturale risulta superiore al target di 300 lux.  
 Per il soddisfacimento del requisito *LEED*, la *sDA<sub>300,50%</sub>* deve risultare superiore al 40% (vale a dire che il 40% dello spazio di un ambiente deve avere un valore di *DA* > 300 lux per almeno il 50% delle ore di utilizzo dello spazio stesso).  
 Il profilo di occupazione da considerarsi va dalle 8 alle 18, tutti i giorni dell'anno (per un totale di 3650 ore/anno);
- ***Annual Sunlight Exposure ASE<sub>1000,250</sub>***: è la frazione di spazio dell'ambiente considerato in cui l'illuminamento diretto dovuto al sole supera 1000 lux per più di 250 ore nel corso dell'anno.  
 L'*ASE<sub>1000,250</sub>* per definizione deve essere calcolata considerando le proprietà di trasmissione luminosa dei vetri, ma escludendo le tende mobili e ogni riflessione, sia all'esterno, sia all'interno dell'ambiente da verificare.  
 Per il soddisfacimento del requisito *LEED*, nella precedente versione del protocollo *LEED (v4)*, veniva richiesto che la *ASE<sub>1000,250</sub>* risultasse inferiore al 10% (il che significa che meno del 10% dello spazio di un ambiente deve avere un valore di *ASE* > 1000 lux per oltre 250 ore all'interno del profilo di occupazione nel corso dell'anno). La nuova versione del protocollo *LEED (v4.1)* ha modificato questo requisito, rendendolo meno restrittivo, richiedendo di identificare, per tutti gli spazi regolarmente occupati in cui si ottenga una *ASE<sub>1000,250</sub>* > 10%, quali strategie siano previste per controllare il potenziale abbagliamento derivante dall'ingresso della radiazione solare diretta entrante in ambiente.

### 3.2 Individuazione degli ambienti oggetto di verifica

L'immagine e la tabella riportate a seguire permettono l'identificazione degli ambienti oggetto di studio, con indicazione della tipologia di utilizzo.

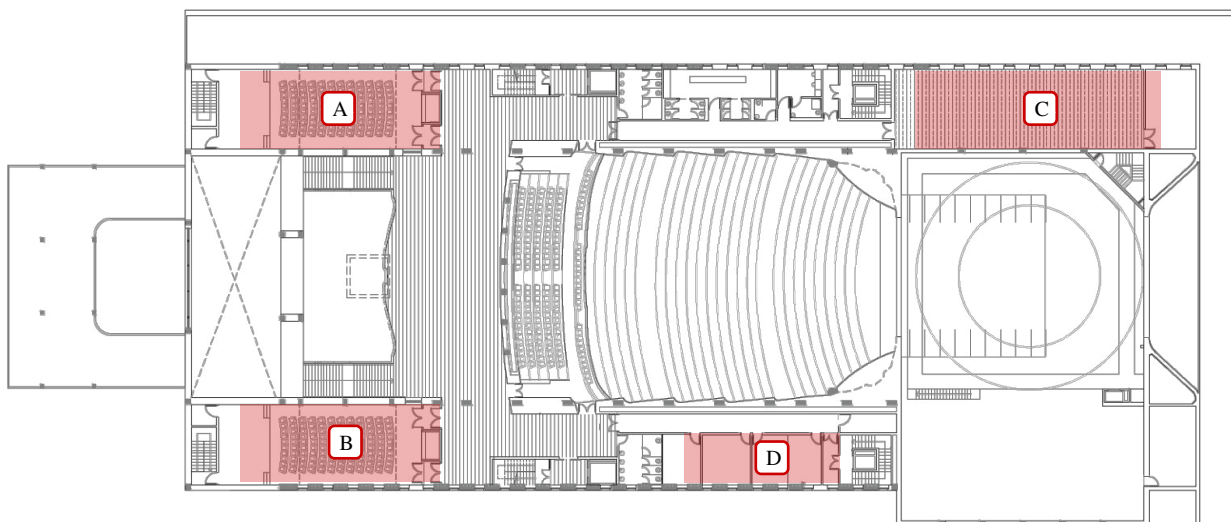


Figura 11 – Stato di progetto. Pianta piano primo.

Tabella 1 – Definizione delle zone oggetto di calcolo

| IDENTIFICAZIONE AMBIENTE | DENOMINAZIONE AMBIENTE                          | TIPOLOGIA DI UTILIZZO        |
|--------------------------|---|------------------------------|
| A                        | RIDOTTO 01-01                                   | SALA CONFERENZE E SPETTACOLO |
| B                        | RIDOTTO 01-04                                   | SALA CONFERENZE E SPETTACOLO |
| C                        | SALA PROVE 01-18                                | SALA PROVE                   |
| D                        | UFFICIO 01-22<br>UFFICIO 01-23<br>UFFICIO 01-24 | UFFICI DEL PERSONALE         |

### 3.3 Software di simulazione

Le simulazioni dinamiche per il calcolo di *daylighting* e la verifica di rispondenza rispetto ai requisiti normativi sono state effettuate usando il software *DesignBuilder*, il quale utilizza la simulazione annuale delle condizioni di *daylighting*, l'algoritmo di calcolo *Radiance*: questo algoritmo è considerato come l'algoritmo di riferimento, validato nell'ambito della comunità scientifica internazionale.

Il dettaglio delle informazioni e delle impostazioni assunte per le simulazioni dinamiche sono riportati nelle sezioni seguenti.

#### 3.3.1 Modello 3D

I singoli ambienti oggetto di simulazione sono stati modellati direttamente in *DesignBuilder*, a partire dagli elaborati progettuali definiti dal gruppo di progettazione. È stata modellata accuratamente la geometria sia dell'edificio stesso, sia delle principali ostruzioni rappresentate dal terreno e dagli edifici circostanti.

I diversi ambienti sono stati simulati privi di arredi, mentre per quanto concerne l'involucro edilizio, questo presenta una geometria e dei livelli prestazionali in linea con quanto contenuto negli elaborati progettuali (in termini di spessore, di materiali costituenti, distinguendo tra la parte opaca - mazzette, sguinci intorno alle finestre - e la parte trasparente - vetri, lucernai, etc.).

#### 3.3.2 Modellazione della variazione dinamica del contesto climatico nel corso dell'anno

Al fine di tenere conto delle caratteristiche climatiche del sito di progetto, situato a Torino, le simulazioni sono state condotte utilizzando in *DesignBuilder* il file climatico '*ITA\_TORINO-CASELLE\_IGDG.epw*', vale a dire un file contenente i valori statistici delle irradianze dirette e diffuse misurate sperimentalmente (su scala pluriennale) per la città di Torino. Il file climatico ha una risoluzione oraria ed è stato scaricato dal sito di *EnergyPlus* ([https://energyplus.net/weather-region/europe\\_wmo\\_region\\_6](https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6)).

Di conseguenza, *Radiance*, utilizzando il file climatico, conduce una simulazione per ogni ora nel corso dell'anno, calcolando gli illuminamenti necessari per determinare i valori di *FLD*, di *sDA<sub>300,50%</sub>* e di *ASE<sub>1000,250</sub>*.

#### 3.3.3 Griglia dei punti di misura

In tutti gli ambienti di verifica, si è predisposta una griglia di calcolo per la verifica dei requisiti di *daylighting* tale da coprire uniformemente lo spazio occupato.

Ogni griglia di calcolo è stata costruita con uno '*spacing*' (interdistanza fra i vari punti di misura) di 30 cm in entrambe le direzioni. Le griglie sono state collocate ad un'altezza di 80 cm rispetto al pavimento, in modo da essere allineate alle varie superfici di lavoro, quali scrivanie, tavoli da riunione, banconi della reception etc.

### 3.3.4 Materiali

I materiali dei vari spazi dell'edificio sono stati modellati attraverso *DesignBuilder*, utilizzando materiali compatibili con *Radiance* appositamente definiti in modo da riprodurre le caratteristiche di trasmissione o riflessione luminosa proprie dei materiali presenti a progetto.

In *Tabella 2*, si riporta il dettaglio dei materiali modellati, in termini di quantità di luce trasmessa/riflessa (fattore di trasmissione luminosa TL e di riflessione luminosa RL), e di modalità di riflessione/trasmmissione (speculare o diffusa):

Tabella 2 - Dettaglio delle proprietà ottiche/fotometriche dei materiali modellati in *DesignBuilder*, compatibili con *Radiance*

| ELEMENTO  | VALORE TL O RL | MODALITÀ DI TRASMISSIONE/RIFLESSIONE |
|---|----------------|--------------------------------------|
| TERRENO (ALBEDO)                                    | RL = 30%       | RIFLESSIONE DIFFUSA                  |
| OSTRUZIONI (EDIFICIO CIRCOSTANTI)                   | RL = 50%       | RIFLESSIONE DIFFUSA                  |
| PARETI VERTICALI ED ELEMENTI IN CALCESTRUZZO CHIARO | RL = 70%       | RIFLESSIONE DIFFUSA                  |
| STRUTTURE ORIZZONTALI (SOFFITTI)                    | RL = 80%       | RIFLESSIONE DIFFUSA                  |
| STRUTTURE ORIZZONTALI (PAVIMENTI)                   | RL = 40%       | RIFLESSIONE DIFFUSA                  |
| COMPONENTI VETRATI                                  | TL=70%         | TRASMISSIONE SPECULARE               |

### 3.3.5 Parametri di simulazione

Le simulazioni in *Radiance* sono state svolte avendo impostato i seguenti parametri di simulazione:

- ambient bounce ab
  - o ab = 7 per il calcolo del *FLDm* e degli illuminamenti annuali per la metrica *sDA<sub>300,50%</sub>*
  - o ab = 0 per il calcolo della metrica *ASE<sub>1000,250</sub>*, per la quale è richiesto il calcolo della sola componente solare diretta (senza riflessioni)
- ambient division ad 4096
- ambient sampling as 2048
- ambient resolution ar 1024
- ambient accuracy aa 0.18

### 3.3.6 Profilo di utilizzo

Coerentemente con la definizione stessa delle metriche '*spatial Daylight Autonomy*' (*sDA<sub>300,50%</sub>*) e '*Annual Sunlight Exposure*' (*ASE<sub>1000,250</sub>*), per tutti gli ambienti regolarmente occupati dell'edificio si è assunto un profilo di occupazione di 10 ore/giorno, dalle 8.00 alle 18.00, per tutti i giorni dell'anno (per un totale 3650 ore/anno).

### 3.4 Risultati dei calcoli

Nelle pagine successive, viene riportato il dettaglio dei risultati di *fattore medio luce diurna FLDm* e delle simulazioni dinamiche delle condizioni di daylighting (*sDA<sub>300,50%</sub>* e *ASE<sub>1000,250</sub>*) nei vari spazi analizzati.

Tabella 3 – Risultati complessivi delle simulazioni illuminotecniche

| ID. | TIPOLOGIA DI AMBIENTE / LIVELLO DI OCCUPAZIONE             | FLDM [%] | sDA <sub>300,50%</sub> [%] | ASE <sub>1000,250</sub> [%] |
|-----|--|----------|----------------------------|-----------------------------|
| A   | SALA CONFERENZE E SPETTACOLO 01-01 / OCCUPAZIONE SALTUARIA | 0,25%    | 2%                         | 0%                          |
| B   | SALA CONFERENZE E SPETTACOLO 01-04/ OCCUPAZIONE SALTUARIA  | 0,87%    | 30%                        | 10%                         |
| C   | SALA PROVE / OCCUPAZIONE SALTUARIA                         | 1,16%    | 40%                        | 0%                          |
| D   | UFFICI DEL PERSONALE / OCCUPAZIONE CONTINUA                | 2,00%    | 90%                        | 26%                         |

Per maggior completezza, si riportano infine nelle pagine seguenti alcune rappresentazioni di ciascun ambiente ove sono visibili gli andamenti dei parametri illuminotecnici descritti nel presente elaborato. In particolare sono riportati a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione dei parametri: *fattore di luce diurna medio (FLDm)*, *'spatial Daylight Autonomy' (sDA<sub>300,50%</sub>)* e *'Annual Sunlight Exposure' (ASE<sub>1000,250</sub>)*.

#### 3.4.1.1 AMBIENTE A: Ridotto 01-01

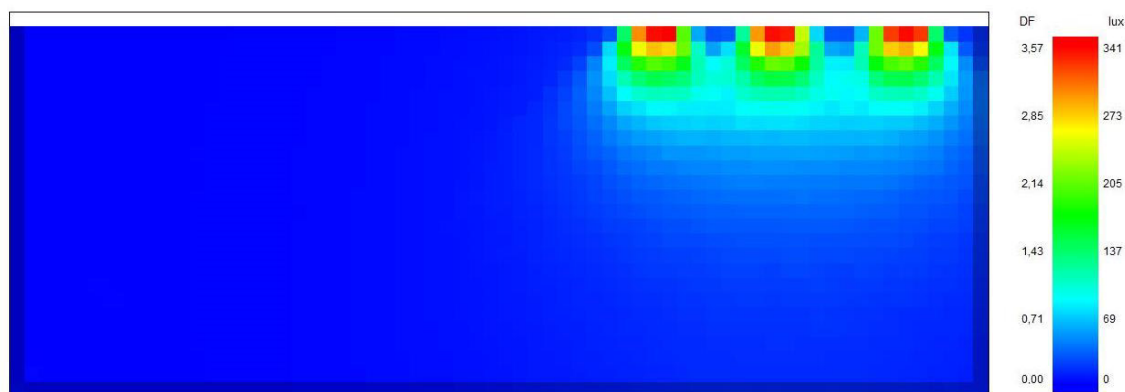


Figura 12 – Fattore medio di luce diurna (AMBIENTE A)



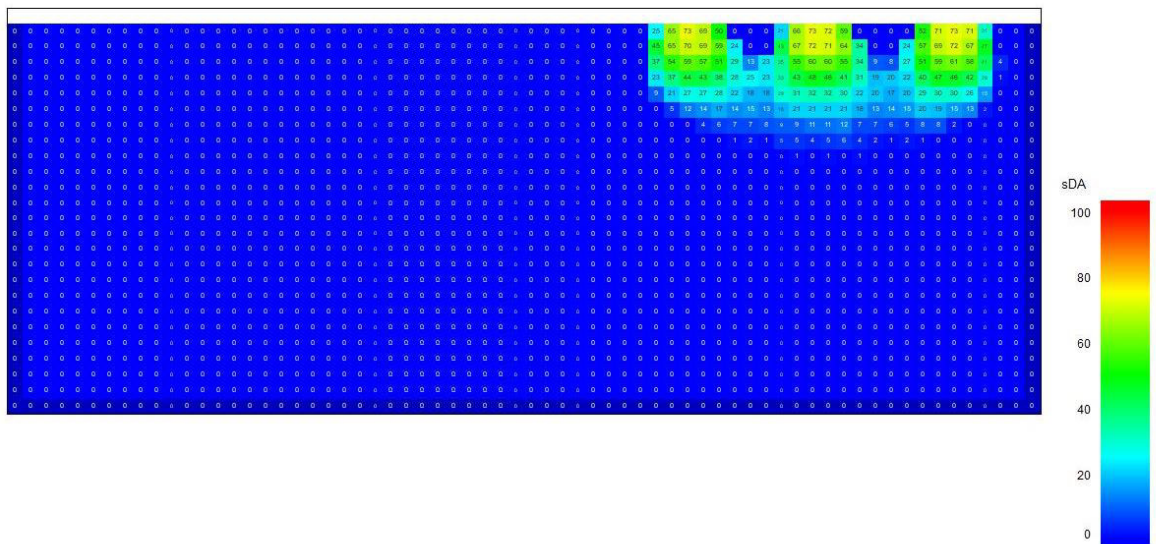


Figura 13 – Daylight Autonomy con target 300 lx (AMBIENTE A)



Figura 14 – Annual Sunlight Exposure (AMBIENTE A)

3.4.1.2 AMBIENTE B: Ridotto 01-04

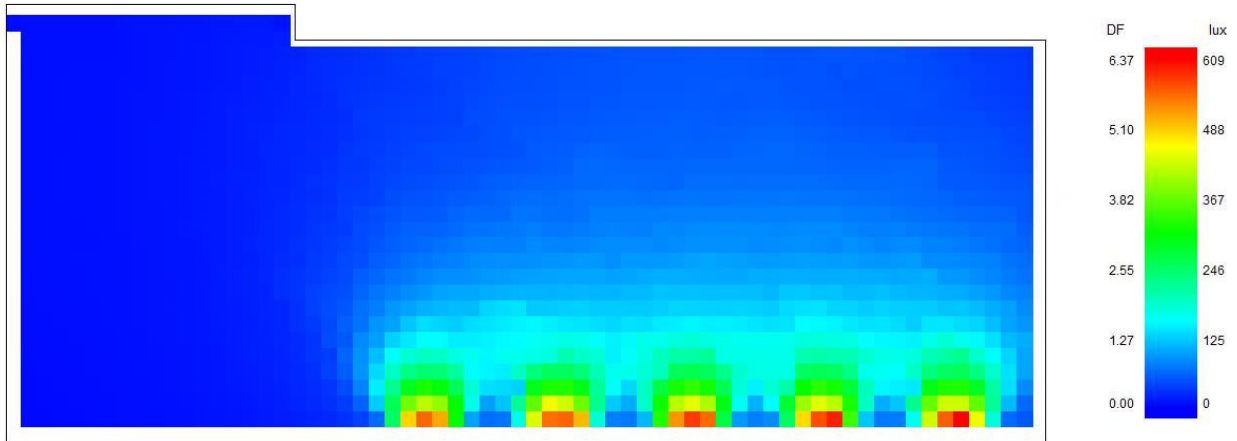


Figura 15 – Fattore medio di luce diurna (AMBIENTE B)

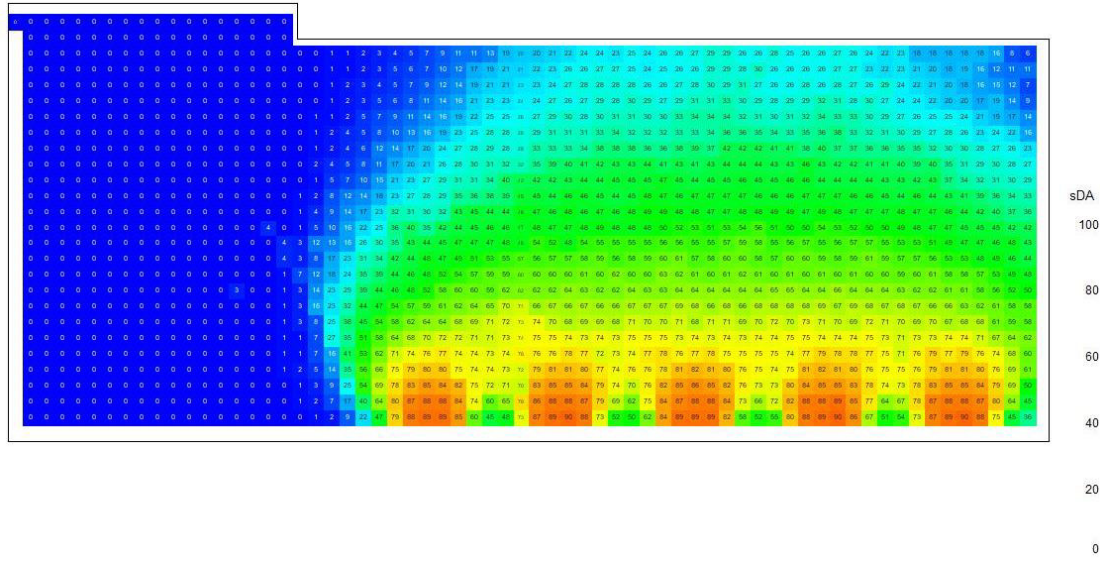


Figura 16 – Daylight Autonomy con target 300 lx (AMBIENTE B)

