

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Energetica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare



Tesi di Laurea Magistrale

MODELLAZIONE IN REGIME DINAMICO DI UNO SPAZIO MULTISALA PER CONCERTI E PROSA: IPOTESI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO

Relatore

Prof. Marco Carlo Masoero

Correlatore

Ing. Laura Rietto

Candidata

Laura Cafagna

Anno Accademico 2018-2019

Per la preziosa collaborazione ringrazio il Professor Marco Masoero e l'Ing. Laura Rietto.

Ringrazio inoltre l'Azienda Speciale Multiservizi di Venaria Reale e la Fondazione Via Maestra per la disponibilità che mi è stata riservata.

*A Luca,
perché in silenzio
te l'avevo promesso.*

Indice

1. Sommario.....	1
2. Introduzione	2
2.1. Efficienza energetica: contesto legislativo.....	3
2.1.1. In Europa	3
2.1.2. In Italia	4
2.2. La diagnosi energetica	9
2.2.1. Il pacchetto normativo	9
2.2.2. La simulazione energetica degli edifici	12
3. Il Teatro della Concordia di Venaria.....	15
3.1. Analisi generale dello spazio fisico	15
3.2. Descrizione tecnica dell'edificio	17
3.2.1. Caratteristiche dell'involucro	17
3.2.2. Centrale elettrica e produzione fotovoltaica.....	21
3.2.3. Centrale termica	22
3.2.4. Impianto di condizionamento	23
3.2.5. Impianto di illuminazione	29
4. Software Design Builder.....	30
4.1. Simulazione termodinamica.....	30
4.2. Modello grafico 3D	31
4.3. Dati climatici	32
5. Implementazione con Design Builder	34
5.1. Il modello .gbXML, da OpenStudio a Design Builder	34
5.2. Scelta e definizione dei template	36
5.3. Generazione fotovoltaica	40
5.4. Funzionamento <Sistema HVAC>	41
6. Risultati stato di fatto	46
6.1. Verifica dimensionamento stagione invernale	46
6.1.1. Firma energetica, potenza generatore.....	46
6.1.2. Confronto con progetto riscaldamento di Design Builder	49
6.2. Simulazione dei consumi stagione invernale.....	51

6.2.1.	Consumi gas naturale	51
6.2.2.	Verifica temperature interne	52
6.2.3.	Consumi elettricità.....	55
7.	<i>Soluzioni proposte</i>	59
7.1.	Involucro edilizio	59
7.2.	Riscaldamento a pavimento radiante nella sala	62
7.2.1.	Tecnologia per il pavimento radiante	62
7.2.2.	Modifiche al modello.....	63
7.2.3.	Confronto comfort e distribuzione dell'aria.....	67
7.2.4.	Confronto consumi	72
7.2.5.	Stima delle emissioni di CO ₂ evitate.....	74
8.	<i>Conclusioni</i>	75
9.	<i>Riferimenti</i>	77
	<i>Indice delle figure</i>	79
	<i>Indice dei grafici</i>	80
	<i>Indice delle tabelle</i>	81

1. *Sommario*

Nel presente lavoro di tesi verrà eseguita la modellazione con un software di simulazione energetica di uno spazio multisala per concerti e prosa di proprietà di una azienda partecipata del Comune di Venaria Reale, in provincia di Torino, alla quale seguiranno alcune ipotesi di intervento di efficientamento energetico. Verranno analizzate due soluzioni volte a migliorare i consumi di gas naturale e il comfort dei grandi spazi.

La presente tesi è articolata come segue.

Il secondo capitolo consiste in una introduzione sul contesto legislativo in merito all'efficienza e alla diagnosi energetica degli edifici pubblici sia a livello nazionale che internazionale.

Il terzo capitolo illustra il caso di studio nello stato di fatto attuale, in particolare si considerano le soluzioni relative all'involucro e le tecnologie adottate per l'impianto di produzione termica, l'impianto di condizionamento e di illuminazione.

Il quarto capitolo presenta il software di simulazione energetica utilizzato, il metodo di calcolo e il software di supporto grafico per la creazione del modello tridimensionale del caso di studio.

Il quinto capitolo descrive l'implementazione del modello dell'edificio con il software di simulazione energetica adottato, dove vengono inserite tutte le caratteristiche di progetto a disposizione e il quadro di attività e impiego della struttura, con profili di occupazione e di utilizzo per le diverse tipologie di apparecchiature presenti.

Nel sesto capitolo viene trattata l'analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione, valutandone la validità con il metodo della firma energetica per il dimensionamento e il confronto con le bollette fornite dai proprietari della struttura. Viene inoltre brevemente analizzato l'andamento delle temperature interne nelle diverse zone dell'edificio.

Nel settimo capitolo vengono analizzate e sviluppate le soluzioni di efficientamento energetico considerate, i procedimenti di implementazione sul software di simulazione e i risultati ottenuti a seguito dei due interventi migliorativi in termini di comfort, distribuzione dell'aria, risparmio energetico e riduzione di emissioni di anidride carbonica.

Nell'ottavo capitolo sono riportate le considerazioni finali sul lavoro svolto.

2. Introduzione

La promozione dello sviluppo sostenibile e la lotta ai cambiamenti climatici sono diventati aspetti fondamentali per la pianificazione, lo studio e la definizione delle politiche energetiche internazionali degli ultimi 30 anni. Poiché i sistemi di produzione energetica sono tra i principali responsabili dell'emissione di gas climalteranti con quasi i tre quarti delle emissioni totali di gas serra e l'80% di CO₂¹, qualsiasi sforzo per ridurre le emissioni e le inevitabili conseguenze ambientali deve includere il settore energetico. Le emissioni globali di CO₂ legate all'energia sono cresciute dell'1,4% nel 2017, raggiungendo un massimo storico di 32,5 gigatonnellate (Gt): una ripresa della crescita dopo tre anni di emissioni globali invariate.

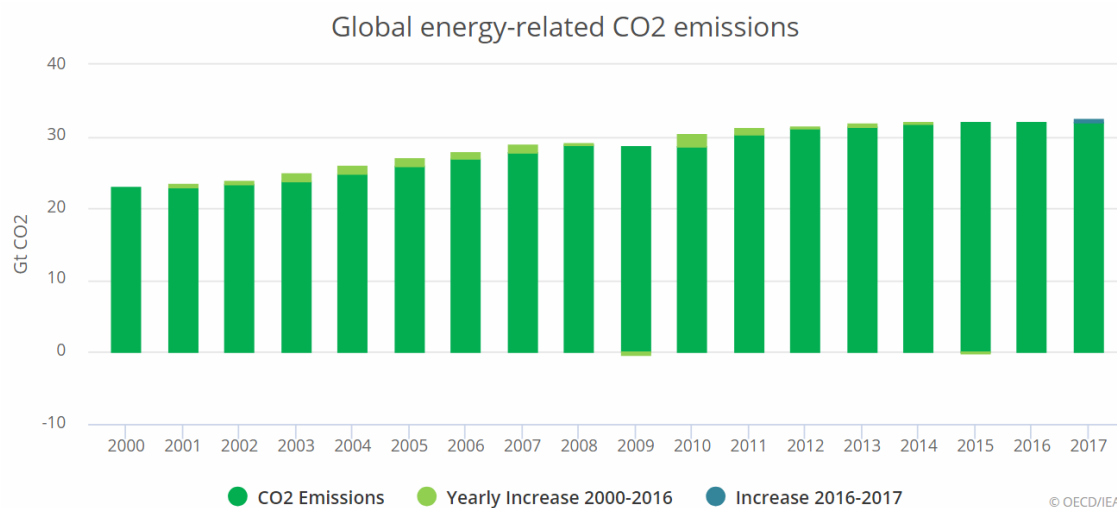


Grafico 2.1 - Emissioni globali di CO₂ relative al settore energetico ¹

Il primo trattato internazionale in materia ambientale è il **Protocollo di Kyoto**, sottoscritto da più di 180 Paesi nella città giapponese l'11 dicembre 1997 ed entrato in vigore nel 2005. Questo accordo stabilisce gli obiettivi e le linee guida da seguire, nel periodo 2008-2012, per ottenere la diminuzione delle emissioni causate dall'attività umana in una misura non inferiore all'8% rispetto a quanto registrato nel 1990.

Vi è quindi una particolare attenzione verso l'utilizzo di tecnologie innovative per la produzione e la trasformazione dell'energia, la riduzione dei consumi e l'impiego di fonti energetiche rinnovabili.

¹ Fonte: Global Energy & CO₂ Status Report 2017, IEA

2.1. Efficienza energetica: contesto legislativo

2.1.1. In Europa

In anticipo sul Protocollo di Kyoto, l'Unione Europea emana nel 1993 la **Direttiva 93/76/CEE (SAVE)** intesa a limitare le emissioni di anidride carbonica migliorando l'efficienza energetica: essa mira alla realizzazione da parte degli Stati membri dell'obiettivo di contenere le emissioni di CO₂ mediante l'elaborazione e l'attuazione entro il 31 dicembre 1994 di numerose disposizioni legislative, regolamenti, strumenti economici e amministrativi come:

- la certificazione energetica degli edifici;
- il finanziamento tramite terzi di interventi di efficienza energetica nel settore pubblico;
- l'isolamento termico degli edifici di nuova costruzione;
- il controllo periodico delle caldaie;
- le diagnosi energetiche presso imprese ad elevato consumo di energia.