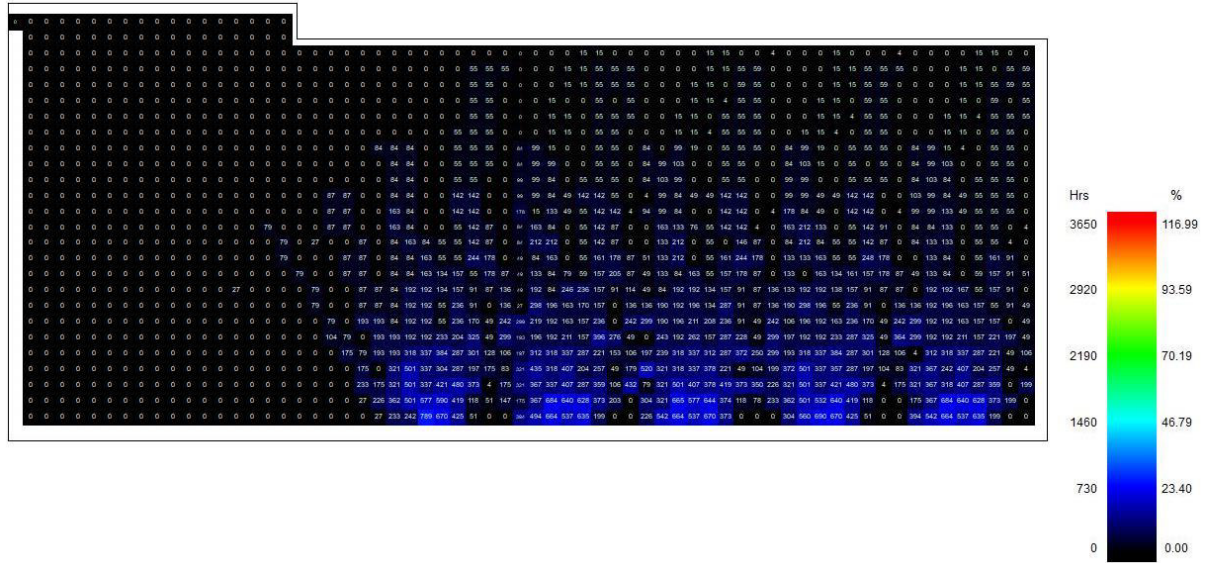


Figura 17 – Annual Sunlight Exposure (AMBIENTE B)

3.4.1.3 AMBIENTE C: Sala prove

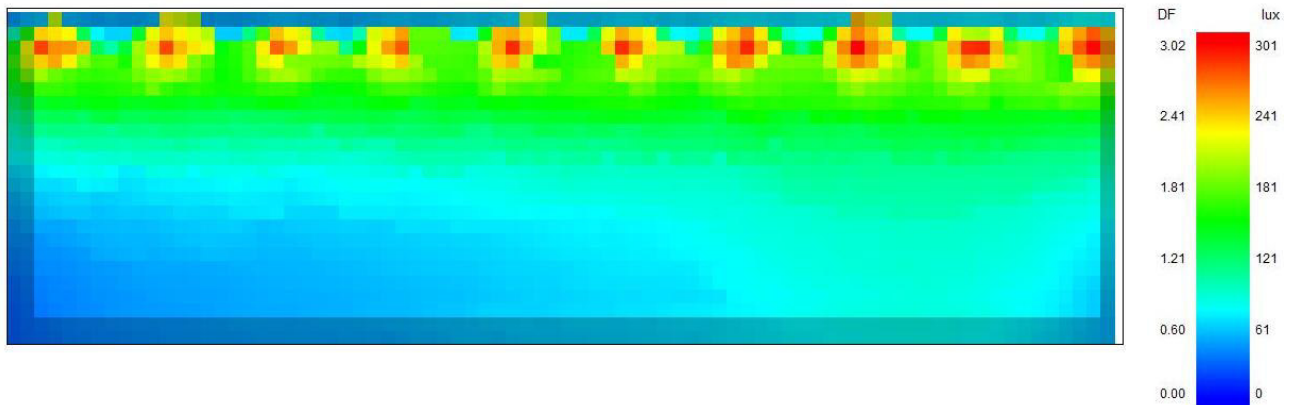


Figura 18 – Fattore medio di luce diurna (AMBIENTE C)

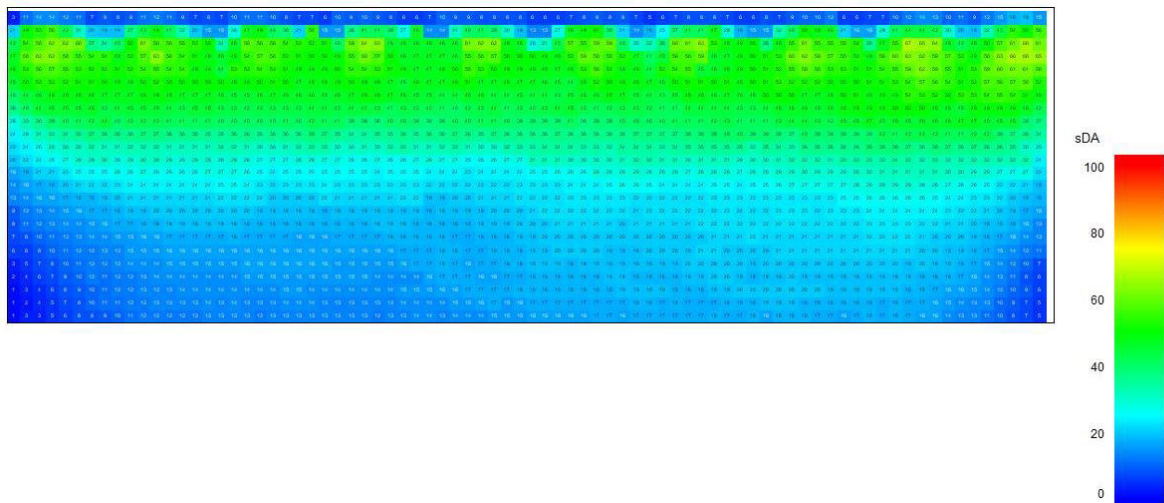


Figura 19 – Daylight Autonomy con target 300 lx (AMBIENTE C)

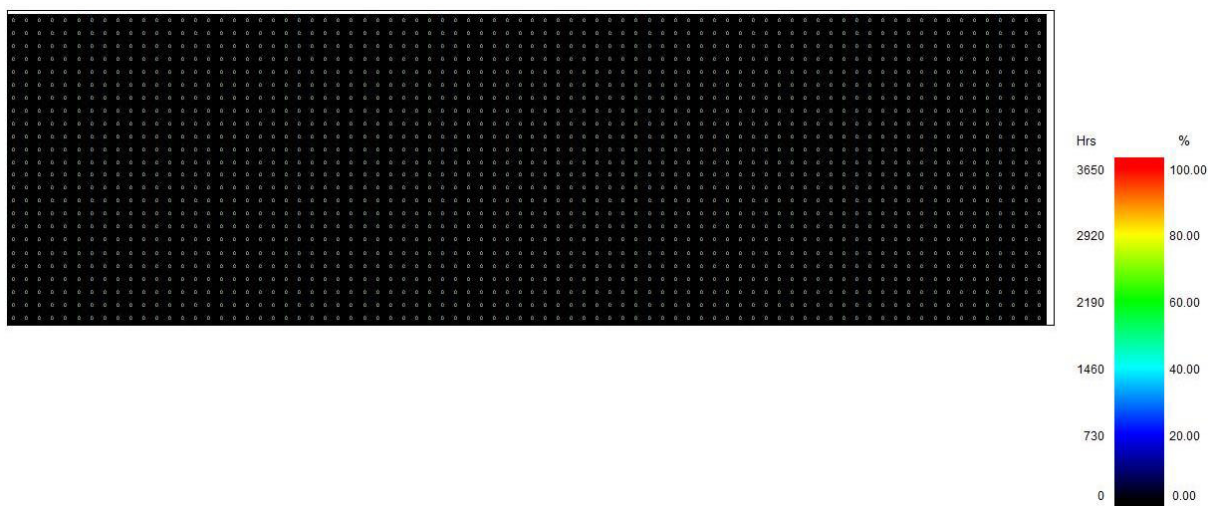


Figura 20 – Annual Sunlight Exposure (AMBIENTE C)

3.4.1.4 AMBIENTE D: Uffici del personale

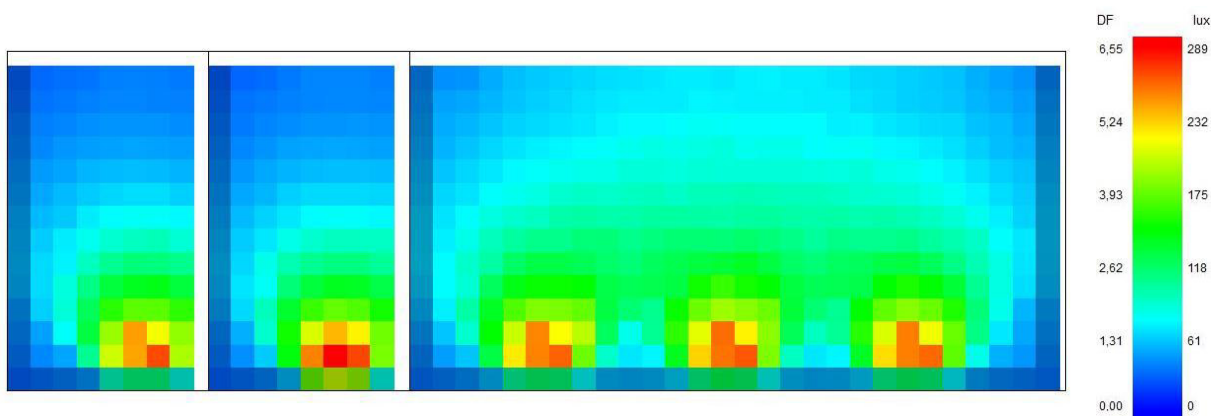


Figura 21 – Fattore medio di luce diurna (AMBIENTE D)

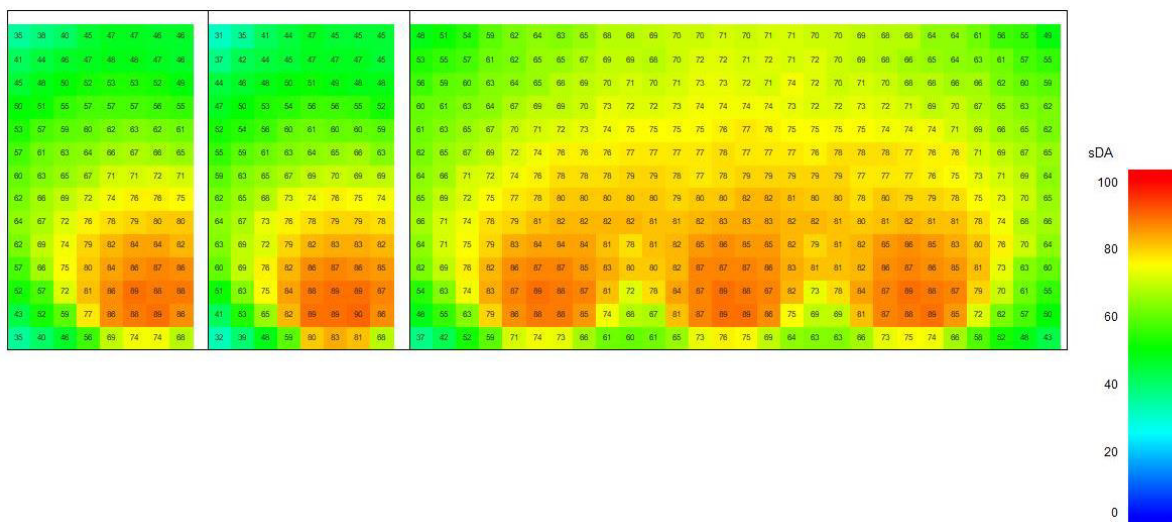


Figura 22 –Daylight Autonomy con target 300 lx (AMBIENTE D)

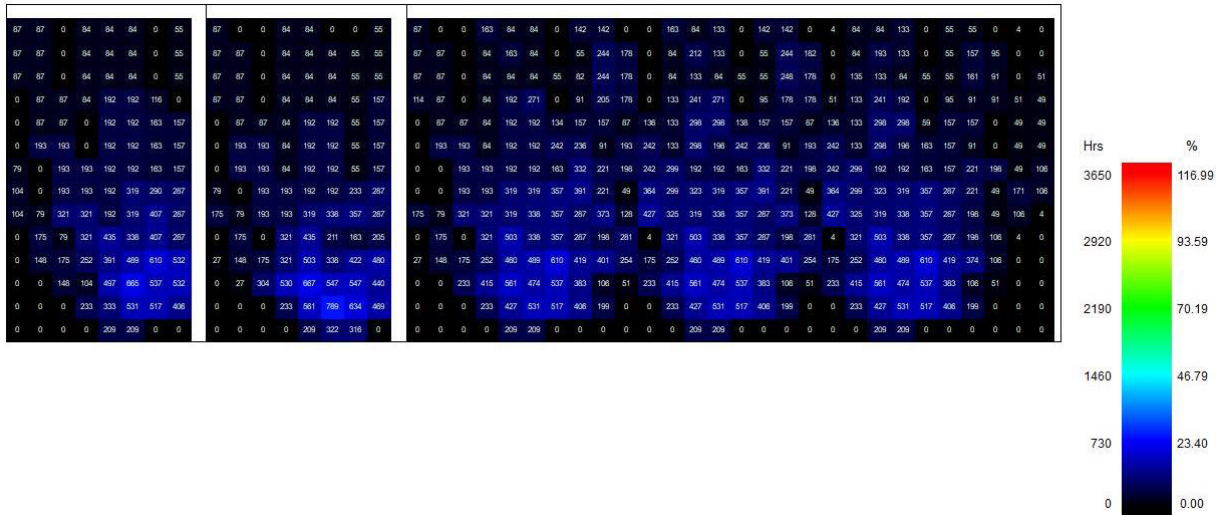


Figura 23 – Annual Sunlight Exposure (AMBIENTE D)

### 3.5 Conclusioni

Relativamente ai risultati presentati all'interno della tabella sopra riportata, è possibile affermare come:

per quanto concerne la verifica del **Fattore medio di luce diurna (FLDm)**, i valori ottenuti relativamente alla *Sala prove* e agli *Uffici del personale* risultano superiori alla soglia del 1%. In particolare, per quanto concerne gli uffici (ove il compito visivo è più rilevante), tali valori sono pari globalmente al 2% (valori in linea con quanto prescritto dalla normativa nazionale e dai *Criteri Ambientali Minimi*, si veda quanto contenuto nel capitolo 3.1.1 per maggior approfondimenti circa il quadro normativo). Per quanto concerne la *Sala prove*, il valore del *FLDm* è pari al 1,13%: per tale ambiente non risulta possibile arrivare al valore del 2% richiesto dalla normativa, a meno di operare importanti variazioni alle aperture di facciata (opzione non realizzabile a causa dei vincoli di conservazione agenti sull'edificio). Visto però che tale ambiente sarà utilizzato in modo discontinuo e che il compito visivo che sarà svolto al suo interno è meno gravoso rispetto a quanto richiesto per ambienti a destinazione d'uso ufficio, si ritiene comunque adeguato il livello raggiunto. Ulteriori miglioramenti potranno essere ottenuti selezionando materiali di finitura con valori di riflessione luminosa superiori a quelli considerati nel presente elaborato;

- per quanto concerne le due sale da spettacolo ridotte localizzate al piano primo (ambienti: *A - Ridotto 01-01* e *B - Ridotto 01-04*), si segnala a titolo indicativo che il livello di illuminamento naturale risulta particolarmente contenuto (valori di *FLDm* pari rispettivamente a 0,25 per l'ambiente *A - Ridotto 01-01* e a 0,87 per l'ambiente *B - Ridotto 01-04*). Si ricorda tuttavia che, in virtù del loro particolare utilizzo (sale per lo svolgimento di spettacoli, conferenze e proiezioni cinematografiche), non sono stati individuati dei livelli minimi cogenti di illuminamento naturale;
- in merito alla **Spatial Daylight Autonomy**, gli ambienti che saranno adibiti ad uffici presentano livelli soddisfacenti: in questo caso il fattore **sDA<sub>300,50%</sub>**, risulta essere verificato per oltre il 90% della superficie utile. Le altre zone analizzate presentano valori complessivamente inferiori al 40%;
- relativamente all'**Annual Sunlight Exposure ASE**, questo risulta non particolarmente elevato ad eccezione degli *Uffici 01-22,01-23,01-24* che presentano valori pari a circa il 26%. Tale valore è sintomatico della possibile presenza di fenomeni di abbagliamento durante le ore di occupazione dell'edificio (08:00 – 18:00). In merito, si evidenzia come, in presenza di valori superiori al 10%, il protocollo **LEED V4.1** richiederebbe che vengano intraprese delle azioni atte al contenimento di tali fenomeni. Per il caso in oggetto si ipotizza che saranno adottate, per le aperture verticali vetrate in oggetto, dei tendaggi interni, i quali potranno essere attivati dall'utenza qualora insorgessero fenomeni di abbagliamento (dotazioni che dovranno essere individuate dalle future fasi di progettazione).

In conclusione, le attività condotte per la verifica del **fattore di luce diurna medio (FLDm)** e illustrate nella presente relazione, permettono di accertare per tutti gli ambienti significativi testati la rispondenza ai requisiti di norma. Le verifiche sono state condotte con riferimento ai dati resi disponibili dal livello di approfondimento progettuale eseguito in questa fase. I successivi livelli di progettazione permetteranno di disporre di dati più dettagliati con i quali si dovrà affinare e confermare i risultati delle simulazioni qui riportati con particolare riferimento alle situazioni che hanno evidenziato delle potenziali criticità (cfr. valori *SDA* e *ASE*).

Il progetto fissa i requisiti prestazionali che dovranno essere rispettati nelle successive fasi di sviluppo del progetto e (successivamente) e dalla sua costruzione.

## 4 COMFORT TERMO-IGROMETRICO

### 4.1 Metriche utilizzate e valori di riferimento

Il presente capitolo riporta i risultati delle analisi svolte per la verifica del comfort termo-igrometrico attraverso la metrica degli indici di comfort.

Come evidenziato più avanti nella trattazione, durante l'iter progettuale si è prestata particolare attenzione all'adozione di soluzioni tecniche che permettessero l'ottenimento di valori di comfort termo-igrometrico in linea con quanto richiesto dalla normativa nazionale. In particolare, essendo l'edificio in oggetto di proprietà pubblica, esso ricade all'interno dell'applicazione dei *Criteri Ambientali Minimi*, così come definiti dal *Decreto 23 giugno 2022*, il quale prescrive come per gli interventi di *Ristrutturazione Importante di I livello* (così come definiti dal *D.M 26 giugno 2015, Requisiti Minimi*) sia necessario garantire condizioni conformi almeno alla *classe B* secondo la norma *UNI EN ISO 7730:2006* in termini di *PMV* (*Voto medio previsto*) e di *PPD* (*Percentuale prevista di insoddisfatti*).

Il *PMV* (*Valore medio previsto*) è un indice adimensionale che rappresenta il voto medio che un gruppo consistente di persone assegnerebbe alla propria sensazione termica su una scala a 7 punti (Tabella 4).

Tabella 4 – Scala di sensazione termica a sette punti

| VALORE | SENSAZIONE TERMICA |
|--------|--------------------|
| +3     | MOLTO CALDO        |
| +2     | CALDO              |
| +1     | LEGGERMENTE CALDO  |
| 0      | NEUTRO             |
| -1     | LEGGERMENTE FREDDO |
| -2     | FREDDO             |
| -3     | MOLTO FREDDO       |

Tale indice è calcolato a partire dal bilancio termico dell'individuo rispetto all'ambiente circostante e dipende dai seguenti parametri:

- fattori ambientali:
  - o temperatura dell'aria;
  - o temperatura media radiante;
  - o velocità relativa dell'aria;
  - o pressione parziale del vapore d'acqua;
  - o coefficiente di scambio termico convettivo;
- fattori legati al singolo individuo:
  - o potenza metabolica efficace (MET - funzione dell'attività svolta dal soggetto);
  - o resistenza termica dell'abbigliamento degli occupanti (CLO).

A partire dal *PMV* è possibile calcolare l'indice *PPD* (*Percentuale prevista di insoddisfatti*), il quale fornisce una previsione della percentuale di persone termicamente insoddisfatte, che sentirebbero pertanto troppo freddo o troppo caldo (il rapporto tra *PMV* e *PPD* è rappresentato in Figura 24). In merito si evidenzia come, essendo tale correlazione elaborata su base statistica, anche con valori di *PMV* nulli (condizioni teoricamente ottimali), la percentuale prevista di insoddisfatti registrerebbe un valore pari al 5%.

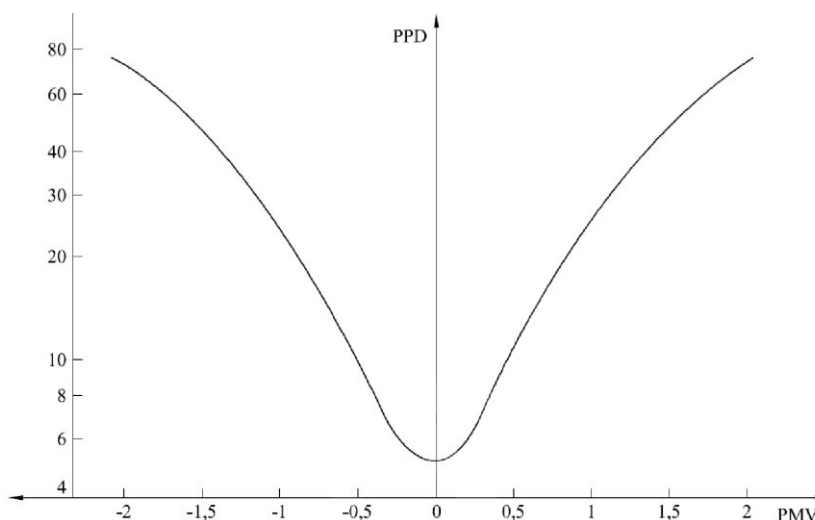


Figura 24 – Confronto tra PMV e PPD

Come anticipato in premessa, per il caso in esame **la classe di comfort prevista secondo UNI EN ISO 7730:2006 è la Classe B (corrispondente a valori di PMV compresi tra -0,5 e +0,5)**, così come definito dal punto 2.4.6 dei Criteri Ambientali Minimi ex. D.M. 23 giugno 2022. La definizione delle classi di comfort introdotte dalla normativa sopracitata e dei valori corrispondenti di PMV e PPD è riportata in Tabella 5.

Tabella 5 – Correlazione classi di comfort e indici PMV e PPD

| CATEGORIA | PPD (%) | PMV              |
|-----------|---------|------------------|
| A         | < 6     | -0,2 < PMV < 0,2 |
| B         | < 10    | -0,5 < PMV < 0,5 |
| C         | < 15    | -0,7 < PMV < 0,7 |

Oltre alla valutazione degli indici di “comfort globale”, in precedenza descritti, è importante prendere in considerazione anche le principali cause che provocano **discomfort locale**, dovuto alla disomogeneità del raffreddamento o riscaldamento del corpo umano. Tali aspetti dovranno essere approfonditi in fase di progettazione esecutiva, in quanto direttamente dipendenti dalle tipologie di terminale che saranno effettivamente selezionati per la ventilazione meccanica e la climatizzazione. I principali parametri da tenere in conto sono i seguenti:

- differenza verticale di temperatura;
- asimmetria della temperatura media radiante;
- pavimento con temperatura eccessivamente bassa o alta;
- correnti d’aria.

Nel seguito della relazione sono comunque riportate le analisi preliminari relative alla valutazione del discomfort locale.

Inoltre, all’interno del capitolo conclusivo del presente elaborato, sono riportate alcune indicazioni puntuali, le quali costituiscono i requisiti prestazionali che dovranno essere rispettati durante le successive fasi di progettazione e saranno la base da cui partire per le valutazioni di dettaglio sopra descritte.



## 4.2 Individuazione degli ambienti oggetto di verifica

All'interno del presente capitolo sono brevemente individuati e descritti gli ambienti caratteristici oggetto di valutazione della classe di comfort termo-igrometrico mediante simulazione *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*). Tali ambienti si possono ritenere sufficientemente rappresentativi delle diverse casistiche riscontrabili all'interno del fabbricato.

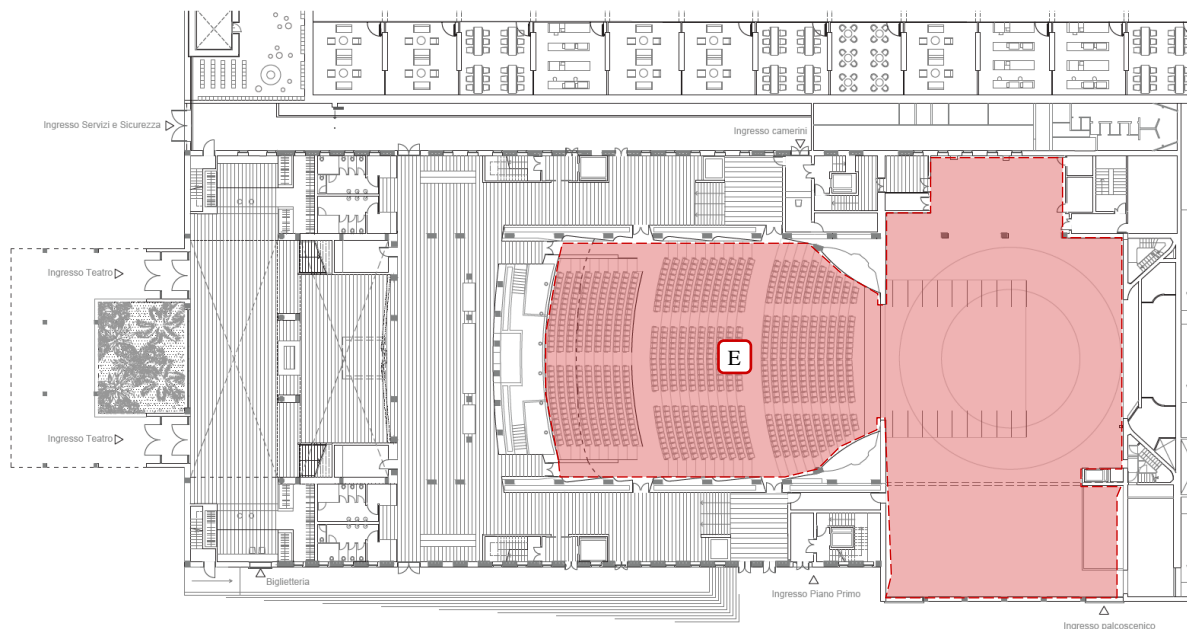


Figura 25– Stato di progetto. Pianta piano terra.

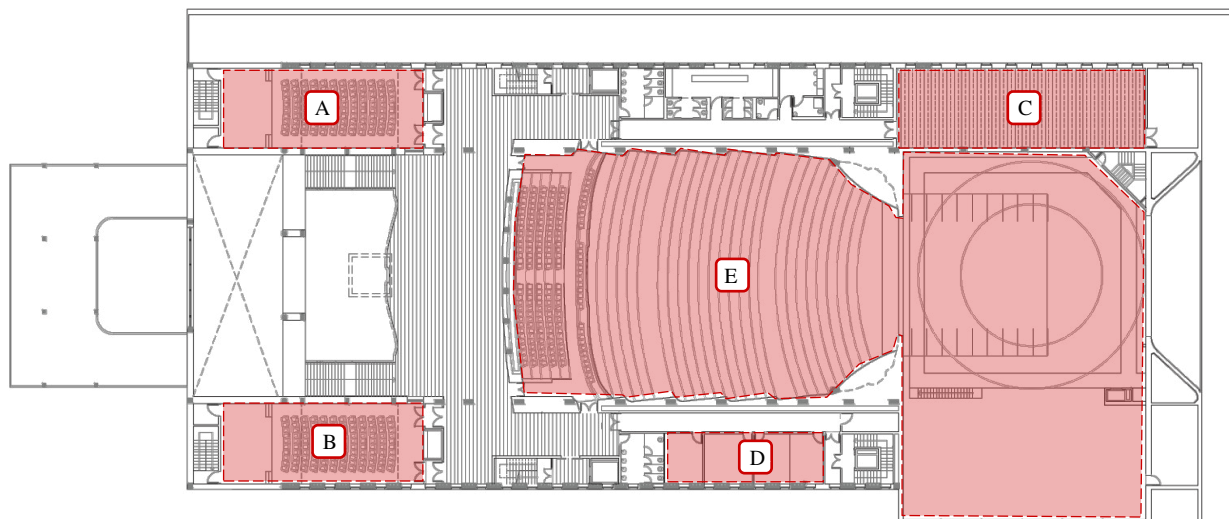


Figura 26– Stato di progetto. Pianta piano primo.

In particolare, si riportano di seguito gli ambienti oggetto di simulazione, per i quali sono state verificate le condizioni di comfort termico:

- A. Piano primo – Ridotto 01-01;
- B. Piano primo – Ridotto 01-04;
- C. Piano primo – Sala prove 01-18;
- D. Piano primo – Uffici 01-22,01-23,01-24;
- E. Piano terra e primo – Sala principale.

### 4.3 Software di simulazione

Le simulazioni per il calcolo del livello di comfort atteso all'interno degli ambienti oggetto di approfondimento sono state effettuate utilizzando due diversi software di analisi CFD (*Computational Fluid Dynamics*): *DesignBuilder* e *VENTO AEC*, i quali sono descritti nei paragrafi a seguire.

#### 4.3.1 DesignBuilder

Il software *DesignBuilder* è caratterizzato da un motore di calcolo che, oltre a permettere la modellazione puntuale in CFD, consente l'esecuzione di analisi in regime dinamico su base annua (valutate con il motore di calcolo *Energy Plus*), in regime stazionario ed illuminotecnico. Tale strumento è normalmente utilizzato per la simulazione di volumi di dimensioni relativamente contenute (es. uffici singoli e open space, sale riunioni, locali comuni, etc), dotati di impianti "tradizionali" (es. climatizzazione mediante ventilconvettori o sistemi radianti). Per tali ragioni è stato utilizzato per lo studio dei seguenti ambienti:

- A. Piano primo – Ridotto 01-01
- B. Piano primo – Ridotto 01-04
- C. Piano primo – Uffici 01-22,01-23,01-24
- D. Piano primo – Sala prove 01-18

Il software restituisce immagini tridimensionali costituite da vettori e gradienti di colore con scale di rappresentazione modulabili, che consentono di studiare fenomeni che si verificano a livello locale (velocità dell'aria, temperature radianti e operanti, mappe di PMV e PPD). Tale software è stato testato mediante un lavoro di convalida, effettuato dalla *Northumbria University*, Newcastle.

#### 4.3.2 Vento AEC

Per quanto concerne il software *VENTO AEC*, questo è stato sviluppato dalla casa produttrice (*CSPFea*) esclusivamente per lo studio di flussi di aria all'interno di volumi complessi e caratterizzati da condizioni al contorno estremamente variabili. Tale strumento è stato utilizzato per la simulazione della *Sala principale* (composta dalla platea, dalla galleria e dal palco con annessa torre scenica), in quanto caratterizzata da volumi estremamente ampi e da sistemi di climatizzazione complessi (canali microforati abbinati a sistemi a bocchette a bassa velocità). Non fornendo direttamente mappe di PMV e PPD, i dati ottenuti mediante tale simulazione sono stati poi aggregati e analizzati globalmente così da ottenere delle previsioni di comfort globali per ambiente.

#### 4.3.3 Definizione delle condizioni al contorno

L'iter progettuale ha previsto la realizzazione di una serie di interventi, riguardanti sia i componenti d'involucro edilizio, sia gli impianti di climatizzazione, finalizzati ad elevare il livello di comfort termologico all'interno dell'edificio.

Si riporta all'interno della Tabella 6 un quadro riassuntivo delle strategie energetiche messe in atto e delle ricadute attese sul comfort termologico degli ambienti interni.

Tabella 6 – Analisi delle strategie energetiche messe in atto e dei benefici attesi sul comfort termo-igrometrico

| INTERVENTO   | RICADUTE IN TERMINI DI COMFORT TERMO-IGROMETRICO  |
|--|---|
| COIBENTAZIONE DELLA TOTALITÀ DELLE STRUTTURE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO CONFINANTI IL VOLUME CLIMATIZZATO E SOSTITUZIONE DEI SERRAMENTI ESISTENTI | Maggiore <u>uniformità della temperatura radiante</u> sia durante il periodo invernale che quello estivo e drastica riduzione dei possibili casi di asimmetria radiante   |
|  | Aumento della temperatura superficiale durante il periodo invernale e <u>riduzione dei casi di possibile condensa superficiale e di muffe sulle strutture edilizie</u> (ricaduta positiva per il miglioramento della qualità dell'aria interna anche se non direttamente correlata agli aspetti di comfort termo-igrometrico) |
|  | Riduzione del carico termico in ambiente, così da permettere l' <u>utilizzo di terminali in bassa temperatura</u> per la climatizzazione invernale ed estiva, i quali saranno caratterizzati da una temperatura prossima alla temperatura dell'aria in ambiente   |
|  | <u>riduzione della formazione di correnti d'aria</u> convettive conseguenti alla presenza di superfici caratterizzate da temperature superficiali distanti dalla temperatura media dell'aria in ambiente  |
| UTILIZZO DI SISTEMI DI VENTILAZIONE A PAVIMENTO A BASSA VELOCITÀ   | <p>Presenza in ambiente di <u>velocità dell'aria contenute</u></p> <p><u>Efficace rimozione degli inquinanti ambientali e dei VOC</u> dalle zone caratterizzate dalla presenza di utenza finale</p>   |

Come riportato in Tabella 6, la **ventilazione a pavimento a bassa velocità** ha permesso di contenere le correnti d'aria in ambiente e di garantire un efficace smaltimento degli inquinanti (quest'ultimo aspetto acquista particolare efficacia in virtù delle elevate altezze presenti nella *Sala principale* del teatro). Tale sistema prevede l'immissione in ambiente di aria a bassa velocità a livello del pavimento, la quale, riscaldandosi grazie ai gradienti termici e ai naturali pennacchi termici caratterizzanti le persone e le apparecchiature elettroniche (ove presenti), aumenta di quota trasportando eventuali inquinanti nella parte alta degli ambienti (volumi non occupati dalle persone), ove questi sono smaltiti.

Tale tecnologia è stata utilizzata unicamente all'interno della Sala principale in quanto caratterizzata da un'elevata altezza interna, mentre per gli ambienti di altezza più contenuta (es. uffici, ridotti e sala prove) si è preferito adottare sistemi di ventilazione a miscelazione.

Partendo dall'analisi delle stratigrafie post-riqualificazione e degli interventi di coibentazione/sostituzione sopra descritti, sono stati ricavati i valori di temperatura superficiale interna dei vari locali, mediante l'analisi del flusso termico che attraverserebbe tali componenti edilizi in condizioni di progetto.

Tale flusso termico dipende dal gradiente di temperatura esterno/interno ( $\Delta T$ ), dal coefficiente di scambio termico liminare ( $h_i$ ) e dalla trasmittanza termica ( $U$ ) del componente stesso ed è calcolato con la seguente equazione:

$$\Phi = U \cdot \Delta T \text{ [W/m}^2\text{]} \quad [1]$$

$$T_{\text{super.int}} = T_{\text{interna}} - (\Phi/h_i) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [2]$$

Dove  $h_i$  è il coefficiente di adduzione che vale  $7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  per le superfici verticali interne,  $5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$  per le superfici orizzontali interne con flusso discendente e  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$  per le superfici orizzontali interne con flusso ascendente (da norma UNI EN ISO 6946).

Per il periodo invernale si è considerato quanto segue:

- temperatura dell'aria interna pari a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (valore di progetto);
- umidità relativa dell'aria interna pari a  $50\%$  (valore di progetto);
- temperatura esterna pari a  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$  (corrispondente alla temperatura di progetto secondo la norma UNI 5364 e s.m.i.);

- temperatura locali non climatizzati localizzati al piano interrato pari a  $-8\text{ °C}$  (assumendo, in via cautelativa, il medesimo valore di progetto utilizzato per la temperatura esterna);
- irradianza solare considerata pari a zero (condizioni maggiormente gravose).

e per il periodo estivo:

- temperatura dell'aria interna pari a  $26\text{ °C}$  (valore di progetto);
- umidità relativa dell'aria interna pari a  $50\%$  (valore di progetto);
- temperatura esterna pari a  $30,5\text{ °C}$  (secondo la norma UNI 10349-1:2016);
- temperatura locali non climatizzati localizzati al piano interrato pari a  $30,5\text{ °C}$  (assumendo, in via cautelativa, il medesimo valore di progetto utilizzato per la temperatura esterna);
- irradianza solare massima estiva incidente sulle superfici alla latitudine di  $45^{\circ}\text{N}$  e per le diverse esposizioni secondo la normativa UNI 10349-1:2016 (all'interno del grafico riportato in Figura 27 sono rappresentati gli andamenti orari per i vari orientamenti dell'irradianza solare caratterizzante del caso in esame).

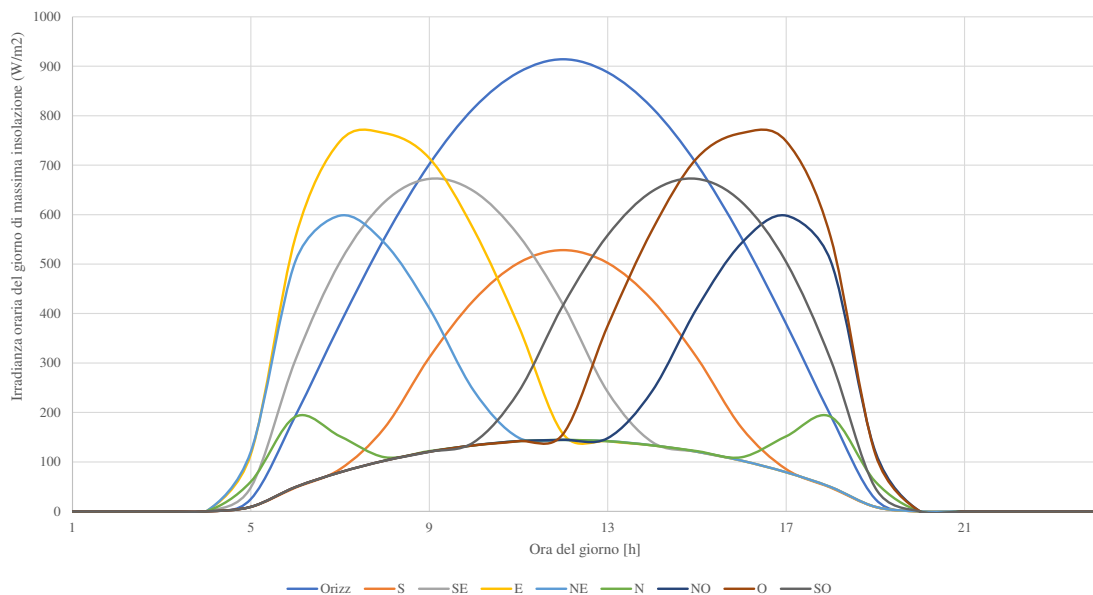


Figura 27 – Andamento dell'irradianza oraria del giorno di massima insolazione ( $W/m^2$ )

In merito alle caratteristiche termiche dei diversi componenti edilizi, si rimanda a quanto contenuto all'interno degli elaborati progettuali di competenza. A titolo indicativo, si riporta a seguire una breve descrizione dei singoli componenti edilizi congiuntamente al relativo livello prestazione considerato (trasmissione termica U):

- Solaio contro-terra (Sala principale): struttura dotata di intercapedine ove sono collocate le distribuzioni degli impianti tecnologici e di strato coibente;
- Solaio verso ambienti non climatizzati siti al piano interrato: struttura disperdente verso i locali tecnici sottostanti, in calcestruzzo armato, dotata di strato coibente all'intradosso;
- Copertura della Sala principale: controsoffittatura sormontata da struttura in calcestruzzo armato esistente, dotata all'estradosso di isolamento termico e finitura ventilata in lamiera metallica altamente riflettente;
- Coperture piane: strutture in laterocemento o calcestruzzo armato esistenti, dotate all'estradosso di isolamento termico e finitura in membrana impermeabilizzante altamente riflettente;

- Muratura su esterno con isolamento a cappotto: muratura esistente in laterizio forato, con coibentazione dall'esterno mediante pannelli in lana minerale e finitura con rivestimento continuo/intonachino;
- Muratura su esterno con isolamento dall'interno: muratura esistente in laterizio forato, con finitura esterna in lastre di materiale lapideo e strati di coibentazione dall'interno in pannelli racchiusi da una contro-parete in cartongesso;
- Serramenti esterni verticali: nuovi elementi dotati di telaio in alluminio e vetro camera basso emissivo a controllo solare (fattore solare inferiore al 35%);
- Strutture adiabatiche interne al volume climatizzato: strutture edilizie e serramenti interni a cui sono stati associati valori di temperatura superficiale pari alla temperatura di set point del periodo analizzato.