Nel 2002 viene pubblicata la **Direttiva 2002/91/CE (EPBD, Energy Performance of Buildings Directive) sul rendimento energetico nell'edilizia** (aggiornata dalla **Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast)**), finalizzata a promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici all'interno della Comunità. Le indicazioni in essa contenute riguardano le linee generali della certificazione energetica degli edifici e l'ispezione periodica degli impianti termici, la metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici, l'applicazione di requisiti minimi di rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione ed esistenti di grande metratura sottoposti a importanti ristrutturazioni.

In seguito, alla scadenza del Protocollo di Kyoto ed in continuità con esso, l'Unione Europea ha presentato un insieme di misure e norme vincolanti denominato **Piano 20 20 20**, volto a garantire che l'UE raggiunga i propri obiettivi in materia di clima ed energia entro il 2020. Il pacchetto definisce tre obiettivi principali: il taglio del **20%** delle emissioni di gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990, il **20%** di fonti rinnovabili nei consumi energetici per usi finali, il **20%** di risparmio energetico rispetto al livello tendenziale dei consumi energetici complessivi al 2020.

Viene quindi emessa la **Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica** che stabilisce una serie di misure e sanzioni per aiutare l'Unione a raggiungere l'obiettivo del 20% di efficienza energetica entro il 2020. Secondo tale Direttiva, tutti i Paesi dell'UE sono tenuti a utilizzare l'energia in modo più efficiente, dalla produzione del combustibile fino all'utilizzo finale passando per il trasporto e la trasformazione del materiale, con l'obbligo di recepire tali disposizioni nella propria legislazione nazionale entro 18 mesi: in particolare viene sottolineato il ruolo esemplare degli **edifici degli enti pubblici**

nell'Art. 5, secondo cui ciascuno Stato Membro è tenuto ad effettuare ristrutturazioni energeticamente efficienti su almeno il 3% (in superficie) degli edifici riscaldati e/o raffreddati che possiede e occupa.

Complessivamente, nel 2015 il consumo di energia finale di 18 Stati membri è già al di sotto del loro obiettivo indicativo per il 2020, eccetto Belgio, Bulgaria, Germania, Irlanda, Francia, Lituania, Ungheria, Austria, Slovacchia, Svezia e Regno Unito².

Poiché la transazione globale verso l'energia pulita sta cambiando i mercati energetici mondiali, la Commissione Europea auspica che l'UE non si adatti passivamente ad essa ma che sia leader del processo di conversione: in tal senso il 30 novembre 2016 viene proposto il pacchetto **Clean Energy for All Europeans**, un aggiornamento della Direttiva 2012/27/UE con l'intenzione di mantenere l'Unione competitiva nel panorama energetico mondiale. Il pacchetto ha tre obiettivi principali: porre l'efficienza energetica al primo posto (30% per il 2030), raggiungere una leadership globale nelle energie rinnovabili (riduzione delle emissioni di CO₂ di almeno il 40% entro il 2030) e offrire un trattamento equo per i consumatori, con una modernizzazione dell'economia e creazione di posti di lavoro per tutti i cittadini europei.

A giugno del 2018 viene pubblicata nella Gazzetta ufficiale dell'Unione la Direttiva **2018/844/UE sulla performance energetica negli edifici** che modifica la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica: tale direttiva sottolinea come il conseguimento degli obiettivi energetici e climatici dell'Unione è legato agli sforzi di quest'ultima per rinnovare il suo parco immobiliare, dando ancora una volta la priorità all'efficienza energetica, valutando l'utilizzo delle energie rinnovabili e proseguendo nel processo di decarbonizzazione, come evidenziato alla XXI Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP21).

2.1.2. In Italia

L'Italia è impegnata in questo ambito sin dagli anni Settanta quando, a seguito della crisi energetica che fece balzare alle stelle il prezzo del petrolio, iniziò a esaminare strategie di risparmio energetico, prima con la **Legge n. 373 del 1976** relativa al consumo energetico per usi termici negli edifici pubblici e privati (residenze, uffici, ospedali, cliniche e case di cura, adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili, attività commerciali, sportive e scolastiche³) e poi con la **Legge n. 10 del 1991**, la prima legge quadro finalizzata a regolare le modalità progettuali e la gestione del sistema edificio-

² Fonte: COM (2017) 687 final

³ Fonte: D.P.R. 28 giugno 1977, n. 1052, Art. 2: Ambito di applicazione

impianto. Essa sancisce il **Piano energetico nazionale** in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia, gettando le basi di tutta la futura politica energetica nazionale. L'art. 26 comma 7 della Legge 10/91 recita:

Negli edifici di proprietà pubblica o adibiti ad uso pubblico è fatto obbligo di soddisfare il fabbisogno energetico degli stessi favorendo il ricorso a fonti rinnovabili di energia o assimilate salvo impedimenti di natura tecnica od economica.⁴

In questa legge e tramite modifiche ed integrazioni indicate nel decreto di attuazione **D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412** vengono stabiliti la suddivisione dell'Italia in zone climatiche sulla base dei gradi-giorno⁵ (Art.2), la durata giornaliera di attivazione nonché periodi di accensione degli impianti termici (Art.9), i valori massimi della temperatura ambiente durante il funzionamento degli impianti termici (Art.4).

Si classificano inoltre gli edifici in base alla destinazione d'uso (Art. 3):

- E.1 Edifici adibiti a residenza e assimilabili:
 - abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo, quali abitazioni civili e rurali, collegi, conventi, case di pena, caserme;
 - abitazioni adibite a residenza con occupazione saltuaria, quali case per vacanze, fine settimana e simili;
 - edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari;
- E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili;
- E.3 Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili;
- **E.4 Edifici adibiti ad attività ricreative, associative o di culto e assimilabili:**
 - **quali cinema e teatri, sale di riunione per congressi;**
 - quali mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto;
 - quali bar, ristoranti, sale da ballo;
- E.5 Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili;
- E.6 Edifici adibiti ad attività sportive:
- E.7 Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili;
- E.8 Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili.

⁴ Fonte: Legge n. 10 del 1991, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana

⁵ Il grado-giorno di una località è la somma estesa a tutti i giorni, in un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura fissata convenzionalmente per ogni Paese e la temperatura media esterna giornaliera.

Il recepimento della direttiva 2002/91/CE (EPBD) avviene tramite il **Decreto Legislativo 192/2005** che stabilisce le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo e l'integrazione delle **fonti rinnovabili** e la **diversificazione energetica**. Vengono inoltre indicate le linee guida per la certificazione energetica degli edifici e i criteri per garantire la qualificazione e l'indipendenza degli esperti incaricati della certificazione energetica e delle ispezioni degli impianti.

Inoltre, il **Decreto Ministeriale del 26/06/2009 sulle Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici** definisce una applicazione omogenea, coordinata ed immediatamente operativa della certificazione energetica e degli strumenti di raccordo, concertazione e cooperazione tra lo Stato e le Regioni.

Nella **Legge n.90 del 2013** che recepisce la direttiva 2010/31/UE (EPBD recast) vengono introdotti il concetto di edificio a energia quasi zero (Nearly zero energy building) e l'obbligo di fornire l'attestato di prestazione energetica in tutti i contratti di vendita o affitto di un immobile, con nuove regole per edifici di nuova costruzione e edifici soggetti a ingenti ristrutturazioni.

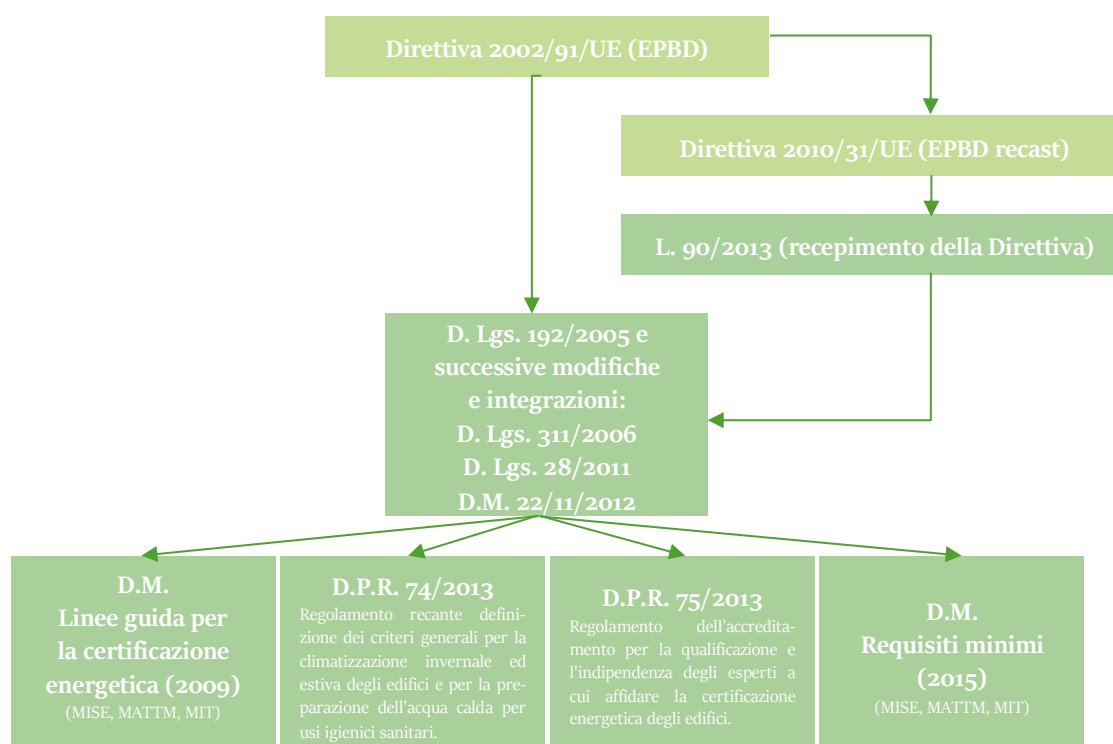


Grafico 2.2 - Quadro legislativo italiano al 2015

La metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici pubblici e privati viene nuovamente trattata nel **Decreto Ministeriale 26 giugno 2015**, in particolare definendo requisiti minimi di prestazione energetica in accordo con quanto stabilito dal D.Lgs. 192/2005. L'Allegato 1 di tale

Decreto Ministeriale, ai fini delle verifiche progettuali del rispetto dei requisiti minimi e della classificazione degli edifici, ordina di effettuare il calcolo sia dell'energia primaria totale che dell'energia primaria non rinnovabile, applicando i pertinenti fattori di conversione in energia primaria per diversi vettori energetici. I fattori di conversione in energia primaria sono:

$$f_{P,tot} = f_{P,nren} + f_{P,ren}$$

dove

- $f_{P,tot}$ è il fattore di conversione di energia primaria totale;
- $f_{P,nren}$ è il fattore di conversione di energia primaria non rinnovabile;
- $f_{P,ren}$ è il fattore di conversione di energia primaria rinnovabile;

Vettore energetico	$f_{P,nren}$	$f_{P,ren}$	$f_{P,tot}$
Gas naturale ⁽¹⁾	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,10	0	1,10
Biomasse solide ⁽²⁾	0,20	0,80	1,00
Biomasse liquide e gassose ⁽²⁾	0,40	0,60	1,00
Energia elettrica da rete ⁽³⁾	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento ⁽⁴⁾	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento ⁽⁴⁾	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00

⁽¹⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.
⁽²⁾ Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.
⁽³⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.
⁽⁴⁾ Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza, conformemente al quanto previsto al paragrafo 3.2.
⁽⁵⁾ Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.

Tabella 2.1 - Fattori di conversione in energia primaria, Allegato 1 D.M. Requisiti minimi 2015

Infine, la **Strategia Energetica Nazionale** (SEN) del 2017, strumento di indirizzo e programmazione a carattere generale della politica energetica nazionale, conferma il ruolo chiave della ricerca nel settore energetico-ambientale e dell'efficienza energetica nel percorso di sviluppo tecnologico del nostro Paese. Nel contesto dell'insieme di disposizioni contenute nel pacchetto *Clean Energy for All Europeans*, la SEN mira a potenziare le politiche di efficienza energetica favorendo le misure caratterizzate dal miglior rapporto costo-efficacia, al fine di raggiungere nel 2030 il 30% di risparmio energetico rispetto al livello di consumo tendenziale previsto a quella data. La SEN propone inoltre l'imposizione di obblighi di riduzione di consumo per il settore commerciale e per la Pubblica Amministrazione, incentivando al contempo programmi di formazione e educazione all'efficienza energetica al fine di generare un vero e proprio cambiamento comportamentale in ambito energetico nel settore terziario.

Efficienza energetica degli edifici: il settore civile e pubblico

Nell'Unione Europea, gli edifici sono responsabili di circa il 40% del consumo di energia e del 36% delle emissioni di CO₂. Attualmente, circa il 35% degli edifici dell'Unione ha più di 50 anni e quasi tre quarti del parco immobiliare è inefficiente termini energetici, mentre solo lo 0,4-1,2% del parco immobiliare (a seconda del Paese) viene rinnovato ogni anno⁶. Pertanto, un maggior numero di ristrutturazioni e interventi su edifici esistenti potrebbe portare a significativi risparmi energetici - potenzialmente riducendo il consumo totale di energia dell'UE del 5-6% e abbassando le emissioni di CO₂ di circa il 5%⁶.

In Italia il settore civile copre quasi il 40% del consumo di energia totale, di conseguenza rappresenta un grande potenziale di risparmio energetico, includendo abitazioni, servizi pubblici e attività commerciali private: l'obiettivo della riqualificazione energetica è infatti il risparmio finale di energia, oltre alla sostituzione, per fini ambientali, dei combustibili fossili con energia da fonte rinnovabile. In considerazione della favorevole previsione di riduzione dei consumi nella Pubblica Amministrazione, l'Italia dedica particolare attenzione all'efficientamento energetico del parco immobiliare pubblico con la definizione di clausole di risparmio obbligatorio nei contratti di servizi energetici e attraverso la prosecuzione del **Programma PREPAC** (per la Riqualificazione Energetica degli Edifici della Pubblica Amministrazione Centrale). Grazie al PREPAC sono stati disposti circa 355 milioni di euro (**Decreto Ministeriale del 16/09/2016**) per il finanziamento dei progetti approvati nel periodo 2014-2020, a cui seguiranno concessioni statali di somme fino al 100% della spesa esposta per proposte di intervento di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio pubblico⁷, nel rispetto paesaggistico, nel periodo 2021-2030. Inoltre, nel testo della SEN 2017 è sottolineata l'intenzione di proseguire l'azione congiunta con altri Paesi dell'Unione nei confronti della Commissione Europea per rivedere le regole di contabilizzazione del debito pubblico in caso di interventi di efficienza energetica: le regole correnti, infatti, considerano come spesa pubblica anche gli investimenti effettuati dai privati nell'ambito dei contratti di prestazione energetica stipulati con la Pubblica Amministrazione, limitando così gli interventi di riqualificazione. Criticità si riscontrano anche quando gli interventi sono direttamente eseguiti da soggetti pubblici come gli enti locali, con la contrazione di prestiti che impattano sui vincoli del pareggio di bilancio; la rimozione di tali vincoli consentirebbe un maggiore e più efficace utilizzo degli strumenti di incentivazione e darebbe impulso alla realizzazione di interventi.

⁶ Fonte: EU Building Stock Observatory

⁷ Fonte: Rapporto annuale efficienza energetica 2018, Agenzia Nazionale Efficienza Energetica (ENEA)

2.2. La diagnosi energetica

2.2.1. Il pacchetto normativo

Lo strumento utilizzato per ottenere una adeguata conoscenza dei consumi energetici di un edificio o gruppo di edifici e per individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici è la diagnosi energetica, descritta nel **Decreto Legislativo 115/08**. Lo scopo è quello di far conoscere al soggetto che desidera effettuare interventi di risparmio energetico lo stato dell'insieme edificio-impianto, gli eventuali elementi critici sui quali intervenire ed il risparmio ottenibile rispetto alla situazione di partenza, al fine di effettuare le verifiche sull'efficacia economica dell'intervento. Essendo dunque lo strumento adatto per individuare soluzioni e misure di miglioramento dell'efficienza di un sistema che usa e consuma energia, gli Stati Membri dell'Unione Europea e il mercato hanno dovuto dotarsi di regole comuni per uniformare sia la qualifica dei fornitori di tali servizi sia le modalità da seguire per la loro esecuzione al fine di garantire uniformità e trasparenza nel riferire in merito ai risultati ottenuti.