Per quanto concerne gli impianti tecnologici, sono presenti impianti di ventilazione meccanica bilanciata e di climatizzazione invernale ed estiva alimentati questi ultimi da pompe di calore ad acqua. Tali sistemi sono dotati delle seguenti dotazioni per la ventilazione e l'emissione del calore in ambiente:

- sistemi radianti a pavimento;
- ventilconvettori;
- bocchette ed ugelli per l'immissione di aria collegate ad UTA centralizzate.

I dati di funzionamento di ciascuno dei terminali sopracitati sono stati desunti dalla documentazione progettuale inerente agli impianti meccanici e sono riassunti all'interno delle tabelle riportate a seguire:

*Tabella 7 – Definizione dei terminali impiantistici – AMBIENTE A: Piano primo – Ridotto 01-01*

| TIPOLOGIA DI TERMINALE IMPIANTISTICO             | FUNZIONAMENTO IN CONDIZIONI DI PROGETTO   |
|--|---|
| BOCCHETTA LINEARE A SOFFITTO A GETTO ORIZZONTALE | <p><b>STAGIONE INVERNALE:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria ed il riscaldamento con portata della singola bocchetta pari a 180 m<sup>3</sup>/h e temperatura dell'aria immessa pari a 26°C</p> <p><b>STAGIONE ESTIVA:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria e il raffrescamento, con portata della singola bocchetta pari a 180 m<sup>3</sup>/h e temperatura dell'aria immessa pari a 16°C</p> |

*Tabella 8 – Definizione dei terminali impiantistici – AMBIENTE B: Piano primo – Ridotto 01-04*

| TIPOLOGIA DI TERMINALE IMPIANTISTICO             | FUNZIONAMENTO IN CONDIZIONI DI PROGETTO   |
|--|---|
| BOCCHETTA LINEARE A SOFFITTO A GETTO ORIZZONTALE | <p><b>STAGIONE INVERNALE:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria ed il riscaldamento con portata della singola bocchetta pari a 180 m<sup>3</sup>/h e temperatura dell'aria immessa pari a 26°C</p> <p><b>STAGIONE ESTIVA:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria e il raffrescamento, con portata della singola bocchetta pari a 180 m<sup>3</sup>/h e temperatura dell'aria immessa pari a 16°C</p> |

Tabella 9 – Definizione dei terminali impiantistici – **AMBIENTE C – Piano primo – Sala prove 01-18**

| TIPOLOGIA DI TERMINALE IMPIANTISTICO             | FUNZIONAMENTO IN CONDIZIONI DI PROGETTO  |
|--|--|
| BOCCHETTA LINEARE A SOFFITTO A GETTO ORIZZONTALE | <b>STAGIONE INVERNALE:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria ed il riscaldamento con portata della singola bocchetta pari a 220 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 26°C<br><b>STAGIONE ESTIVA:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria e il raffrescamento, con portata della singola bocchetta pari a 220 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 16°C |

 Tabella 10 – Definizione dei terminali impiantistici – **AMBIENTE D - Piano terra – Piano primo – Uffici**

| TIPOLOGIA DI TERMINALE IMPIANTISTICO    | FUNZIONAMENTO IN CONDIZIONI DI PROGETTO  |
|---|--|
| BOCCHETTA AD UGELLO INSTALLATA A PARETE | <b>STAGIONE INVERNALE:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria ed il riscaldamento con portata della singola bocchetta pari a 200 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 26°C<br><b>STAGIONE ESTIVA:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria e il raffrescamento, con portata della singola bocchetta pari a 200 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 16°C |

 Tabella 11 – Definizione dei terminali impiantistici – **AMBIENTE E – Sala principale**

| TIPOLOGIA DI TERMINALE IMPIANTISTICO | FUNZIONAMENTO IN CONDIZIONI DI PROGETTO  |
|--------------------------------------|--|
| BOCCHETTA A PAVIMENTO                | <b>STAGIONE INVERNALE:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria ed il riscaldamento con portata della singola bocchetta pari a 40 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 21°C<br><b>STAGIONE ESTIVA:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria e il raffrescamento, con portata della singola bocchetta pari a 60 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 22°C         |
| CANALI MICROFORATI                   | <b>STAGIONE INVERNALE:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria ed il riscaldamento con portata complessiva del sistema pari a 10.000 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 20°C<br><b>STAGIONE ESTIVA:</b> sistema in funzione per il ricambio dell'aria e il raffrescamento, con portata complessiva del sistema pari a 20.000 m <sup>3</sup> /h e temperatura dell'aria immessa pari a 21°C |

Per quanto riguarda invece i parametri relativi al singolo individuo, si segnala quanto segue:

- l'**attività metabolica** è stata valutata pari a **1,2 met**, valore corrispondente ad un'attività sedentaria;
- il **livello di abbigliamento** degli utenti è stato valutato pari a:
  - **1 clo** per la stagione invernale;
  - **0,7 clo** per la stagione estiva.

## 4.4 Risultati dei calcoli: software DesignBuilder

### 4.4.1 AMBIENTE A: Piano primo – Ridotto 01-01

L'ambiente in oggetto è localizzato al piano primo, nella porzione occidentale dell'edificio più prossima a corso Massimo d'Azeglio. Analizzandone l'involucro edilizio, si segnala che:

- tre pareti verticali confinano con altri locali situati all'interno del volume climatizzato e sono caratterizzate da una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva;
- una parete confina con l'esterno ed è caratterizzata dalla presenza di pannelli coibenti (in parte all'interno ed in parte all'esterno della struttura stessa): tale elemento è stato modellato utilizzando una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva. In corrispondenza di tale tamponamento sono presenti dei serramenti dotati di telaio metallico e vetro camera basso emissivo: per tali elementi si adotta una temperatura invernale pari a 14°C (considerata in assenza di radiazione solare) ed una temperatura estiva pari a 30°C (valutata analizzando il flusso termico entrante in condizioni di massimo irraggiamento solare, tenendo conto inoltre del fattore solare del serramento -  $g_{gl,sh}$  pari al 35%);
- la copertura piana è costituita da un solaio in laterocemento, dotato all'estradosso di strato coibente ed all'intradosso di una controsoffittatura in cartongesso: per tale struttura si è adottata una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva
- il pavimento confina direttamente su altri ambienti interni al volume climatizzato, pertanto presenta una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva. Per quanto concerne le simulazioni estive, in virtù dell'affollamento presente nel locale (capienza massima pari a 149 persone), è stata inoltre imputata un'emissione di calore in corrispondenza dell'aria di pavimento occupata dalle sedute, pari a 64 W/persona (valore corrispondente alla quota sensibile emessa dalle persone stesse). Tale emissione non è stata imputata nelle simulazioni in regime invernale, in quanto si è ritenuto più cautelativo, verificare il rispetto dei requisiti in presenza di una sala parzialmente non occupata.

Da un punto di vista impiantistico, sono presenti i terminali elencati in Tabella 7.

#### 4.4.1.1 AMBIENTE A: REGIME INVERNALE

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro *PMV* per il regime invernale.

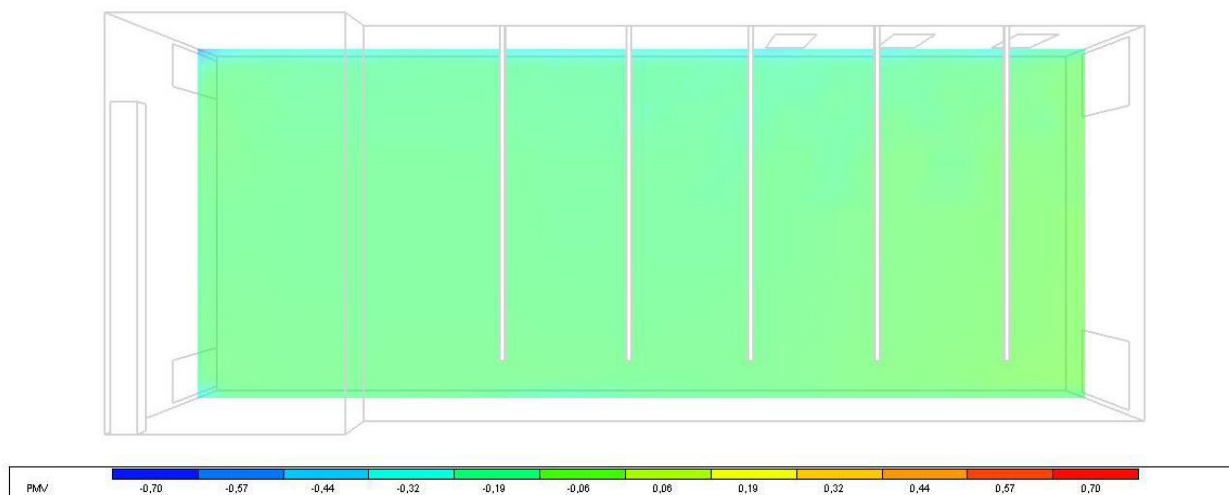


Figura 28 – Ambiente A – PMV regime invernale

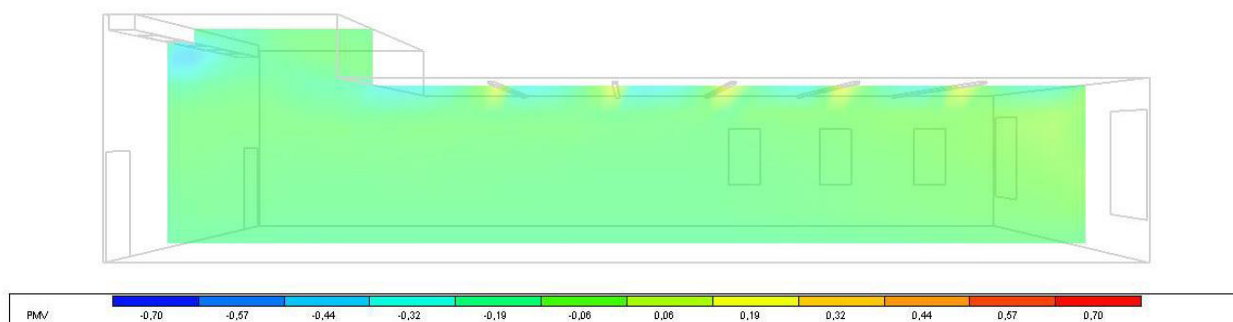


Figura 29 – Ambiente A – PMV regime invernale

Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di *PMV* per le zone occupate varino tra -0,2 e +0,2, corrispondenti alla classe A prevista dalla norma.

#### 4.4.1.2 AMBIENTE A: REGIME ESTIVO

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro *PMV* per il regime estivo.

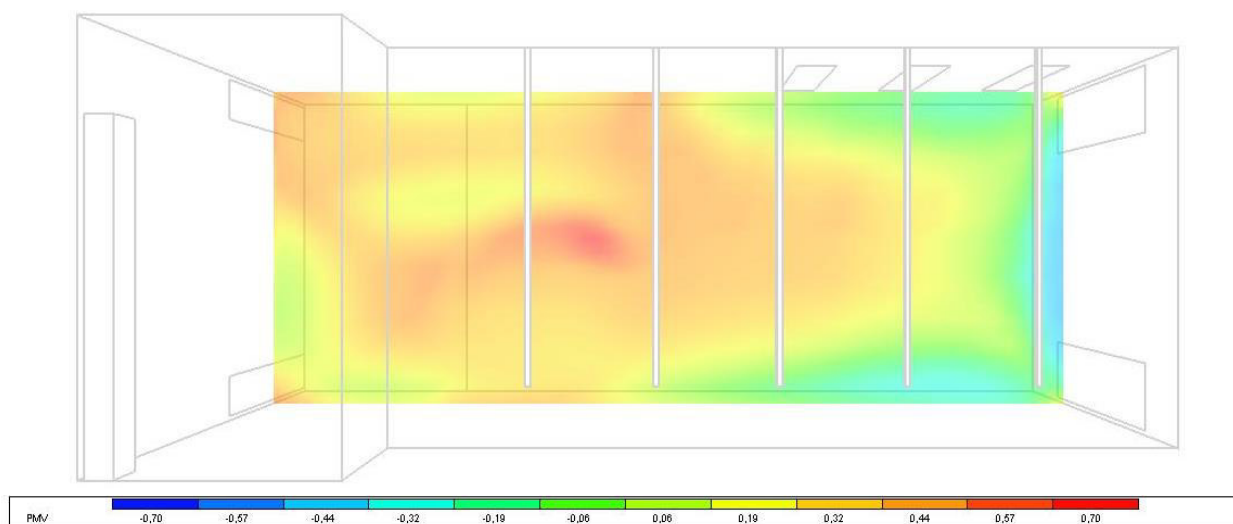


Figura 30 – Ambiente A – PMV regime estivo

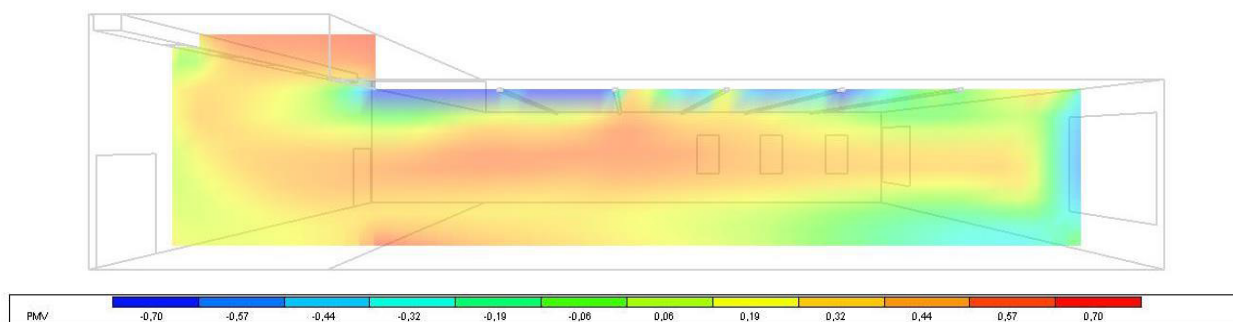


Figura 31 – Ambiente A – PMV regime estivo



Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di *PMV* per le zone occupate varino tra -0,5 e +0,5, corrispondenti alla classe B prevista dalla norma. Si segnala come alcune porzioni molto circoscritte presentino valori di *PMV* leggermente superiori a +0,5 (valori comunque inferiori a 0,7, corrispondenti alla classe C prevista dalla norma). Tale anomalia si ipotizza sia correlata ad alcuni limiti dell'attività simulativa, all'interno della quale le singole bocchette sono modellate come un unico corpo, mentre gli elementi selezionati a progetto sono composti da diverse sezioni, di cui è possibile modificare l'emissione singolarmente. In linea generale si specifica che il progetto esecutivo, occupandosi della selezione e della taratura puntuale dei terminali d'impianto, dovrà tenere in maggiore considerazione la posizione e l'orientamento di ogni sezione della bocchetta in modo da minimizzare il più possibile il rischio di discomfort locale.

#### 4.4.2 AMBIENTE B: Piano primo – Ridotto 01-04

L'ambiente in oggetto è localizzato al piano primo, nella porzione occidentale dell'edificio più prossima a corso Massimo d'Azeglio. Analizzandone l'involucro edilizio, si segnala che:

- tre pareti verticali confinano con altri locali situati all'interno del volume climatizzato e sono caratterizzate da una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva;
- una parete confina con l'esterno ed è caratterizzata dalla presenza di pannelli coibenti (in parte all'interno ed in parte all'esterno della struttura stessa): tale elemento è stato modellato utilizzando una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva. In corrispondenza di tale tamponamento sono presenti dei serramenti dotati di telaio metallico e vetro camera basso emissivo: per tali elementi si adotta una temperatura invernale pari a 14°C (considerata in assenza di radiazione solare) ed una temperatura estiva pari a 30°C (valutata analizzando il flusso termico entrante in condizioni di massimo irraggiamento solare, tenendo conto inoltre del fattore solare del serramento -  $g_{gl,sh}$  pari al 35%);
- la copertura piana è costituita da un solaio in laterocemento, dotato all'estradosso di strato coibente ed all'intradosso di una controsoffittatura in cartongesso: per tale struttura si è adottata una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva
- il pavimento confina direttamente su altri ambienti interni al volume climatizzato, pertanto presenta una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva. Per quanto concerne le simulazioni estive, in virtù dell'affollamento presente nel locale (capienza massima pari a 149 persone), è stata inoltre imputata un'emissione di calore in corrispondenza dell'aria di pavimento occupata dalle sedute, pari a 64 W/persona (valore corrispondente alla quota sensibile emessa dalle persone stesse). Tale emissione non è stata imputata nelle simulazioni in regime invernale, in quanto si è ritenuto più cautelativo, verificare il rispetto dei requisiti in presenza di una sala parzialmente non occupata.

Da un punto di vista impiantistico, sono presenti i terminali elencati in Tabella 8.

##### 4.4.2.1 AMBIENTE B: REGIME INVERNALE

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro *PMV* per il regime invernale.

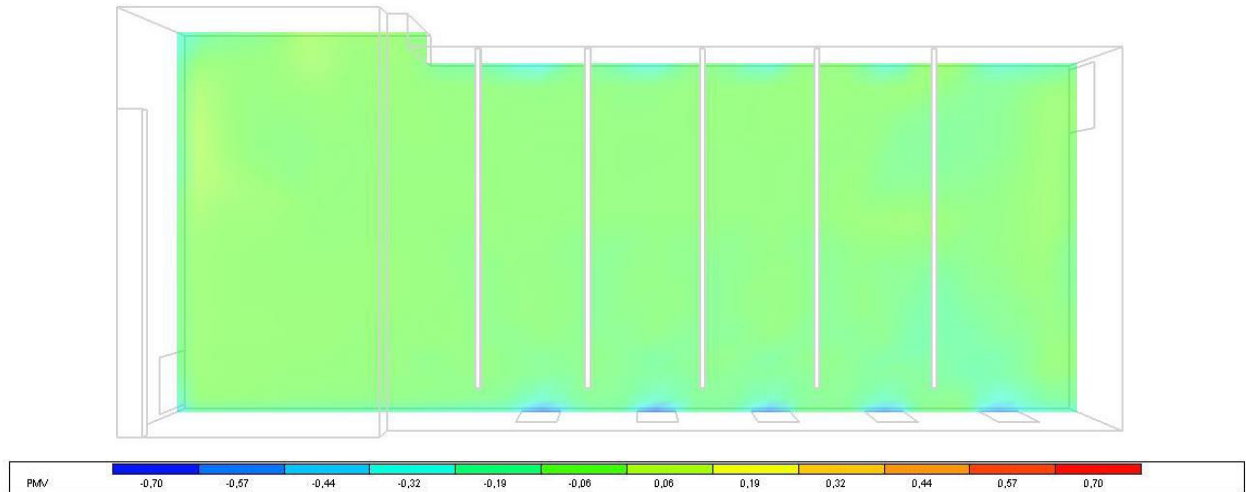


Figura 32 – Ambiente B – PMV regime invernale

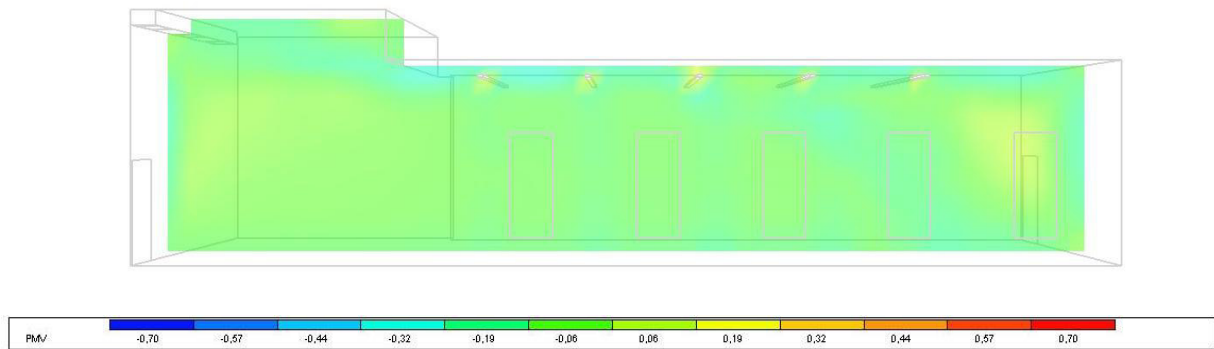


Figura 33 – Ambiente B – PMV regime invernale

Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di *PMV* per le zone occupate varino tra -0,2 e +0,2 corrispondenti alla classe A prevista dalla norma.