La metodologia comune ed i passaggi fondamentali della diagnosi energetica sono definiti da due norme europee: la **UNI CEI/TR 11428:2011** sulla *Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche, requisiti generali del servizio di diagnosi energetica* e la **UNI CEI EN 16247** sulle *Diagnosi energetiche, Parti 1-2-3-4-5*. La prima è un rapporto tecnico che disciplina i requisiti, la modalità operativa e la documentazione da produrre per le diagnosi energetiche applicabili a tutti i sistemi energetici, a tutti i vettori di energia e a tutti gli usi dell'energia, mentre nella seconda si dettano le linee guida per diversi ambiti:

- Parte 1: rilasciata nel 2012, definisce le caratteristiche generali comuni a tutte le diagnosi energetiche. È applicabile a tutte le forme di aziende ed organizzazioni, a tutte le forme di energia e di utilizzo della stessa, con l'esclusione delle singole unità immobiliari residenziali.
- Parte 2: diagnosi energetiche specifiche per gli edifici. Essa definisce i requisiti, la metodologia e la reportistica di una diagnosi energetica relativa a un edificio o a un gruppo di edifici, escludendo le singole residenze private.
- Parte 3: diagnosi energetica nell'ambito di un processo.
- Parte 4: settore dei trasporti, per diverse modalità di trasporto (stradale, ferroviario, marittimo, aereo), differenti ambiti (locale, a lunga distanza) e oggetti trasportati (merci e persone).
- Parte 5: rilasciata nel 2015, indica le competenze che l'auditor energetico deve possedere per effettuare in maniera efficace diagnosi energetiche conformi ai requisiti della Parte 1, eventualmente integrata dalle Parti relative ai tre settori "Edifici", "Processi" e "Trasporti".

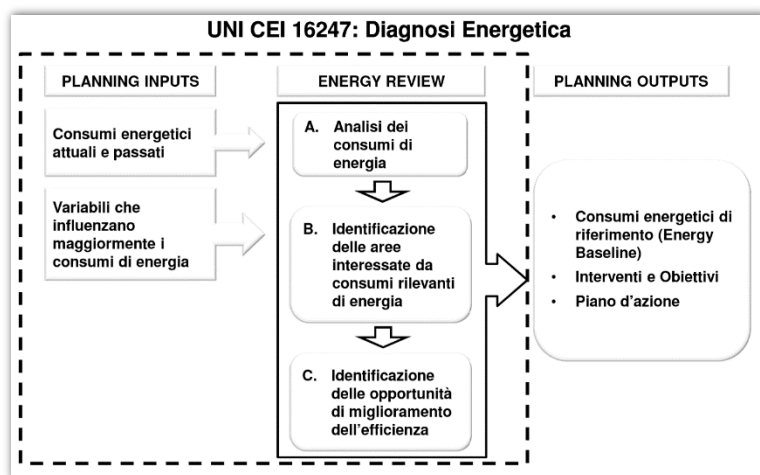


Grafico 2.3 - UNI CEI 16247-1, schema logico diagnosi energetica

Secondo tali norme, la diagnosi energetica consiste in una procedura articolata in passaggi ben definiti, il cui scopo ultimo è proprio quello di ridurre i consumi reali di un edificio esistente: in questo contesto il metodo della **firma energetica** risulta un criterio di correlazione agile fra consumi calcolati e consumi reali, spesso utilizzata per verificare la congruenza fra essi. Questo metodo viene codificato all'interno del pacchetto normativo EPBD, in particolare nella norma **UNI EN 15603:2008** che fornisce inoltre metodi per valutazioni energetiche basate su energia primaria, emissione di anidride carbonica o altri parametri definiti da politiche energetiche nazionali.

La firma energetica

La firma energetica è la rappresentazione grafica di un consumo o potenza in funzione di un parametro esterno, in genere la temperatura, ed è utilizzata per analizzare i consumi reali di un edificio, per **confrontare i valori calcolati ed i consumi reali** o per verificare la validità di un intervento di riqualificazione energetica tramite l'analisi della relazione che intercorre fra la temperatura esterna e la potenza termica media assorbita da un edificio.

La sua costruzione si basa sul presupposto che il consumo per il riscaldamento di un edificio è una funzione decrescente della temperatura esterna e consiste nel rappresentare il valore di consumo in funzione di essa per tutti i mesi o settimane del periodo di osservazione. I punti si distribuiscono con buona approssimazione lungo una retta che mostra come il sistema edificio-impianto reagisce alle variazioni della temperatura esterna. Questa retta interpolante, ottenibile per **regressione lineare**, è detta "firma energetica" ed è la curva che meglio descrive i consumi rilevati e rappresenta l'effettivo comportamento energetico dell'edificio.

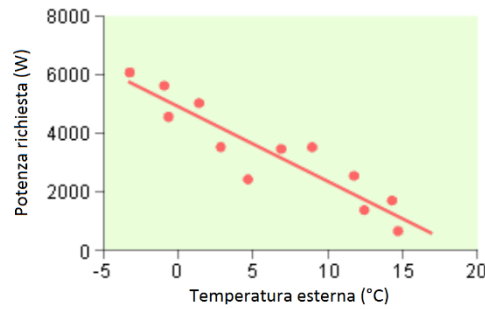


Grafico 2.4 - Firma energetica di primo grado, esempio

Comunemente si costruisce la firma energetica con valori di consumo settimanali, poiché proprio in questa configurazione si ottiene una nuvola ben distribuita di punti, ma è possibile esaminare la firma anche per intervalli temporali diversi, che possono dipendere ad esempio dal lasso di tempo che intercorre tra le letture del contatore del combustibile o altri fattori.

La pendenza della retta è legata ad effetti proporzionali alla temperatura esterna come la dispersione dell'edificio e le perdite proporzionali dell'impianto. Effettuando ad esempio interventi di retrofit come la coibentazione dell'involucro o aumentando il rendimento dell'impianto, ci si aspetta una diminuzione della pendenza della firma energetica. Inoltre, il confronto tra firme di anni successivi consente di verificare la conduzione corretta ed efficiente del sistema edificio-impianto.

Con la **firma energetica di secondo grado** si affronta l'evoluzione del consumo con una legge di secondo grado, sotto forma di parabola. Una regressione di secondo grado porta maggiore finezza, che è tuttavia effettiva solo in virtù di una raccolta dati rigorosa, in particolare:

- elevata affidabilità e regolarità delle misure;
- scelta accurata dei gradi giorno nell'intervallo di misura;
- corrispondenza tra periodi con record di consumo e valori climatologici più rigidi.

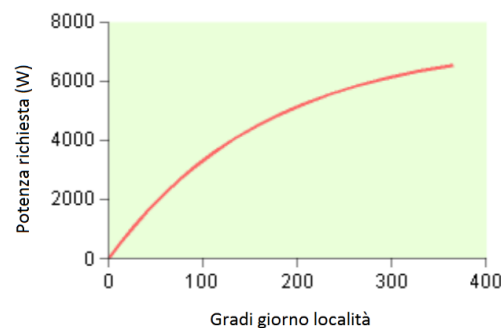


Grafico 2.5 - Firma energetica di secondo grado, esempio

L'interpretazione della firma energetica del secondo grado è simile a quella del primo grado, tuttavia si può aggiungere un parametro: la *concavità della curva* della firma energetica. Poiché l'efficienza

media dell'impianto generalmente aumenta con il carico delle caldaie, la concavità della firma energetica riferita ai gradi giorno dovrebbe normalmente essere rivolta verso il basso.

Un esempio degli sforzi compiuti per l'uso razionale dell'energia tramite il metodo della firma energetica è quello della Città di Losanna, in Svizzera (127.000 abitanti): il Dipartimento di Energia di Losanna controlla infatti la gestione energetica di circa 400 edifici utilizzando la firma energetica per garantire il corretto dimensionamento degli impianti di riscaldamento e ottimizzare il monitoraggio del consumo energetico⁸. L'implementazione della firma energetica ha consentito di controllare e correggere continuamente il consumo energetico del patrimonio municipale e il Dipartimento di Energia ha sviluppato il proprio centro di gestione remota degli edifici integrando questo metodo. Già 15 anni fa più di cento edifici ne furono equipaggiati e l'adozione della firma energetica come strumento di monitoraggio portò a una riduzione media del 9% del consumo energetico.

2.2.2. La simulazione energetica degli edifici

Negli anni Settanta la simulazione degli edifici è emersa come tentativo di migliorare i metodi tradizionali per studiare e ottimizzare le prestazioni energetiche degli edifici esistenti. La simulazione calibrata ne è una particolare applicazione il cui scopo è raggiungere una corrispondenza tra le prestazioni energetiche dell'edificio simulate e monitorate, con l'obiettivo di ottimizzare le strategie di controllo o per scopi diagnostici finalizzati a un'ulteriore previsione dei risparmi energetici.

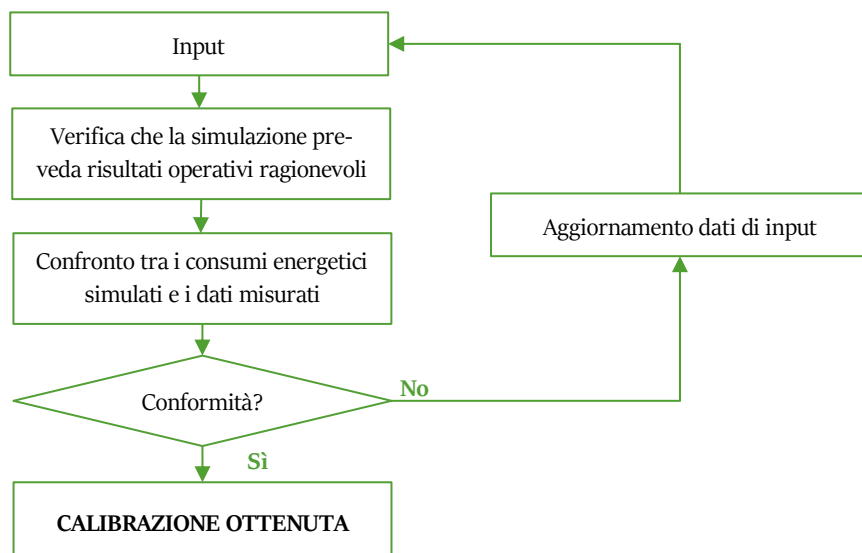


Grafico 2.6 - Procedimento di simulazione

⁸ Fonte: Outils de planification énergétique territoriale, ADEME/Energie-Cités, 2003

La simulazione energetica degli edifici è stata approvata da diverse associazioni professionali internazionali tra cui ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) e il Programma federale di gestione energetica degli Stati Uniti (FEMP) promosso dal Dipartimento di Energia degli USA. Uno degli approcci proposti dalla **ASHRAE Guideline 14-2014** è quello dell'approccio di simulazione per l'intero edificio, che implica l'uso di un software di simulazione per creare un modello di consumo e domanda energetica della struttura (in genere delle condizioni pre-retrofit). Una accurata elaborazione dei dati di input permette di utilizzare il modello per determinare la domanda di energia nelle condizioni post-retrofit e quindi effettuare una valutazione preliminare del vantaggio che può arrecare un intervento di riqualificazione energetica su un edificio esistente.

Tipicamente l'affidabilità del modello peggiora gradualmente in base alla sua complessità, in quanto il grado di semplificazione dell'edificio influenza in modo diretto i dati di input. Il numero di parametri in ingresso varia in base al livello di dettaglio perseguito e alla disponibilità dei dati stessi. Un ulteriore aspetto è quello del costo computazionale di modellazione, su cui influiscono tempo impiegato e numero di operazioni eseguite dal software di simulazione.

Le due classi di errori che possono incidere sui parametri in ingresso riguardano da una parte lo scenario generale dell'edificio modellato e dall'altra la tipologia di costruzione, di impianti e la conduzione e il controllo del sistema HVAC.

La prima categoria comprende:

- le condizioni meteorologiche, che includono i parametri più comuni che influenzano l'uso e la domanda di energia come la temperatura esterna, le precipitazioni, la velocità e la direzione del vento, l'irraggiamento orizzontale globale, la componente orizzontale diffusa e quella normale diretta;
- l'utilizzo dell'edificio, inteso come destinazione d'uso, tipologia di attività svolte e programmazione giornaliera e stagionale dell'occupazione.

La seconda categoria include:

- le proprietà dell'involucro edilizio opaco e trasparente;
- gli apporti interni generati dal calore emesso dalle persone, dagli apparecchi elettronici e dall'impianto di illuminazione;
- le caratteristiche del sistema HVAC e le impostazioni operative e di controllo.

Possono poi avere un ruolo incisivo sulla precisione dei risultati anche l'inadeguatezza del modello e la qualità dei dati di misurazione: ogni modello di edificio è infatti un'approssimazione di quello reale,

creato sulla base di presupposti e semplificazioni che possono risentire di ipotesi errate. A seconda dei dati di input disponibili, si definiscono dunque i livelli di dettaglio, con lo scopo di verificare che i dati raccolti siano adeguati per eseguire la modellazione: i dati delle bollette rappresentano il requisito minimo in termini di misurazioni e dati storici sull'edificio, il cui periodo di disponibilità dovrebbe essere lungo almeno un anno o una stagione per fornire risultati affidabili.

	Bollette	Dati di input disponibili				
		Dati As-Built	Sopralluoghi e ispezioni	Audit dettagliato	Monitoraggio di breve termine	Monitoraggio di lungo termine
Livello 1	X	X				
Livello 2	X	X	X			
Livello 3	X	X	X	X		
Livello 4	X	X	X	X	X	
Livello 5	X	X	X	X	X	X

Tabella 2.2 - Livelli di dettaglio basati su dati di input disponibili

Il livello di dettaglio più debole è il *livello 1* in quanto le informazioni sulla costruzione e sul funzionamento dell'edificio non sono dettagliate e non possono essere sottoposte a controlli incrociati con le visite sul posto. Il *livello 2* consente di verificare che i dati as-built corrispondano all'edificio come è stato effettivamente costruito e di raccogliere informazioni con visite e sopralluoghi. Con le misurazioni in loco del consumo di energia in settori specifici della catena di utilizzo, il *livello 3* garantisce una verifica specifica delle informazioni raccolte. I livelli più accurati sono i *livelli 4 e 5*, basati rispettivamente sul monitoraggio a breve e lungo termine, poiché i monitoraggi permettono di ridurre al minimo le ipotesi sul funzionamento degli apparecchi esaminati.

Il seguente capitolo presenta il caso di studio e le sue principali caratteristiche in base ai dati a disposizione, raccolti tramite colloqui e visite in loco e consultazione dei dati as-built.

3. *Il Teatro della Concordia di Venaria*

3.1. **Analisi generale dello spazio fisico**

Il caso di studio è un teatro cittadino, il Teatro della Concordia di Venaria Reale, nella Città Metropolitana di Torino. La struttura, inaugurata nel 2004, è di proprietà dell'Azienda Speciale Multiservizi di Venaria (partecipata del Comune) ed è attualmente gestita dalla Fondazione Via Maestra, un ente di promozione culturale senza scopo di lucro costituito nel 2008 per iniziativa del Comune stesso. Affermato e apprezzato sul territorio, il teatro viene utilizzato come spazio multisala per concerti e prosa e grazie alla struttura moderna e agli spazi interni modulari garantisce una caratteristica flessibilità di utilizzo e consente di organizzare eventi con impostazioni molto diverse tra loro.



Figura 3.1 - Teatro della Concordia, ingresso

La superficie di pertinenza del teatro è di circa 7000 m² e comprende la struttura, il cortile frontale e quello laterale, il parcheggio. L'edificio si estende su 2400 m², con una estensione massima di 60 m nella direzione est-ovest e di 42 metri nella direzione nord-sud; è caratterizzato da tre aree polifunzionali maggiori:

- il **foyer**, adatto ad ospitare mostre, esposizioni, eventi conviviali, biglietteria e accoglienza; l'area, un ambiente di sosta e di trattenimento tipico dei teatri e delle grandi sale cinematografiche e da concerto, è ampia più di 800 m² ed è dotata di un guardaroba sul lato destro e di una caffetteria sul lato sinistro. Tre dei quattro lati del foyer sono a tutta vetrata, da terra sino all'altezza massima di 11,5 m (*figura 3.1*). In una seconda fase all'interno del foyer è stato costruito un soppalco sorretto da colonne d'acciaio, dotato di una sala che per mezzo di una parete mobile può essere

allestita per 50, 90 o 170 posti ed essere sfruttata per riunioni, conferenze stampa e videoconferenze; gli ingressi sono collocati su di un ballatoio affacciato sul foyer, accessibile tramite due rampe di scale laterali e un elevatore;

- l'ampia **sala**, con capienza massima di 786 persone sedute e 2000 in piedi, pensata per concerti, spettacoli teatrali, rassegne di danza, meeting, cene e rinfreschi. Dalla sala, attraverso un'entrata sul lato sinistro del palco scenico, è possibile accedere all'avancorpo che ospita i **camerini**;
- l'avancorpo degli **uffici** della direzione del teatro e della biglietteria, per un totale di cinque locali di 20 m² medi ciascuno, con servizi igienici disposti lungo un corridoio nel blocco costruttivo dedicato.