#### 4.4.2.2 AMBIENTE B: REGIME ESTIVO

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro *PMV* per il regime estivo.

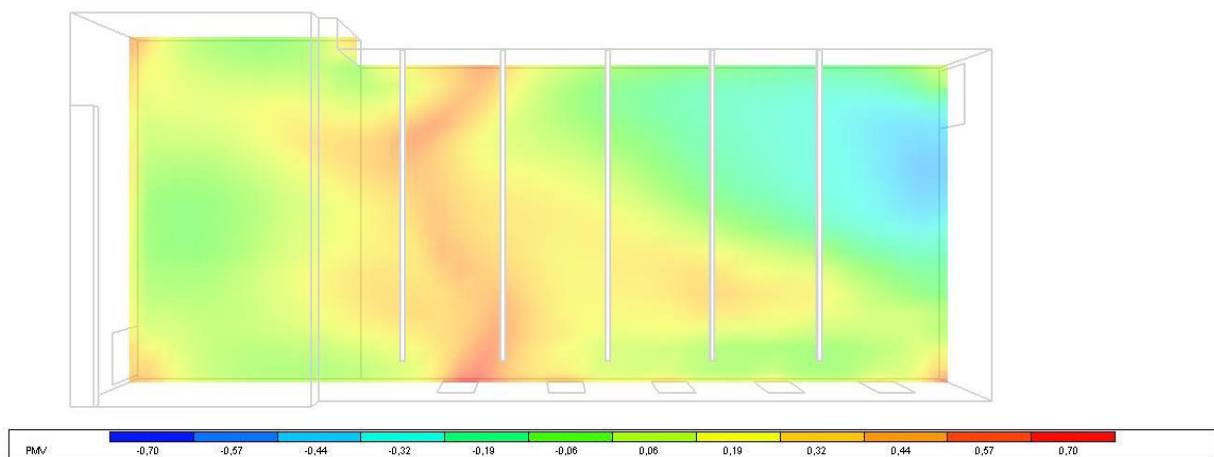


Figura 34 – Ambiente B – PMV regime estivo

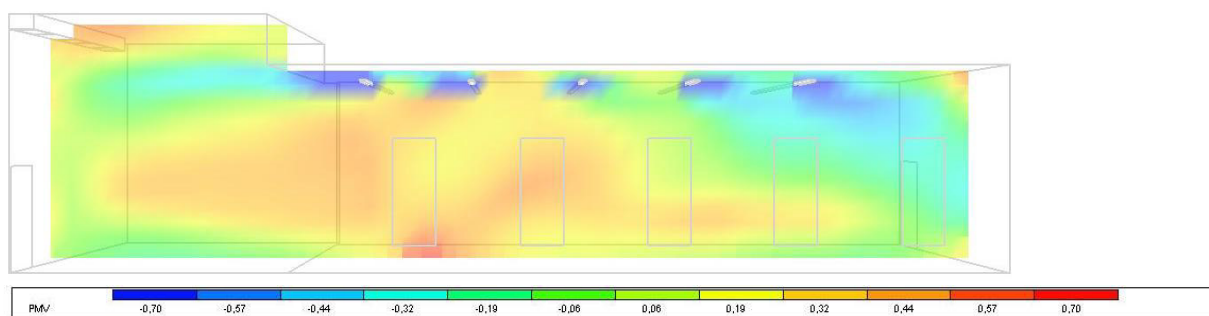


Figura 35 – Ambiente B – PMV regime estivo

Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di *PMV* per le zone occupate varino tra -0,5 e +0,5, corrispondenti alla classe B prevista dalla norma. Si segnala come alcune zone localizzate in corrispondenza del lancio delle bocchette dell'aria presentino valori di *PMV* leggermente inferiori a -0,5. Tuttavia tali zone non sono interessate dall'occupazione continuativa, in quanto zone di passaggio e/o adiacenti alle pareti esterne e quindi non particolarmente rilevanti ai fini del comfort termico. In linea generale si specifica che il progetto esecutivo, occupandosi della selezione puntuale dei terminali d'impianto, dovrà tenere in maggiore considerazione la posizione e l'orientamento di queste bocchette in modo da minimizzare il più possibile il rischio di discomfort.

#### 4.4.3 AMBIENTE C: Piano primo – Sala prove 01-18

L'ambiente in oggetto è localizzato al piano primo della manica prospiciente il lotto ospitante la Biblioteca Civica di Torino (lato nord dell'edificio qui analizzato) ed è stato simulato considerando quanto segue:

- Le pareti verticali che confinano con altri locali situati all'interno del volume climatizzato (e quindi anche quelle di separazione tra i tre locali) sono state ipotizzate adiabatiche e caratterizzate da una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva;
- una parete della zona confina con l'esterno e risulta coibentata dall'esterno mediante realizzazione di un cappotto termico: tale struttura è stata modellata utilizzando una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva. In corrispondenza di tale tamponamento sono presenti dei serramenti dotati di telaio metallico e vetro camera basso emissivo: per tali elementi si è adottata una temperatura invernale pari a 14°C (considerata in assenza di radiazione solare) ed una temperatura estiva pari a 30°C (valutata analizzando il flusso termico entrante in condizioni di massimo irraggiamento solare, tenendo conto inoltre del fattore solare del serramento -  $g_{gl,sh}$  pari al 35%);
- la copertura piana è costituita da un solaio in laterocemento, dotato all'estradosso di strato coibente ed all'intradosso di una controsoffittatura in cartongesso: per tale struttura si è adottata una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva
- il pavimento confina direttamente su altri ambienti interni al volume climatizzato, pertanto presenta una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva.

Da un punto di vista impiantistico, sono presenti i terminali elencati in Tabella 10.

##### 4.4.3.1 AMBIENTE C: REGIME INVERNALE

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro *PMV* per il regime invernale.

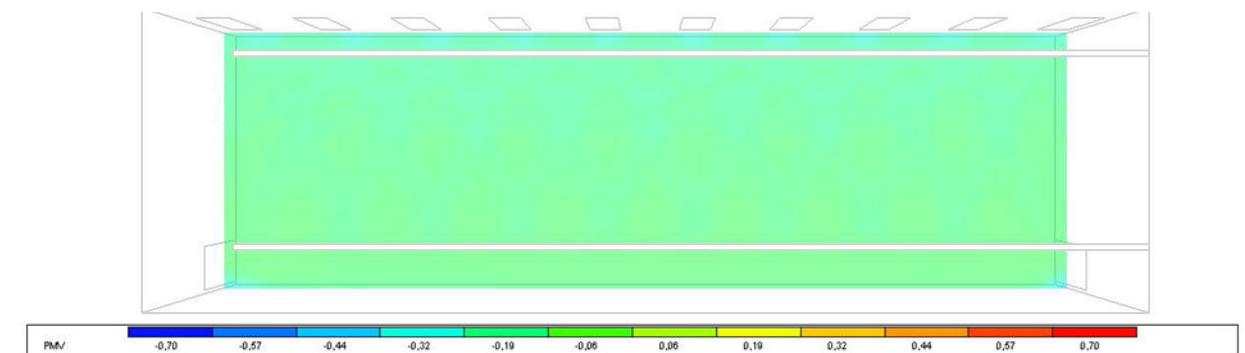


Figura 36 – Ambiente D – PMV regime invernale

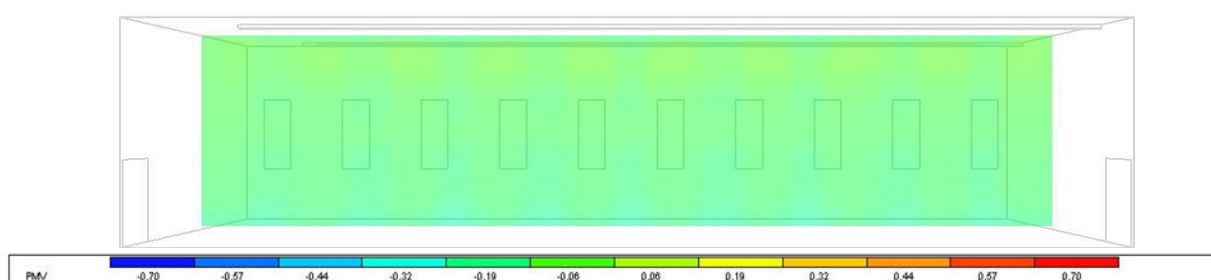


Figura 37 – Ambiente D – PMV regime invernale

Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di *PMV* per le zone occupate varino tra -0,2e +0,2, corrispondenti alla classe A prevista dalla norma.

#### 4.4.3.2 AMBIENTE C: REGIME ESTIVO

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro *PMV* per il regime estivo.

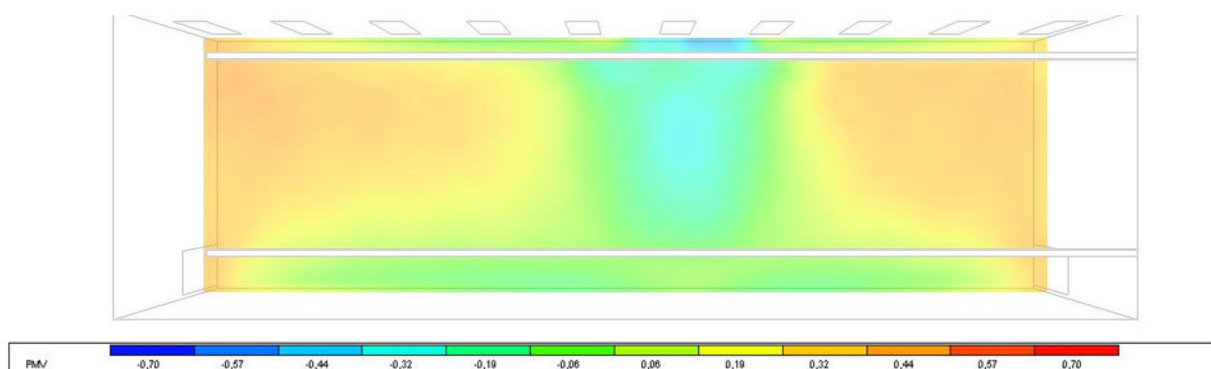


Figura 38 – Ambiente D – PMV regime estivo

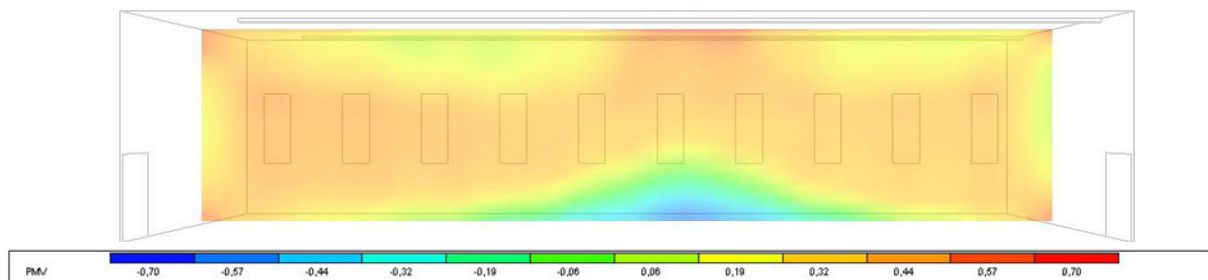


Figura 39 – Ambiente D – PMV regime estivo

Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di *PMV* per le zone occupate varino tra -0,5 e +0,5, corrispondenti alla classe B prevista dalla norma.

#### 4.4.4 AMBIENTE D: Piano primo – Uffici 01-22,01-23,01-24

La zona in oggetto è localizzata al piano primo ed è costituita da tre locali adiacenti, prospicienti tutti via Petrarca (porzione meridionale dell'edificio). Analizzandone l'involucro edilizio, si segnala che:

- Le pareti verticali che confinano con altri locali situati all'interno del volume climatizzato (e quindi anche quelle di separazione tra i tre locali) sono state ipotizzate adiabatiche e caratterizzate da una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva;
- una parete della zona comune ai tre locali confina con l'esterno e risulta coibentata dall'esterno mediante realizzazione di un cappotto termico: tale struttura è stata modellata utilizzando una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva. In corrispondenza di tale tamponamento sono presenti dei serramenti dotati di telaio metallico e vetro camera basso emissivo: per tali elementi si è adottata una temperatura invernale pari a 14°C (considerata in assenza di radiazione solare) ed una temperatura estiva pari a 30°C (valutata analizzando il flusso termico entrante in condizioni di massimo irraggiamento solare, tenendo conto inoltre del fattore solare del serramento -  $g_{gl,sh}$  pari al 35%);
- la copertura piana è costituita da un solaio in laterocemento, dotato all'estradosso di strato coibente ed all'intradosso di una controsoffittatura in cartongesso: per tale struttura si è adottata una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva
- il pavimento confina direttamente su altri ambienti interni al volume climatizzato, pertanto presenta una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva.

Da un punto di vista impiantistico, sono presenti i terminali elencati in Tabella 9.

##### 4.4.4.1 AMBIENTE D: REGIME INVERNALE

Si riporta a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro *PMV* per il regime invernale.

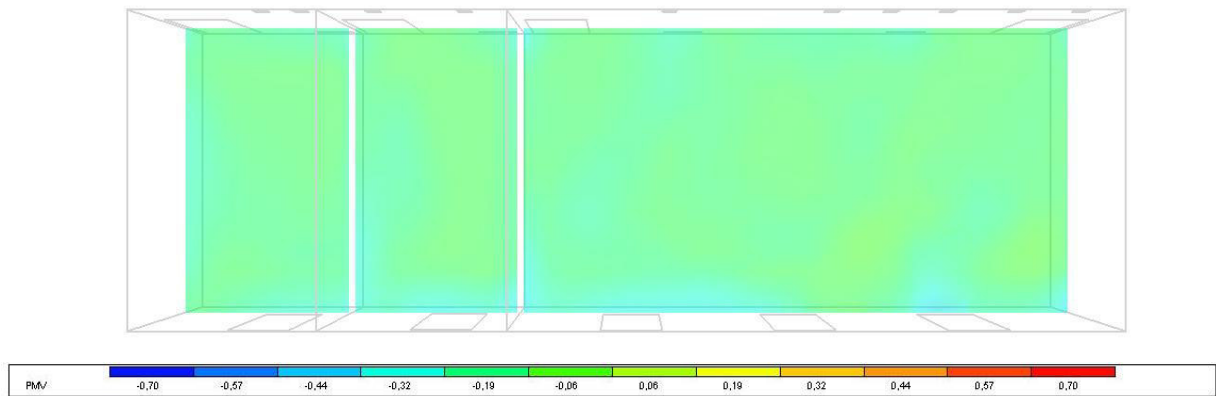


Figura 40 – Ambiente C – PMV regime invernale

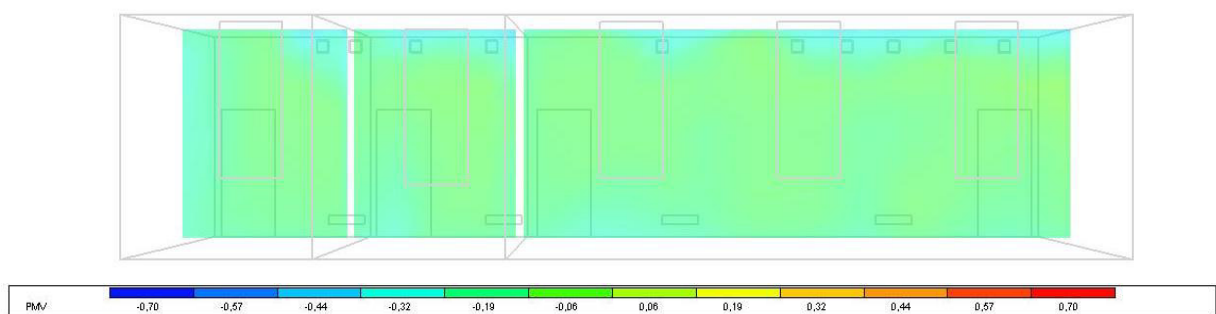


Figura 41 – Ambiente C – PMV regime invernale

Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di  $PMV$  per le zone occupate varino tra  $-0,2$  e  $+0,2$ , corrispondenti alla classe A prevista dalla norma.

#### 4.4.4.2 AMBIENTE D: REGIME ESTIVO

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *DesignBuilder*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione del parametro  $PMV$  per il regime estivo.

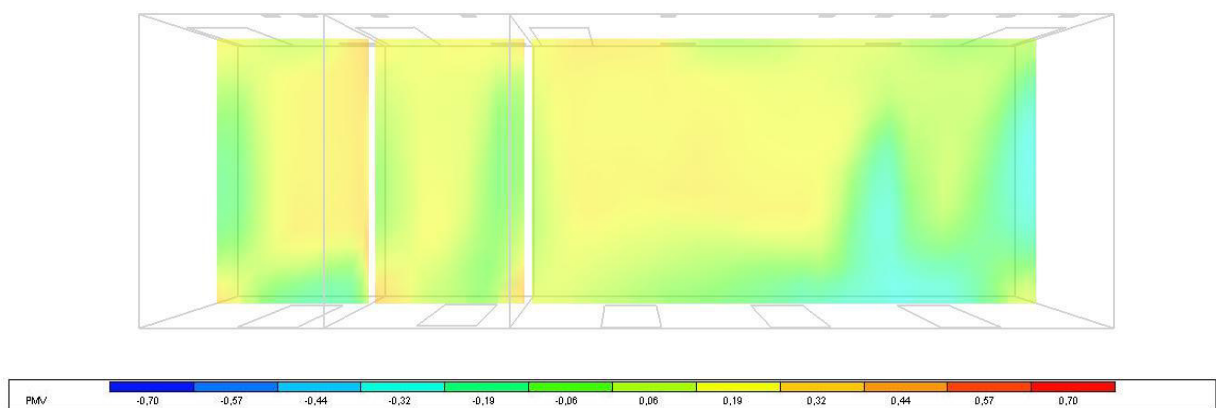


Figura 42 – Ambiente C – PMV regime estivo

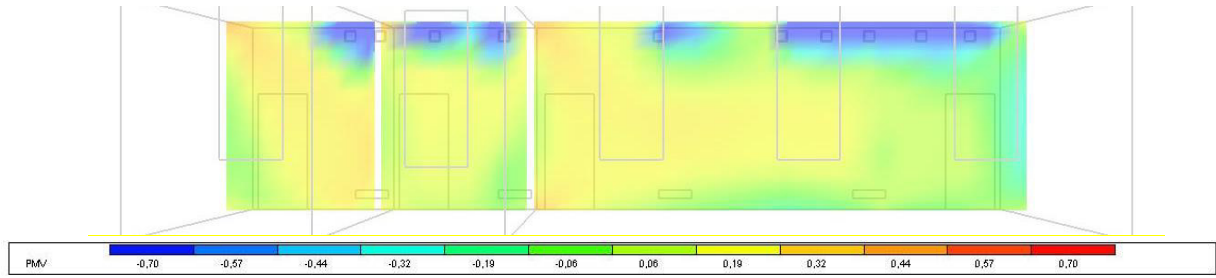


Figura 43 – Ambiente C – PMV regime estivo

Dall'analisi di tali elaborazioni, si evince come i valori di *PMV* per le zone occupate varino tra -0,2 e +0,2, corrispondenti alla classe A prevista dalla norma.

#### 4.5 Discomfort locale

Per i diversi ambienti sono state inoltre valutate le principali cause di discomfort locale in un punto considerato rappresentativo dell'intero ambiente.

Si specifica che i valori riportati nelle tabelle sono ricavati dalle immagini di output del software o, nel caso delle temperature superficiali, dai valori di input impostati. Il calcolo della percentuale di insoddisfatti e l'attribuzione della classe di comfort è effettuato mediante le formule definite dalla norma *UNI EN ISO 7730*.

Tabella 12 – UNI EN ISO 7730

| Category | Thermal state of the body as a whole |                     | Local discomfort |                                     |                              |                   |
|----------|--------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------------|
|          | PPD %                                | PMV                 | DR %             | PD %                                |                              |                   |
|          |                                      |                     |                  | vertical air temperature difference | caused by warm or cool floor | radiant asymmetry |
| A        | < 6                                  | - 0,2 < PMV < + 0,2 | < 10             | < 3                                 | < 10                         | < 5               |
| B        | < 10                                 | - 0,5 < PMV < + 0,5 | < 20             | < 5                                 | < 10                         | < 5               |
| C        | < 15                                 | - 0,7 < PMV < + 0,7 | < 30             | < 10                                | < 15                         | < 10              |

#### Differenza verticale di temperatura

La differenza verticale di temperatura (differenza tra testa e caviglie) è risultata sempre inferiore ai 2 °C per tutti i locali analizzati, sia nelle condizioni invernali che in quelle estive. La percentuale di insoddisfatti (PD%) risulta quindi inferiore al 3% (CLASSE A).