Figura 3.2 – Teatro della Concordia, Sala

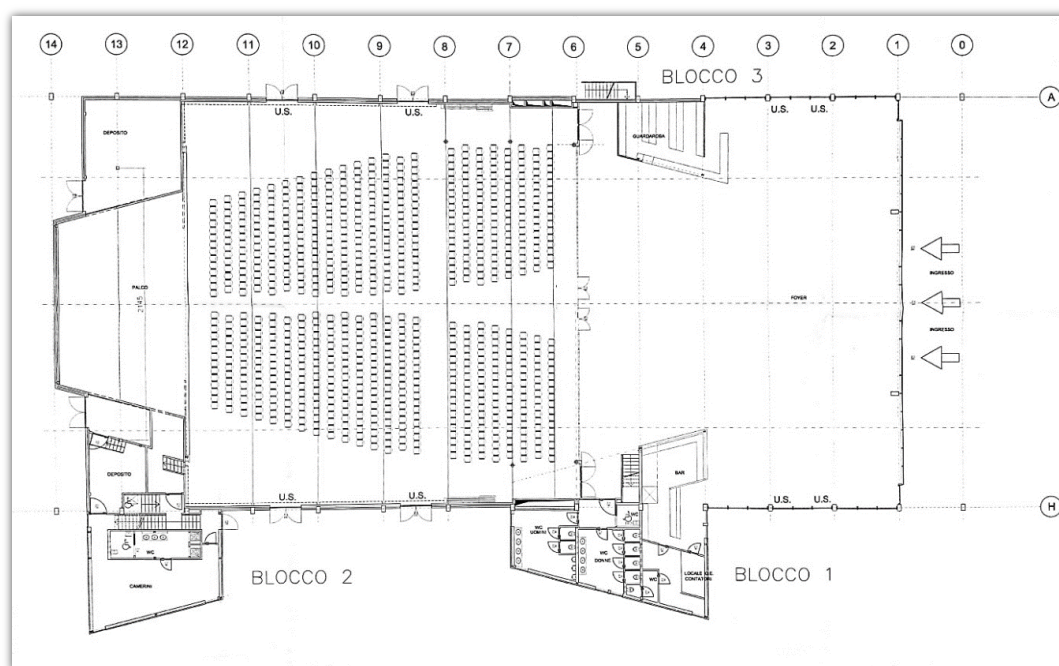


Figura 3.3 - Teatro della Concordia, pianta piano terreno

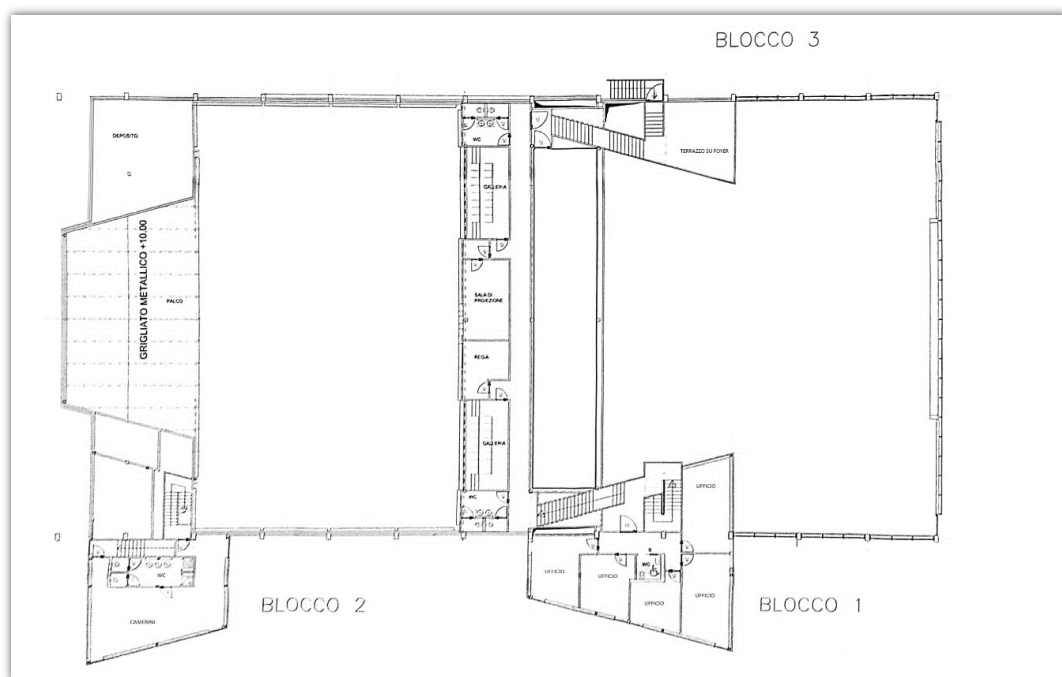


Figura 3.4 - Teatro della Concordia, pianta primo piano

Nella pianta del piano terreno in *figura 3.3* e del primo piano in *figura 3.4* vengono segnalati i tre blocchi costruttivi indicati dal progettista: il **BLOCCO 3** è la struttura principale, che comprende la sala e il foyer, il **BLOCCO 1** è costituito dal prefabbricato dei servizi igienici per il pubblico, la caffetteria e gli uffici del primo piano, il **BLOCCO 2** ospita i camerini a lato del palco scenico. È inoltre presente un magazzino sul lato destro del palco scenico, mentre nella pianta del primo piano si evidenziano al fondo della sala le due gallerie e i locali adibiti a regia e sala proiezioni, alle spalle dei quali è collocata l'isola tecnica a cielo aperto.

3.2. Descrizione tecnica dell'edificio

3.2.1. Caratteristiche dell'involucro

Involucro opaco

La struttura, completamente smontabile e rimontabile, impianti inclusi, è realizzata con la tecnica costruttiva del **prefabbricato**, un processo che utilizza elementi fabbricati prima di essere messi in opera in cantiere, il cui luogo di produzione è spesso una sede industriale indipendente dal cantiere specifico. L'involucro è composto prevalentemente di pannelli coibentati e lamiera grecata: sono state infatti largamente utilizzate lamiere in rame sia per coperture sia pareti esterne. Come illustrato in *figura 3.5*, le coperture dei blocchi 1 e 2 sono dotate di controsoffitto in cartongesso spesso 1,25 cm che

permettono il passaggio del cablaggio elettrico e di condotte e tubature dell'impianto di condizionamento dell'aria. Nelle coperture del blocco 3 sono inoltre utilizzate travi in legno lamellare strutturale, prodotte incollando tavole di legno a loro volta già classificate per uso strutturale.

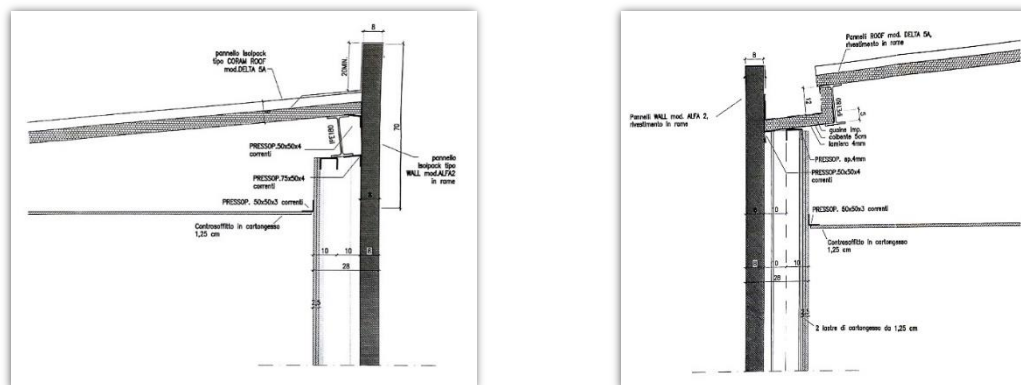


Figura 3.5 - Teatro della Concordia, esempi di stratigrafia parete e copertura blocco 1 e 2

I pannelli metallici utilizzati per il rivestimento esterno presentano un isolamento termico con schiumatura in continuo con resine poliuretaniche di densità $39 \pm 2 \text{ kg/m}^3$, caratterizzata da un valore di conducibilità termica iniziale pari a $\lambda = 0,020 \text{ W/mK}$. La pavimentazione dell'intero piano terreno è in calcestruzzo con vespaio a igloo e finitura in resina colorata di tinta rossa, mentre negli uffici e nei camerini sono presenti solai prefabbricati in calcestruzzo rivestito in PVC di spessore 2.5 mm. La seguente tabella mostra alcuni esempi di stratigrafie utilizzate nella struttura in esame, in cui gli strati sono indicati dal più esterno al più interno. I dati di conducibilità sono stati ricavati dalla letteratura.

Involucro - Parete verticale Blocco 1/2

	Spessore [mm]	Densità [kg/m^3]	Conducibilità [W/mK]
Lamiera grecata (rame)	3	8900	300
Resina poliuretanica	80	39	0,02
Aria in quiete	175	-	-
Pannello cartongesso	12,5	950	0,16
Pannello cartongesso	12,5	950	0,16

Involucro - Parete verticale Blocco 3

	Spessore [mm]	Densità [kg/m^3]	Conducibilità [W/mK]
Lamiera (alluminio)	3	2700	230
Resina poliuretanica	60	39	0,02
Aria in quiete	100	-	-
Pannello cartongesso	12,5	950	0,16
Pannello cartongesso	12,5	950	0,16

Involucro - Pavimentazione contro terra

	Spessore [mm]	Densità [kg/m^3]	Conducibilità [W/mK]
Getto di CLS magro	100	2000	1,13
Vespaio igloo d=50 cm	-	-	-

Getto di riempimento CLS	50	1200	0,38
Foglio in polietilene	3	70	0,05
Isolante (poliuretano)	50	30	0,028
Massetto in CLS	80	1200	0,41
PVC	2,5	1380	0,16
Involucro - Tetto inclinato Blocco 3			
	Spessore [mm]	Densità [kg/m³]	Conducibilità [W/mK]
Lamiera (alluminio)	2,5	2700	230
Schiuma di poliisocianato	50	45	0,03
Struttura reticolare di sostegno in travi di legno lamellare	-	-	-