Tabella 13 – Differenza verticale di temperatura – Regime invernale

| LOCALE | TEMPERATURA 0,1 METRI (°C) | TEMPERATURA 1,1 METRI (°C) | ΔT  | PD% | CLASSE |
|--------|----------------------------|----------------------------|-----|-----|--------|
| A      | 21,6                       | 22,2                       | 0,6 | 0,5 | A      |
| B      | 21,6                       | 21,9                       | 0,3 | 0,4 | A      |
| C      | 21,1                       | 21,6                       | 0,5 | 0,5 | A      |
| D      | 21,9                       | 22,2                       | 0,3 | 0,4 | A      |

Tabella 14 – Differenza verticale di temperatura – Regime estivo

| LOCALE | TEMPERATURA 0,1 METRI (°C) | TEMPERATURA 1,1 METRI (°C) | ΔT  | PD% | CLASSE |
|--------|----------------------------|----------------------------|-----|-----|--------|
| A      | 24,9                       | 23,4                       | 1,5 | 1,1 | A      |
| B      | 25                         | 23,9                       | 1,1 | 0,8 | A      |
| C      | 22,7                       | 23,5                       | 0,8 | 0,6 | A      |
| D      | 22,7                       | 22,3                       | 0,4 | 0,4 | A      |

#### Pavimento con temperatura eccessivamente bassa o alta

I valori di temperatura superficiale considerati per il pavimento, nelle condizioni invernali ed estive più gravose, consentono di far rientrare i diversi ambienti nelle categorie A di comfort in quanto la percentuale di insoddisfatti risulta inferiore al 10%.



Tabella 15 – Pavimento troppo caldo o troppo freddo – Regime invernale

| LOCALE | TEMPERATURA PAVIMENTO (°C) | PD% | CLASSE |
|--------|----------------------------|-----|--------|
| A      | 20                         | 7,9 | A      |
| B      | 20                         | 7,9 | A      |
| C      | 20                         | 7,9 | A      |
| D      | 20                         | 7,9 | A      |

Tabella 16 – Pavimento troppo caldo o troppo freddo – Regime estivo

| LOCALE | TEMPERATURA PAVIMENTO (°C) | PD% | CLASSE |
|--------|----------------------------|-----|--------|
| A      | 26                         | 6,2 | A      |
| B      | 26                         | 6,2 | A      |
| C      | 26                         | 6,2 | A      |
| D      | 26                         | 6,2 | A      |

### Correnti d'aria.

I valori di velocità dell'aria (m/s) in prossimità delle postazioni di lavoro sono contenuti e sempre inferiori a 0,3 m/s. Non si evidenziano, di conseguenza, cause di discomfort locale legate a correnti d'aria. La percentuale di insoddisfatti risulta sempre inferiore al 20% (CLASSE A o CLASSE B).

Tabella 17 – Rischio da correnti d'aria – Regime invernale

| LOCALE | TEMPERATURA ARIA (°C) | VELOCITÀ ARIA (M/S) | INTENSITÀ DI TURBOLENZA (%) | PD% | CLASSE |
|--------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|-----|--------|
| A      | 22,2                  | 0,14                | 40                          | 8,4 | A      |
| B      | 21,9                  | 0,08                | 40                          | 4,3 | A      |
| C      | 22,2                  | 0,05                | 40                          | 0,5 | A      |
| D      | 21,6                  | 0,15                | 40                          | 9,0 | A      |

Tabella 18 – Rischio da correnti d'aria – Regime estivo

| LOCALE | TEMPERATURA ARIA (°C) | VELOCITÀ ARIA (M/S) | INTENSITÀ DI TURBOLENZA (%) | PD%  | CLASSE |
|--------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|------|--------|
| A      | 23,4                  | 0,28                | 40                          | 13,6 | B      |
| B      | 23,9                  | 0,28                | 40                          | 12,9 | B      |
| C      | 23,5                  | 0,21                | 40                          | 10,7 | B      |
| D      | 22,3                  | 0,15                | 40                          | 8,9  | A      |

### Asimmetria radiante

Le persone sono maggiormente sensibili all'asimmetria radiante causata da soffitti caldi o pareti e finestre fredde. I valori di temperatura superficiale di soffitti e serramenti considerati per le simulazioni, consentono di escludere la presenza di cause di discomfort locale legato ad asimmetria radiante.

## 4.6 Risultati dei calcoli: software Vento AEC

### 4.6.1 AMBIENTE E: piano terreno e primo – Sala principale

#### 4.6.1.1 Definizione delle condizioni al contorno

L'ambiente in oggetto è localizzato prevalentemente al piano terreno dell'edificio ed è caratterizzato da un'altezza interna elevata (pari a oltre 10 m per quanto concerne la platea e a oltre 25 m per la torre scenica). Analizzandone l'involucro edilizio, si segnala che:

- le pareti opache che confinano con altri ambienti climatizzati sono caratterizzate da una temperatura superficiale pari a 20°C per la stagione invernale e 26°C per quella estiva;
- le pareti confinati con l'esterno presentano una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva;
- la copertura della platea è costituita da una struttura leggera, disperdente verso locali non climatizzati direttamente, racchiusi da superfici disperdenti verso l'esterno coibentate, ventilate e altamente riflettenti (temperatura interna prossima a quella degli ambienti sottostanti), per tale struttura si è adottata una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva;
- copertura della torre scenica costituita da soletta in laterocemento coibentata all'estradosso e dotata di finitura altamente riflettente, caratterizzata da una temperatura superficiale pari a 19°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva;
- solaio contro-terra di pavimento della platea dotato di intercapedine e di strato coibente, caratterizzato da una temperatura superficiale pari a 18°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva;
- solaio del palco e della torre scenica disperdente principalmente su locali tecnici non climatizzati, dotato di isolamento termico all'intradosso, caratterizzato da una temperatura superficiale pari a 18°C per la stagione invernale e 27°C per quella estiva;

Da un punto di vista impiantistico, sono presenti due diverse tipologie di terminali ad aria:

- per la zona occupata dal pubblico del teatro (galleria e platea) sono presenti delle bocchette a filo pavimento a getto verticale ad elevata miscelazione, localizzate in corrispondenza di ogni seduta (portate e temperature di funzionamento come da Tabella 11);
- per quanto concerne il palco e la torre scenica sono presenti lungo il perimetro del locale dei canali microforati ad una quota maggiore rispetto a quella effettivamente occupata durante le rappresentazioni (portate e temperature di funzionamento come da Tabella 11);

Per poter analizzare la distribuzione spaziale delle condizioni termo-igrometriche dell'aria all'interno della *Sala principale* (condizioni alla base delle valutazioni di comfort ivi descritte), si sono eseguite due diverse tipologie di simulazioni, denominate *Simulazione generale* e *Simulazione di dettaglio*.

Per quanto concerne la prima (denominata *Simulazione generale*), si è modellato l'intero volume climatizzato, comprensivo sia della platea, che della galleria e del palco. In questo caso, l'emissione di aria climatizzata operata in corrispondenza delle singole bocchette sotto poltrona è stata ridistribuita uniformemente in corrispondenza delle singole file di sedute, mantenendo inalterato il volume globalmente immesso (la validità di tale ipotesi trova conferma nei risultati della *Simulazione di dettaglio* descritta più avanti nel presente documento). Per quanto concerne invece i canali microforati localizzati in corrispondenza del palco, questi sono stati simulati utilizzando dei getti puntuali, distribuiti uniformemente sui canali stessi, anche in questo caso la portata complessiva è stata modellata pari a quella prevista a livello progettuale. Si specifica che le simulazioni generali sono state effettuate al fine di analizzare i moti d'aria che si creano all'interno del grande volume della sala per effetto del lavoro simultaneo dei due impianti (bocchette a pavimento e canali microforati della torre scenica) e individuare eventuali criticità e aspetti che dovranno essere oggetto di ulteriore approfondimento durante la progettazione esecutiva degli impianti.

Sono state individuate due diverse configurazioni da testare:

- regime invernale: modellazione effettuata senza includere l'apporto termico delle persone presenti in sala così da testare l'impianto nelle condizioni più gravose;
- regime estivo: è stata ipotizzata la presenza di pubblico (massimo affollamento consentito), in quanto il relativo apporto termico sensibile costituisce un aggravio di carico per il raggiungimento di condizioni di comfort.

Oltre a quanto sopra riportato, si è sviluppata una seconda simulazione CFD, denominata *Simulazione di dettaglio*, la quale analizza a livello locale l'andamento della velocità e della temperatura dell'aria in corrispondenza delle bocchette d'immissione localizzate a pavimento in corrispondenza delle sedute degli spettatori. Per le singole postazioni è stato calcolato il valore di PMV ai fini della verifica del comfort ai sensi del criterio 2.4.6 Benessere termico dei CAM.

All'interno delle immagini sotto riportate sono contenute alcune viste della *Sala principale*, ricavate direttamente dal modello 3D sviluppato per permettere lo svolgimento della simulazione.

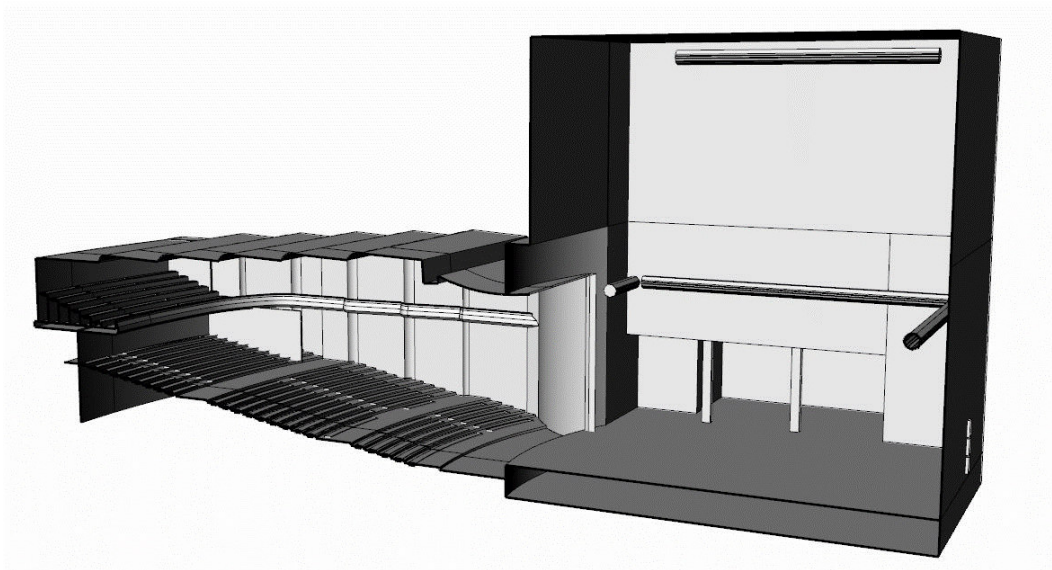


Figura 44 – Ambiente E (Sala principale) – geometria oggetto di modellazione (Simulazione generale)

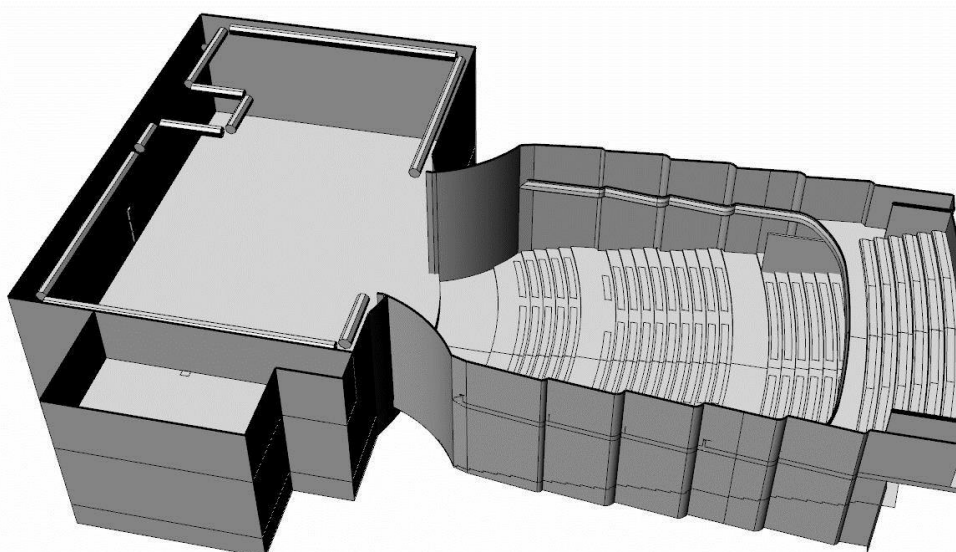


Figura 45 – Ambiente E (Sala principale) – geometria oggetto di modellazione (Simulazione generale)

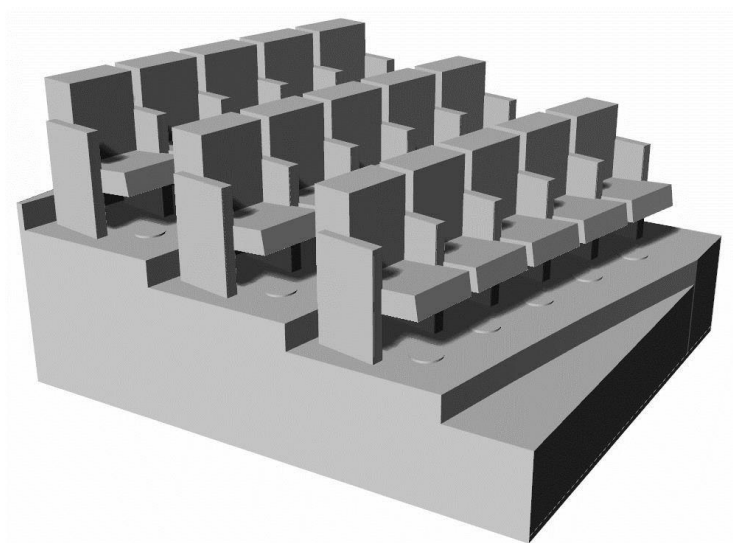


Figura 46 – Ambiente E (Sala principale) – geometria oggetto di modellazione (Simulazione di dettaglio)

## 4.6.2 Risultati della Simulazione generale

### 4.6.2.1 AMBIENTE E: REGIME INVERNALE

Si riportano a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *Vento AEC*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione della velocità dell'aria in ambiente per il regime invernale.

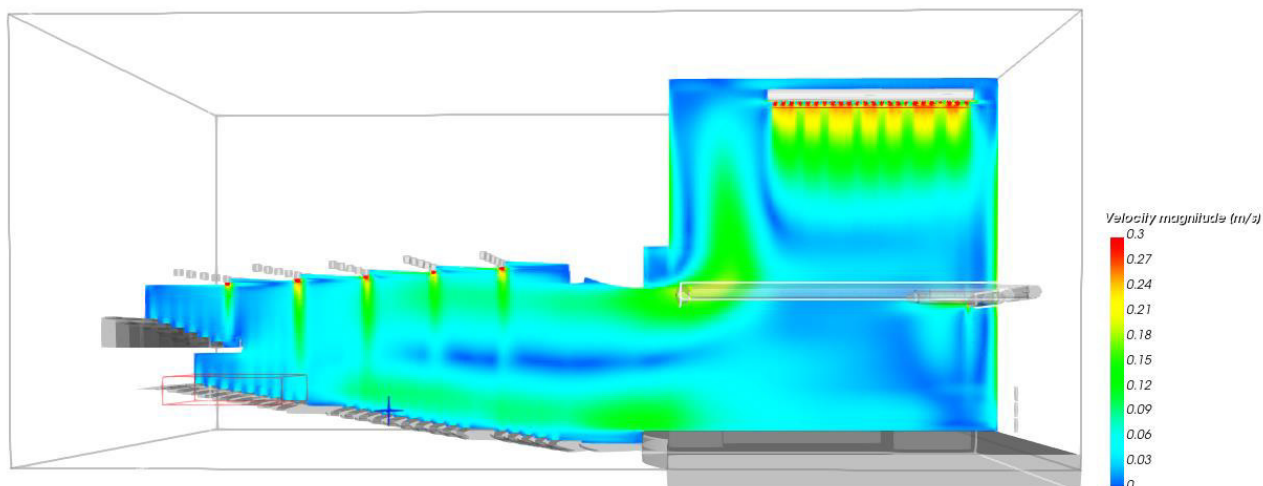


Figura 47 – Ambiente E – velocità dell'aria in regime invernale

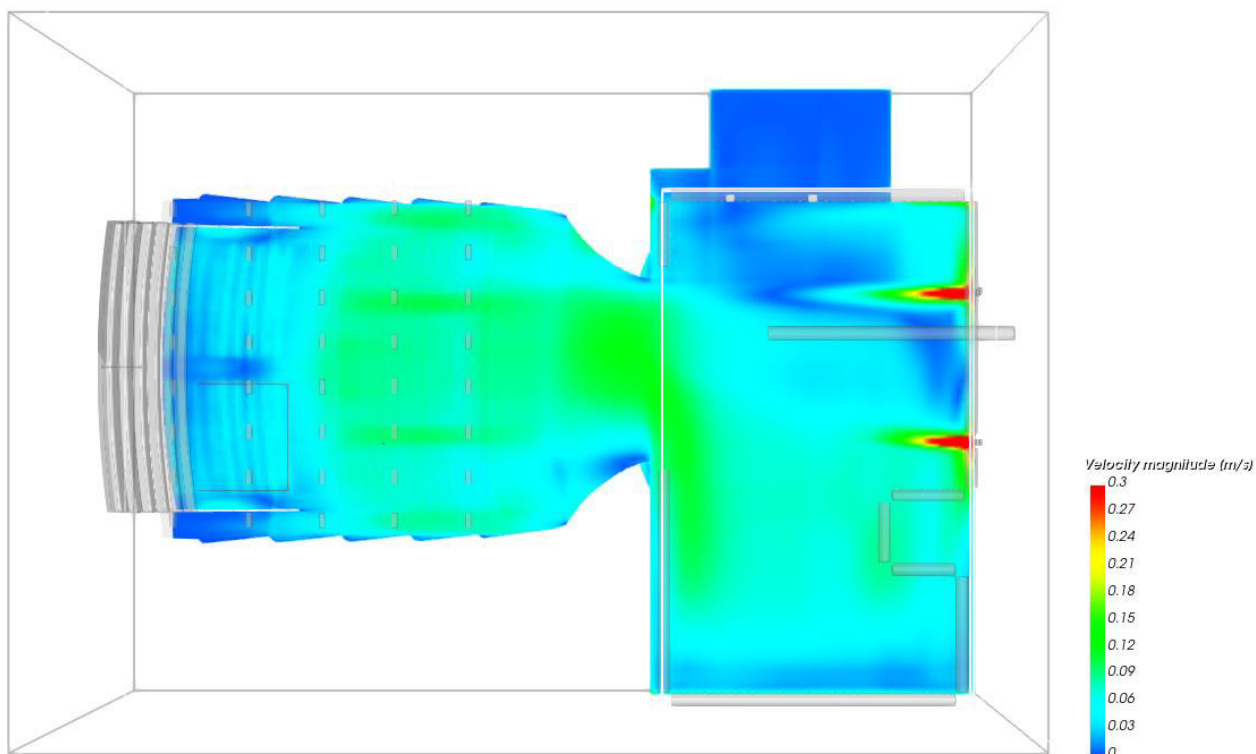


Figura 48 – Ambiente E – velocità dell'aria in regime invernale

Oltre ai dati sopra rappresentati, si riporta a seguire la distribuzione spaziale della temperatura dell'aria, ottenuta anch'essa mediante simulazione CFD con il software di calcolo *Vento AEC* per il regime invernale.

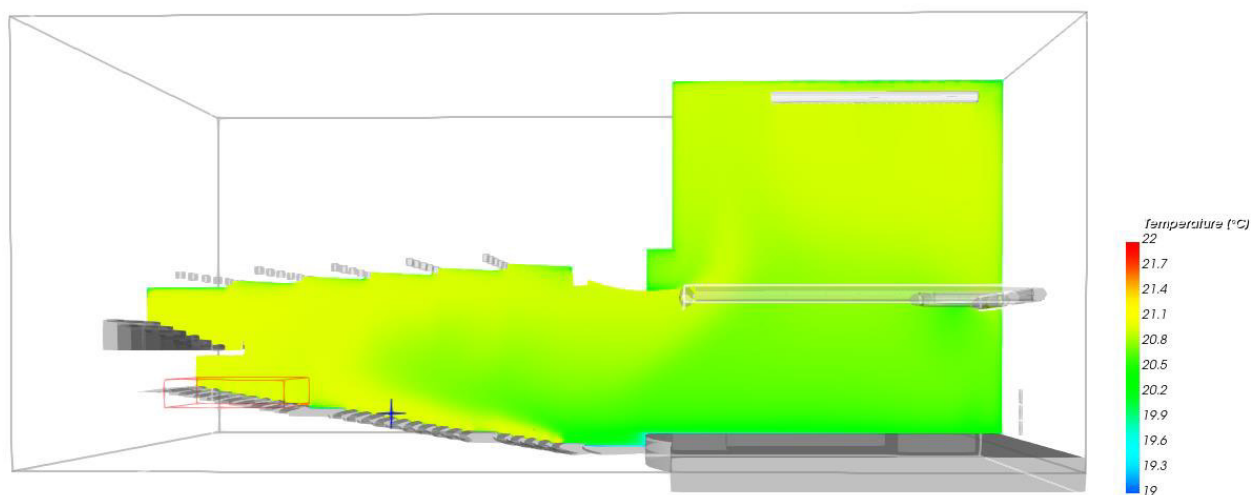


Figura 49 – Ambiente E – temperatura dell'aria in regime invernale

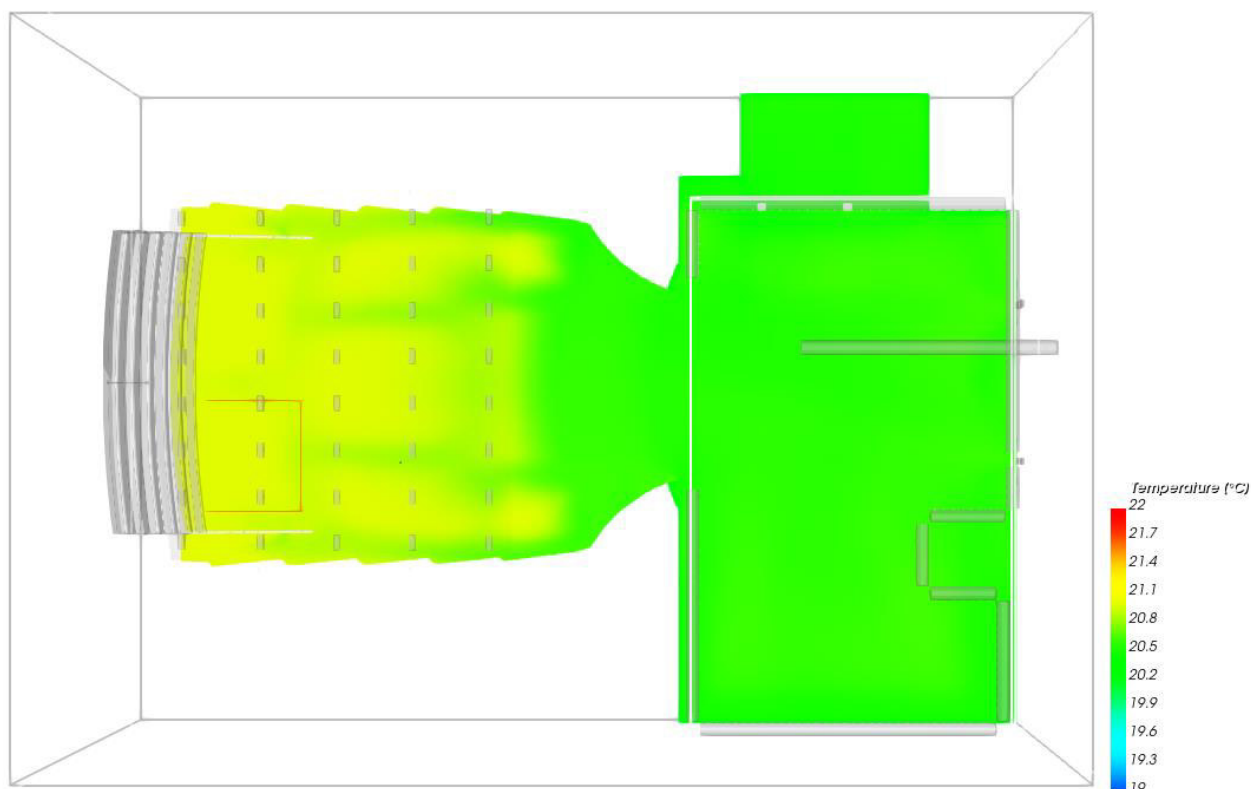


Figura 50 – Ambiente E – temperatura dell'aria in regime invernale

Dall'analisi dei dati sopra rappresentati, è possibile osservare come:

- all'interno della zona occupata, la velocità dell'aria presenta valori compresi tra 0 e 0,2 m/s;
- la temperatura dell'aria è abbastanza uniforme e presenta un valore medio pari a circa 20,5 – 21 °C.

#### 4.6.2.2 AMBIENTE E: REGIME ESTIVO

Analogamente a quanto riportato per il regime invernale, sono rappresentati a seguire alcuni estratti dal software di calcolo *Vento AEC*, in cui sono rappresentate le mappe relative alla distribuzione della velocità dell'aria in ambiente per il regime estivo.

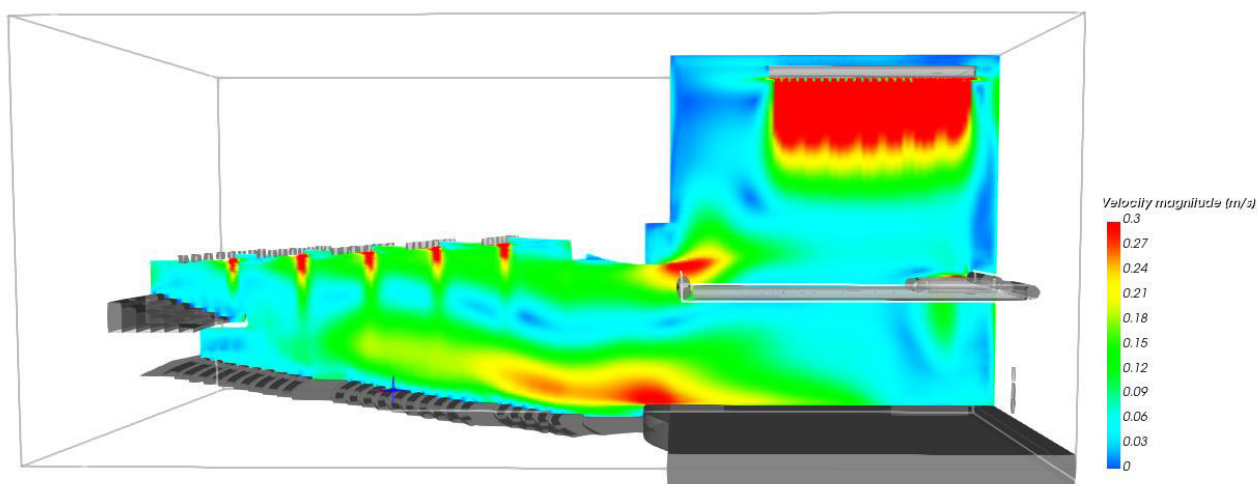


Figura 51 – Ambiente E – velocità dell'aria in regime estivo

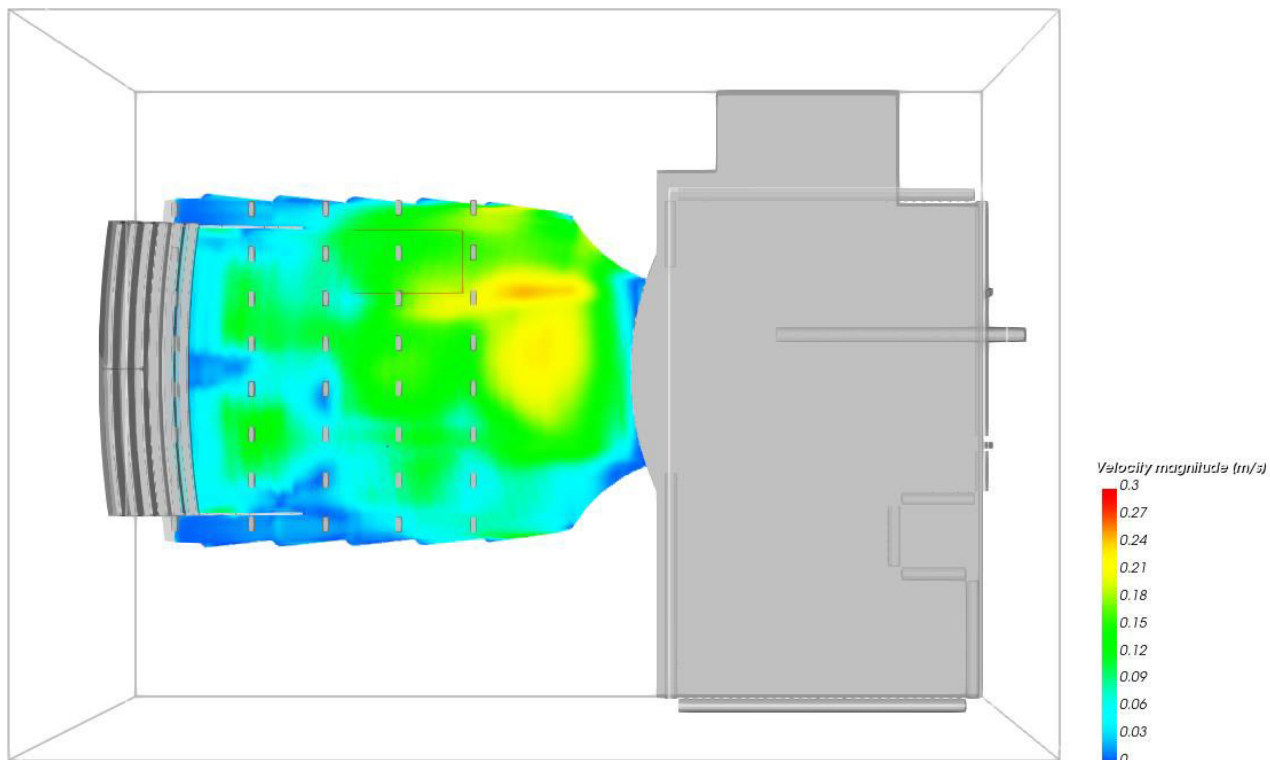


Figura 52 – Ambiente E – velocità dell'aria in regime estivo (platea)

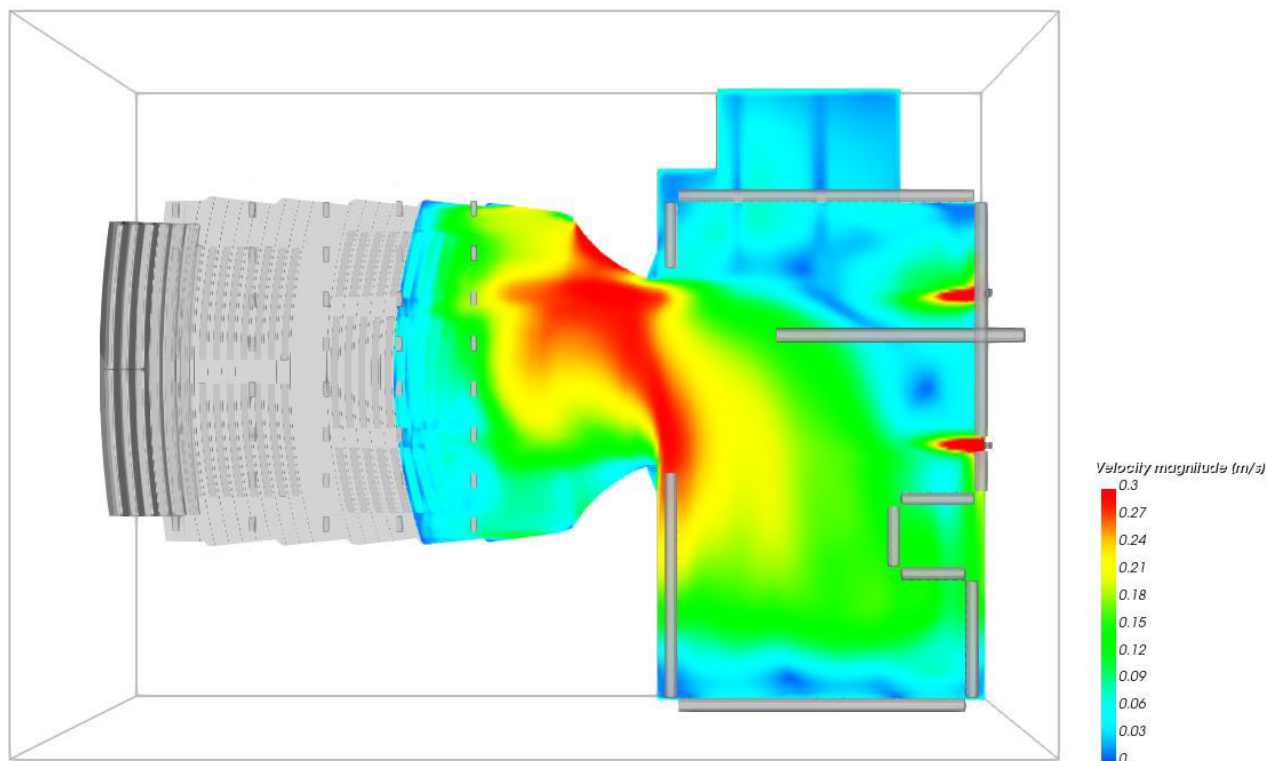
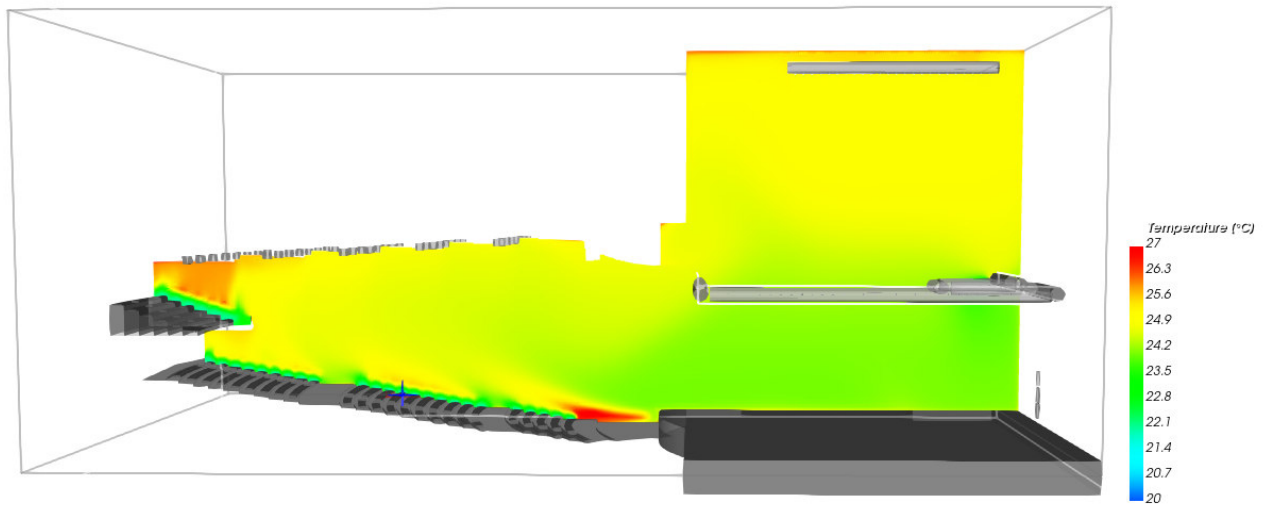
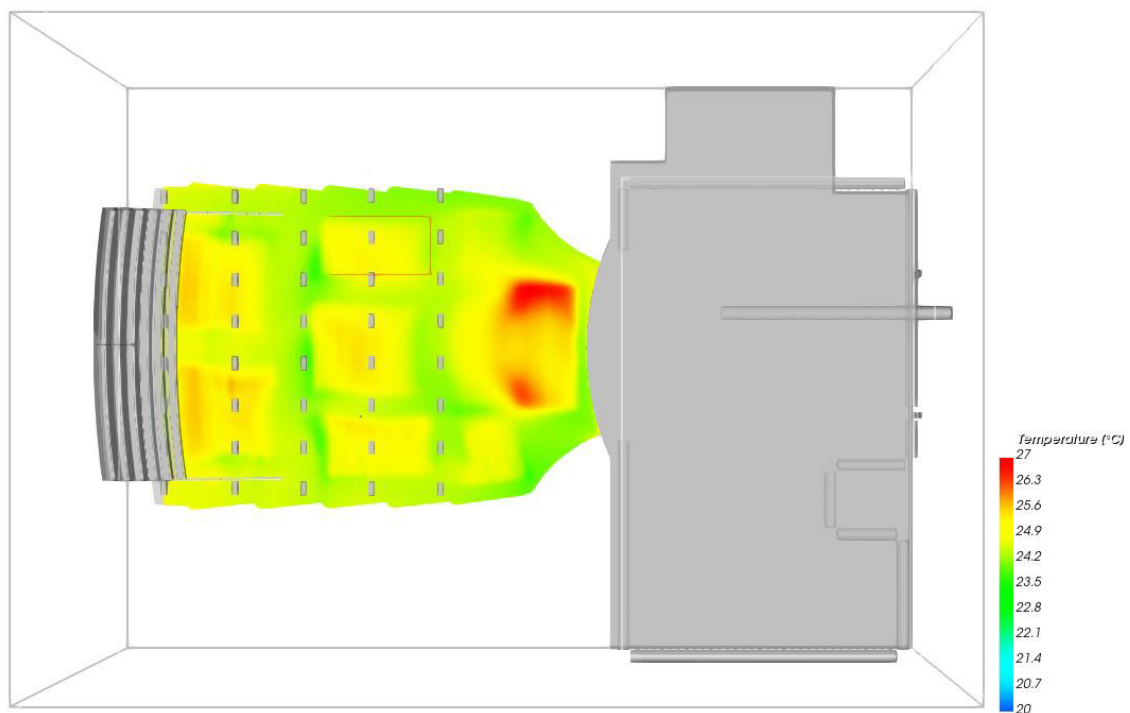


Figura 53 – Ambiente E – velocità dell'aria in regime estivo (quota palcoscenico)

Oltre ai dati sopra rappresentati, si riporta a seguire la distribuzione spaziale della temperatura dell'aria, ottenuta anch'essa mediante simulazione CFD con il software di calcolo *Vento AEC* per il regime estivo.