Tabella 3.1 – Esempi di stratigrafie dell'involucro opaco

Involucro trasparente

La scelta dei materiali per le superfici trasparenti è stata fatta in base alle funzioni: una tipologia per le pareti vetrate del foyer, un'altra per serramenti degli avancorpi. Le facciate a tutto vetro del foyer sono costituite da una composizione ad hoc: una **vetrocamera** con doppio vetro antinfortunistico basso emissivo 8/18/4+4 mm dove l'intercapedine contiene aria al 100%. Lo strato più esterno è un vetro float di colore verde spesso 8 mm, tipicamente utilizzato nel settore edile in regioni molto soleggiate come mezzo efficiente per filtrare la luce e il calore, con un basso livello di riflessione luminosa ($U_g\text{-Value}=5,6 \text{ W/m}^2\text{K}$). Lo strato interno è stato sviluppato con lo scopo di garantire la sicurezza delle persone, ha un aspetto identico al vetro normale, ma è sufficientemente resistente per fornire un'adeguata protezione contro il rischio d'infortunio, di cadute, di effrazione e di atti vandalici: tra due lastre di vetro è collocata una pellicola spessa 0.38 mm di materia plastica, il PVB (polivinilbutirale), che risulta trasparente e ha lo scopo di mantenere compatti i due strati di vetro impedendo la propagazione di fratture ($U_g\text{-Value}=5,6 \text{ W/m}^2\text{K}$).

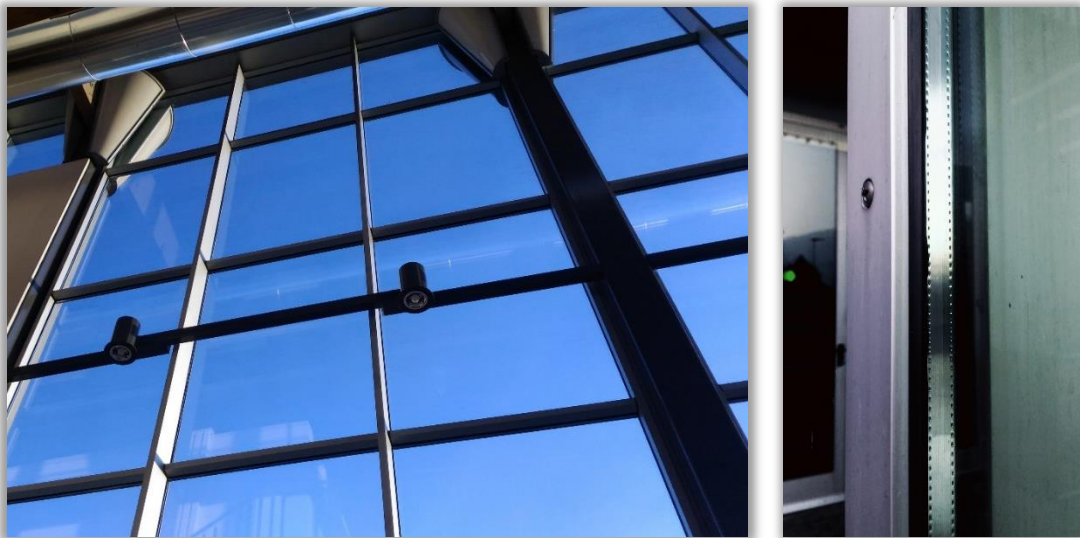
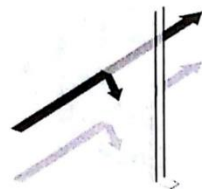


Figura 3.6 - Teatro della Concordia, dettagli facciata vetrata foyer

La trasmittanza termica della vetrocamera dichiarata dal costruttore è $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$, seguono i dati di caratteristiche luminose ed energetiche.

LUCE		ENERGIA		CARATTERISTICHE LUMINOSE (EN 410)		EN 410
Trasmittanza	58	Fattore solare	33	Trasmittanza luminosa - t_v (%)		58
Riflessione	0	Riflessione	7	Riflessione luminosa - p_v (%)		9
				Riflessione interna - p_{vi} (%)		12
				Indice di resa dei colori - $RD65 - R_a$ (%)		84



PROPRIETÀ TERMICHE (EN 673)		EN 673	ALTRE CARATTERISTICHE		
Valore $U_g - W/(m^2 \cdot K)$		1.4	Resistenza al fuoco - EN 13501-2		NPD
			Reazione al fuoco - EN 13501-1		NPD
			Resistenza ai proiettili - EN 1063		NPD
			Resistenza agli attacchi manuali - EN 356		NPD
			Resistenza agli urti (Prova del pendolo) - EN 12600		NPD / 2B2

RIDUZIONE ACUSTICA		
Isolamento al rumore aereo diretto (R_w (C;Ctr) - STIMA) - dB		38 (-2; -5) ⁽¹⁾
Con PVB acustico (Stratophone) (R_w (C;Ctr)) - dB		41 (-1; -5) ⁽¹⁾

SPESSORE E PESO		
Spessore nominale (mm)		34.38
Peso (kg/m^2)		41

Tabella 3.2 - Datasheet vetrata foyer

Gli **infissi** degli uffici e dei camerini sono anch'essi caratterizzati da doppi vetri, la parte superiore fissa e quella inferiore con apertura a battente con cerniera laterale. Alcune finestre del blocco 1 e 2 sono dotate di schermatura interna costituita da tendaggio di colore chiaro, come in [figura 3.7](#), altre da veneziana applicata solamente sulla parte inferiore.



Figura 3.7 - Teatro della Concordia, dettaglio infissi camerini

3.2.2. Centrale elettrica e produzione fotovoltaica

Attualmente l'edificio è alimentato in BT (Bassa Tensione) trifase a 400 V dal distributore attraverso una cabina elettrica situata a 100 metri dall'ingresso del teatro, con una potenza impegnata da contratto con l'ente distributore pari a 150 kW.

Sulla copertura è presente un esteso impianto fotovoltaico di tipo **grid-connected**, con tipologia di allaccio trifase in bassa tensione. Ha una potenza totale pari a **98.700 kWp** derivante da 420 moduli in silicio monocristallino prodotti da LG-Chen® (235 Wp ciascuno) disposti in **20 stringhe da 21 elementi**, ed occupa una superficie di 687.54 m². Tutti i pannelli sono orientati con 6° di tilt e 0° di azimuth, godono di una irradiazione solare annua sul piano dei moduli di 1 525.53 kWh/m² e la produzione di energia annua era stimata a impianto nuovo pari a 113 227.34 kWh. L'impianto è stato installato nel 2010 in posizione complanare alle superfici della struttura di sostegno per limitare l'azione del vento sui moduli e non snaturare la sagoma della copertura dell'edificio. Il rendimento dei pannelli fotovoltaici in condizioni STC (Standard Test Condition, irraggiamento 1000 W/m², temperatura 25°C, massa d'aria 1,5) dichiarato dal costruttore è pari al 13.8%. Il BOS dell'impianto, che tiene conto delle perdite per riflessione, ombreggiamento, mismatching, effetto della temperatura nei circuiti e negli inverter, viene dichiarato pari a 74.97%. L'installazione di questo impianto fotovoltaico rientra nel piano di promozione dell'energia verde dell'Azienda Multiservizi di Venaria Reale del 2009, che ha previsto nello stesso periodo anche la collocazione di un campo fotovoltaico sul tetto della Piscina Comunale di Venaria. Il suo dimensionamento è basato sulla volontà di produrre energia elettrica da fonte solare in una quota quanto più possibile vicina alla massima richiesta elettrica serale ottenuta in corrispondenza di spettacoli e concerti, pur non potendone usufruire direttamente a causa dello sfasamento temporale tra richiesta e produzione. Grazie al servizio dello scambio sul posto emesso dal GSE, la rete elettrica nazionale viene utilizzata come strumento per l'immagazzinamento virtuale dell'energia elettrica prodotta e non contestualmente auto-consumata.



Figura 3.8 - Teatro della Concordia, vista satellitare impianto fotovoltaico

3.2.3. Centrale termica

Il locale tecnico a cielo aperto, visibile anche dalla [figura 3.8](#), si trova sulla copertura del teatro in corrispondenza della zona fra foyer e sala, ed è accessibile attraverso una rampa di scale interna dal ballatoio dell'area soppalcata. Qui si trova l'impianto di produzione di calore per l'intero teatro, affidata a un gruppo di quattro generatori di calore in acciaio di tipo atmosferico modulare alimentati a gas naturale, che prelevano l'aria comburente direttamente dall'esterno. La modularità e la ripartizione della potenza totale installata su più elementi consentono vantaggi in termini di rendimento medio stagionale e di affidabilità. Infatti, la potenza erogata è sempre calibrata in funzione dell'effettiva richiesta con il metodo dell'accensione a cascata ed in caso di guasto ad un singolo modulo, i rimanenti moduli assicurano comunque l'alimentazione dell'impianto.