*Figura 54 – Ambiente E – temperatura dell'aria in regime estivo*



*Figura 55 – Ambiente E – temperatura dell'aria in regime estivo (platea)*



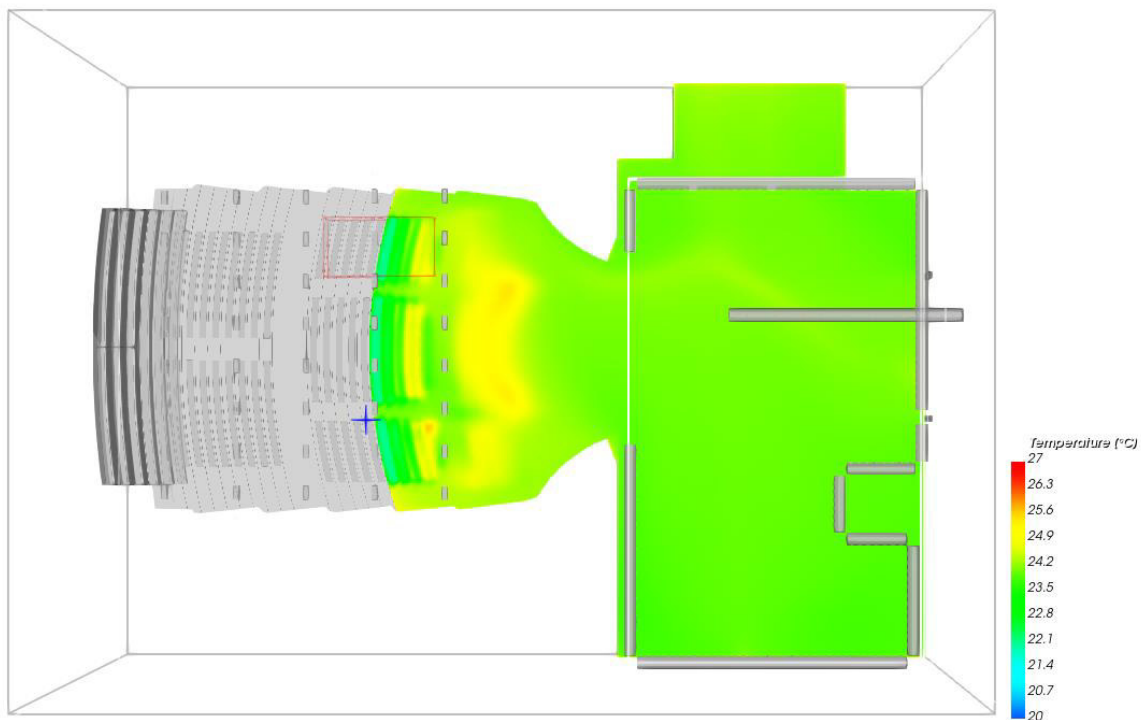


Figura 56 – Ambiente E – temperatura dell'aria in regime estivo (quota palcoscenico)

Dall'analisi dei dati sopra rappresentati, è possibile osservare come:

- all'interno della zona occupata, la velocità dell'aria presenta valori compresi tra 0 e 0,25 m/s;
- la temperatura dell'aria è abbastanza uniforme e presenta un valore medio pari a circa 24,5°C.

#### 4.6.3 Risultati della *Simulazione di dettaglio*

Per quanto concerne la Sala principale, è stato svolto un approfondimento circa il comportamento termo-fluidico dell'aria in corrispondenza delle sedute e delle bocchette di immissione localizzate a pavimento. Tale operazione in particolare è finalizzata a valutare il comportamento di tali bocchette e le conseguenze del loro funzionamento sulla velocità dell'aria in corrispondenza delle zone effettivamente occupate. Nelle immagini sotto riportate è descritto l'andamento della velocità di tale porzione di ambiente, ricavato mediante simulazione *CFD* effettuata con software *VENTO AEC*, sia per il regime invernale che per quello estivo.

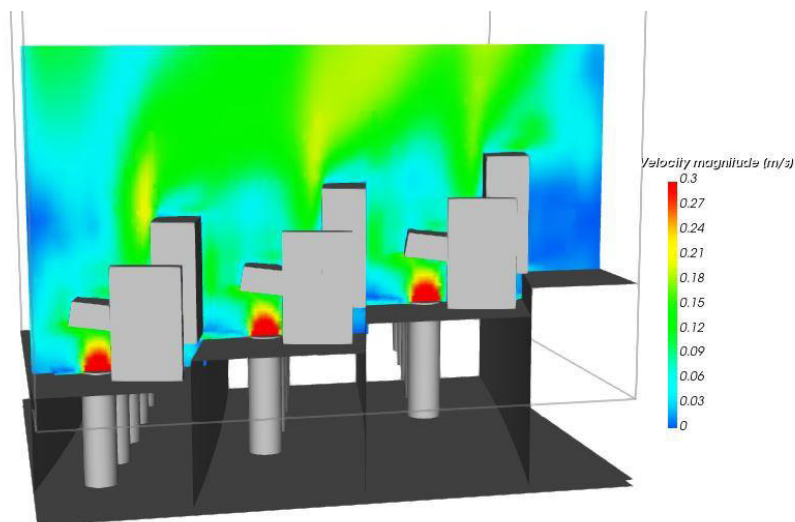


Figura 57 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – velocità dell'aria in regime invernale

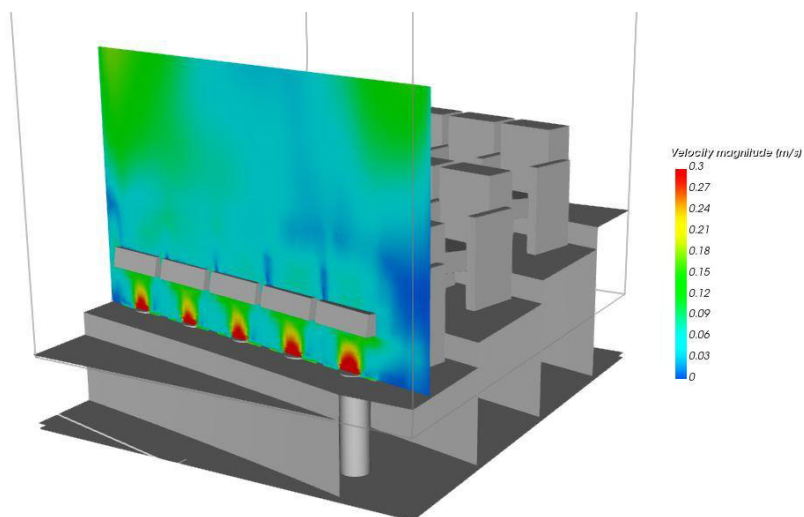


Figura 58 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – velocità dell'aria in regime invernale

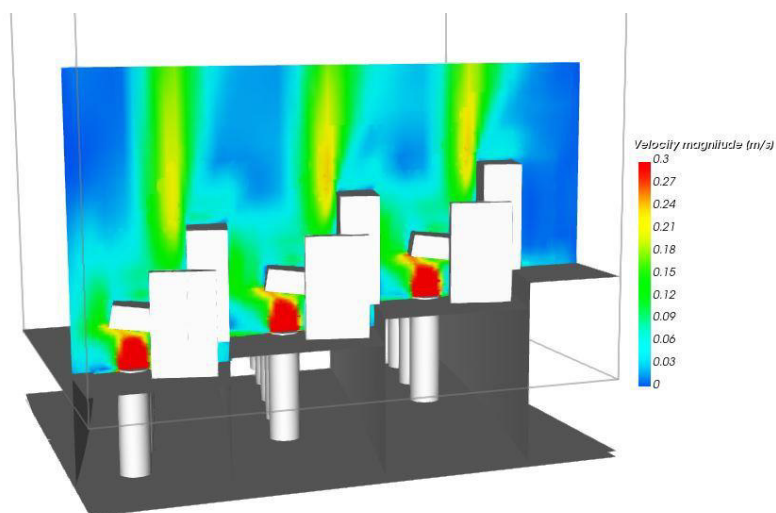


Figura 59 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – velocità dell'aria in regime estivo

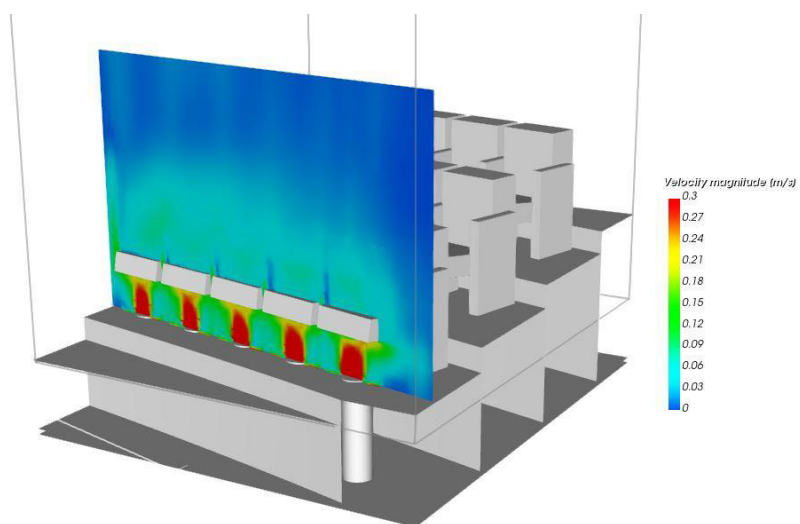


Figura 60 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – velocità dell'aria in regime estivo

Analogamente a quanto effettuato per la velocità, la medesima simulazione ha permesso di determinare le temperature dell'aria nelle diverse configurazioni (invernale ed estiva). I risultati di tali simulazioni sono riportati nelle immagini a seguire.

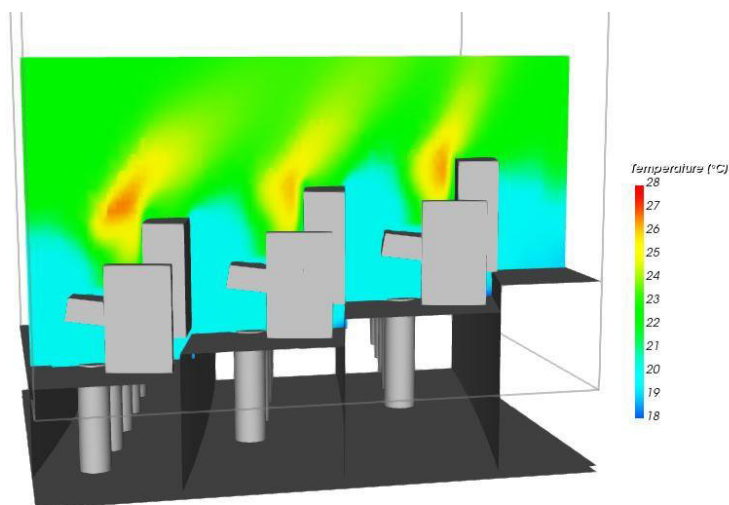


Figura 61 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – temperatura dell'aria in regime invernale

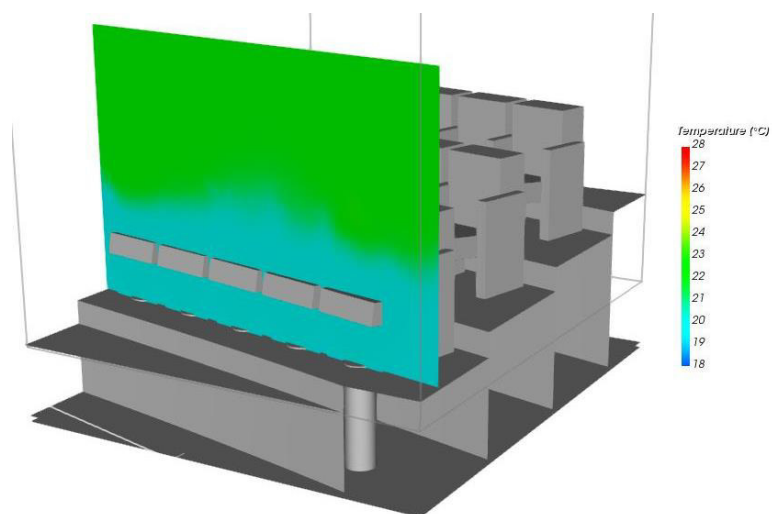


Figura 62 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – temperatura dell'aria in regime invernale

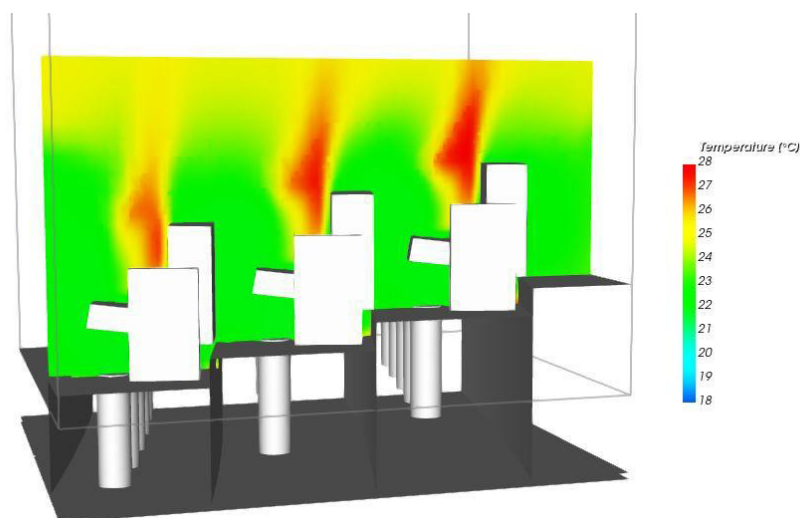


Figura 63 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – temperatura dell'aria in regime estivo

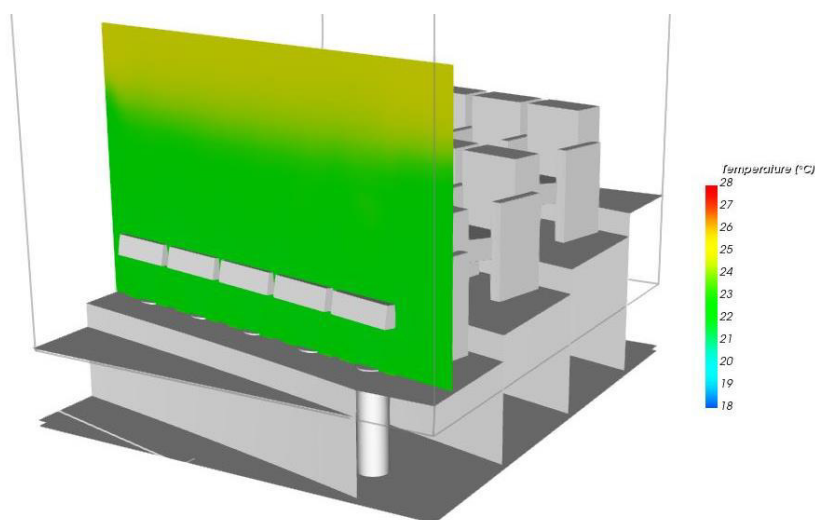


Figura 64 – Ambiente E (Simulazione di dettaglio) – temperatura dell'aria in regime estivo

In merito ai risultati sopra riportati, si segnala come in corrispondenza delle singole sedute sia stata imputata un'emissione di calore analoga a quella emessa da una persona: ciò comporta che l'aria localizzata in corrispondenza di tale elemento si surriscaldi e tenda a migrare verso la parte superiore dell'ambiente. Tale fenomeno avviene sia durante il periodo estivo che durante quello invernale.

Si riportano di seguito i valori di PMV calcolati dal software in corrispondenza di una poltrona e considerando un valore di temperatura media radiante pari a 18,7°C in regime invernale e 26,8°C in regime estivo (valore stimato a partire da modellazioni semplificate effettuate mediante il software *DesignBuilder*).

| REGIME    | TA [°C] | TMR [°C] | UR [-] | VELOCITÀ ARIA [m/s] | TASSO METABOLICO [MET] | ABBIGLIAMENTO [CLO] | PMV   | PPD |
|-----------|---------|----------|--------|---------------------|------------------------|---------------------|-------|-----|
| INVERNALE | 21,6    | 18,7     | 50%    | 0,07                | 1,2                    | 1                   | -0,24 | 6,2 |
| ESTIVO    | 23,     | 26,8     | 50%    | 0,07                | 1,2                    | 0,7                 | 0,40  | 8,4 |

#### 4.6.4 Ulteriori indicazioni relative alla *Sala principale*

Oltre alle simulazioni presentate all'interno dei paragrafi precedenti, sono stati svolti degli approfondimenti circa i moti d'aria che potrebbero caratterizzare l'ambiente in questione in presenza del pubblico.

In merito, si segnala come, in particolari condizioni, l'emissione di calore apportata dal pubblico in sala potrebbe potenzialmente comportare l'insorgere di correnti ascensionali, le quali sfogherebbero all'interno della torre scenica. Tale massa d'aria, una volta raffreddata, raggiungerebbe la quota pavimento del palco, sfogando sulla sala. Ciò causerebbe la potenziale creazione di una corrente d'aria con velocità dell'ordine di 0,3 m/s in prossimità delle prime file di spettatori.

Visto il livello di dettaglio caratterizzante la fase progettuale in corso, non è stato possibile implementare all'interno delle simulazioni arredi ed attrezzature sceniche (quinte, sipario, macchine sceniche, strutture metalliche, etc), le quali si ipotizza ridurrebbero anche sensibilmente le problematiche sopra esposte. **Si demanda pertanto alla fase di progettazione esecutiva, l'implementazione delle parti mobili nelle modellazioni e l'individuazione, qualora necessarie, di soluzioni attive (ad esempio, ottimizzando tecnicamente il canale con funzione destratificatore) e/o passive per ridurre l'eventuale velocità residua in corrispondenza degli spettatori, la quale non dovrà essere superiore a 0,2 m/s durante le fasi di riscaldamento e 0,3 m/s durante il raffrescamento.**

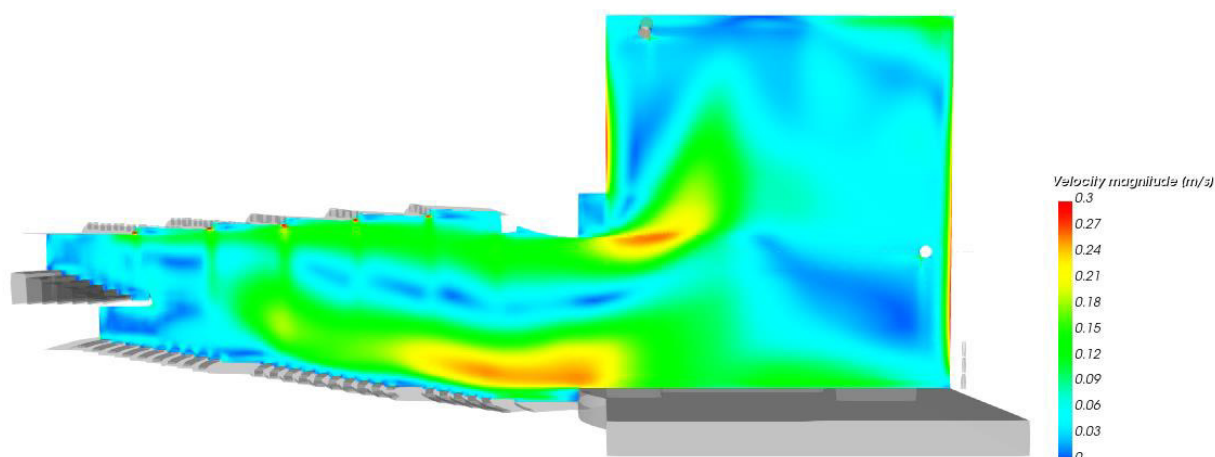


Figura 65 – Ambiente E – regime invernale (affollamento e impianti torre scenica non in funzione) – velocità dell'aria

## 4.7 Conclusioni

Le attività condotte per la verifica del comfort e illustrate nella presente relazione, permettono di accertare, per tutti gli ambienti significativi testati, la rispondenza alla *classe B* della norma *UNI EN ISO 7730:2006* così come prescritto dai *Criteri Ambientali Minimi*. L'analisi condotta non ha evidenziato, inoltre, la presenza di particolari cause di discomfort locale.

Le verifiche sono state condotte con riferimento ai dati resi disponibili dal livello di approfondimento progettuale eseguito in questa fase. I successivi livelli di progettazione permetteranno di disporre di dati più dettagliati con i quali si dovranno affinare e confermare i risultati delle simulazioni qui riportati, con particolare riferimento alle situazioni che hanno evidenziato delle potenziali criticità.

In particolare si rimanda a quanto riportato all'interno del paragrafo 4.6.4 riguardante la *Sala principale*. In merito sarà necessario con le successive fasi di progettazione, tenere conto degli arredi di scena e delle strumentazioni presenti, così da indagare ulteriormente la possibile creazione di correnti d'aria in corrispondenza delle prime file della platea ed eventualmente definire delle soluzioni (attive e/o passive) atte alla mitigazione del fenomeno.

Il presente elaborato fissa i requisiti prestazionali che dovranno essere rispettati nelle successive fasi di sviluppo del progetto e (successivamente) della sua realizzazione, soprattutto in termini di isolamento dell'involucro e caratteristiche dei serramenti, oltre che di velocità dell'aria nell'ambiente occupato. In particolare, relativamente a questo ultimo punto, si ribadisce che la velocità dell'aria nelle zone occupate non dovrà essere superiore ai 0,2 m/s durante la fase di riscaldamento e ai 0,3 m/s durante quella di raffrescamento. Tali obiettivi dovranno essere garantiti mediante la selezione di terminali di impianto idonei, in linea con le indicazioni del presente progetto.