La seguente tabella riassume i dati di targa dei quattro generatori di calore.

Caldaia		
Potenza al focolare	460	kW
Potenza resa	416	kW
Rendimento	90	%
Pressione funz.	3.5	bar
Temperatura funz.	70	°C

Tabella 3.3 - Generatori di calore, dati di targa



Figura 3.9 - Teatro della Concordia, gruppo caldaie in locale tecnico a cielo aperto

Il calore generato dal gruppo caldaie viene utilizzato per riscaldare l'acqua tecnica che viene inviata alle batterie di riscaldamento delle unità di trattamento dell'aria e al circuito dei terminali di riscaldamento (ventilconvettori). La produzione di acqua calda sanitaria è affidata a boiler elettrici.

La refrigerazione è invece affidata a un **gruppo frigorifero** dotato di motore endotermico alimentato a gas naturale anziché ad energia elettrica, denominato *Gas engine driven Heat Pump (GHP)* costituito dai seguenti elementi: un motore primo a gas e un sistema di generazione di freddo costituito da un impianto frigorifero a compressione.

Gruppo frigorifero - SuperLow noise unit		
Potenza frigorifera nominale	276	kW
Potenza frigorifera utile	285	kW
Potenza elettrica	7.6	kW
Alimentazione elettrica	400	V trifase, 50 Hz

Tabella 3.4 - Gruppo frigorifero, dati di targa

3.2.4. Impianto di condizionamento

Ventilazione a tutt'aria

Sia la sala sia il foyer sono condizionati attraverso un impianto a tutt'aria: negli ambienti entra solo aria (frazione esterna + parte di ricircolo) trattata nelle apposite sezioni dell'impianto di condizionamento, le **unità di trattamento dell'aria** (UTA). L'impianto è inoltre costituito da canali e terminali per immissione ed estrazione aria e dal circuito dei fluidi termovettori provenienti dalla centrale termica che servono unicamente le UTA e non vengono distribuiti nell'ambiente.

Al Teatro della Concordia sono presenti due unità di trattamento dell'aria, denominate **UTA1** e **UTA2**; queste apparecchiature realizzano il condizionamento dell'aria da inviare in ambiente attraverso diverse operazioni effettuate sul flusso d'aria quali filtrazione, miscelazione, riscaldamento e/o raffreddamento, recupero di calore. La UTA1 è asservita all'area della sala del teatro mentre la UTA2 alla hall polivalente (foyer).



Figura 3.10 - Teatro della Concordia, UTA1 in locale tecnico a cielo aperto

Sulla parete opaca verticale esposta a sud del blocco 3 è installata una parete solare (SolarWall®), costituita da una cavità larga 30 cm rivestita di vernice marrone-nera ($\alpha=0,9$), visibile in [figura 3.11](#). Durante l'inverno, questo dispositivo sfrutta l'irraggiamento solare per innalzare la temperatura dell'aria che si trova al suo interno prima dell'ingresso nella UTA, riducendo perciò il consumo di combustibile del gruppo caldaie durante la stagione di riscaldamento. Quando la radiazione solare riscalda la superficie della facciata, l'aria che si trova all'interno viene riscaldata e si accumula sulla zona superiore del collettore per stratificazione termica; la ventilazione naturale nella cavità aspira attraverso migliaia di piccole perforazioni nuova aria da riscaldare. L'aria calda così ottenuta, che può raggiungere incrementi di temperatura fino a circa $6,5^{\circ}\text{C}^9$, viene poi inviata all'unità di trattamento dell'aria attraverso un apposito ventilatore pilota. In estate, quando l'aria calda non è desiderata, la parete solare viene bypassata e il sistema HVAC attinge direttamente dall'ambiente esterno.



Figura 3.11 - Teatro della Concordia, parete solare

Nelle sezioni della UTA si individuano tre flussi d'aria in ingresso attraverso tre condotte: la condotta di ripresa dell'aria dagli ambienti, la presa dell'aria esterna e quella dalla parete solare. Entrambe le UTA sono dotate di un recuperatore di calore statico aria-aria, uno scambiatore che sotto l'azione di una differenza di temperatura permette il trasferimento di calore tra il flusso di aria di espulsione ed il flusso di aria di immissione. Il rendimento minimo dello scambiatore, definito come rapporto tra l'energia minima trasmessa ed il valore massimo trasmissibile, è stimato dal fornitore pari al 55% con una perdita di pressione massima di 100 Pa. A monte e a valle del recuperatore sono presenti due sezioni di filtrazione attraverso le quali il flusso d'aria viene purificato per eliminare polvere, polline e le particelle inquinanti che derivano in particolare dal vicino passaggio della tangenziale di Torino; tutte le sezioni filtranti sono del tipo a celle sintetiche rigenerabili ad ampia superficie. Sono presenti infine la batteria di raffreddamento alimentata ad acqua tecnica refrigerata proveniente dal gruppo

⁹ Fonte: Collettori solari ad aria SolarWall®. Soluzione a basso costo per il preriscaldamento dell'aria esterna destinata alla ventilazione e al riscaldamento degli ambienti, G. Iezzi, 2005

frigorifero, la batteria di riscaldamento alimentata dall'acqua tecnica calda proveniente dal gruppo caldaie e il ventilatore di mandata.

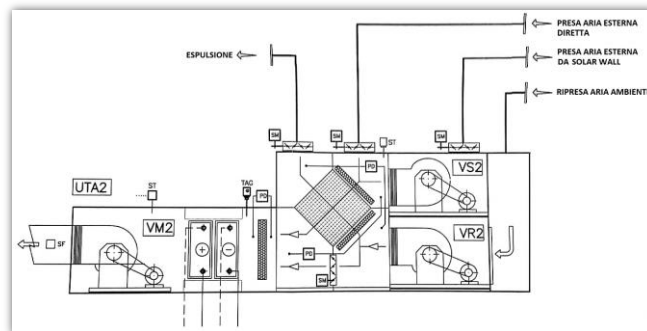


Figura 3.12 - Unità di trattamento dell'aria, schema funzionale

Attualmente il dispositivo SolarWall® risulta inutilizzato a causa di frequenti guasti al ventilatore pilota, il cui software di comando ne attivava l'aspirazione solo qualora si verifici un certo incremento di temperatura, non consentendo il comando manuale: continue accensioni e spegnimenti hanno causato il deterioramento definitivo del ventilatore, che non è stato mai riparato. Al momento, l'impianto funziona perciò con solo ricircolo ed aria eterna.

Le tabelle seguenti riassumono i dati di targa delle batterie termiche delle UTA, del recuperatore di calore e dei ventilatori di mandata e di ripresa.

Batterie termiche e recuperatore di calore UTA

Recuperatore di calore statico	Espulsione	$T=20^{\circ}\text{C}$	16000 m ³ /h
	Aria esterna	$T=-8^{\circ}\text{C}$	18000 m ³ /h
	Efficienza min.	55%	$\Delta P_{\text{max}} = 100 \text{ Pa}$
Batteria riscaldamento invernale o post-riscaldamento estivo	Potenzialità invernale	175	kW
Batteria raffreddamento estivo	Potenzialità	255	kW
	Aria ingresso	$T=30,5^{\circ}\text{C}$	50% U.R.
	Aria uscita	$T=12^{\circ}\text{C}$	98% U.R.

Tabella 3.5 - Batterie termiche e recuperatore di calore, dati di targa

Ventilatori UTA

Ventilatore di ripresa (VR)	Portata	27000	m ³ /h
	Prevalenza utile	150	Pa
	Potenza motore	7,5	kW (4 poli)
	Alimentazione	400	V trifase, 50 Hz
Ventilatore di mandata (VM)	Portata	30000	m ³ /h
	Prevalenza utile	150	Pa
	Potenza motore	11	kW (4 poli)
	Alimentazione	400	V trifase, 50 Hz

Tabella 3.6 - Ventilatori UTA, dati di targa

Condizionamento a tutt'acqua

Nei blocchi costruttivi 1 e 2, dedicati a uffici e camerini, è stato invece adottato il sistema di **condizionamento a tutt'acqua**, versione più semplice dell'impianto che consente però un controllo solo parziale dell'umidità relativa: i terminali in ambiente (ventilconvettori o fan coil) possono essere alimentati con acqua fredda e quindi deumidificare l'aria senza controllo diretto, scaricando la condensa di ciascun ambiente; la ventilazione ottenuta è minima, affidata a infiltrazioni di aria esterna e ventilazione naturale.

L'acqua calda e l'acqua fredda di alimento sono prodotte in centrale termica e distribuite ai terminali con un circuito bitubo a ritorno diretto senza collettori complanari. Sono presenti infatti due tubazioni separate per la mandata e per il ritorno dell'acqua, pertanto la temperatura di ingresso è circa la stessa per tutti i corpi scaldanti e approssimativamente coincidente con quella di uscita della caldaia, al netto delle perdite per dispersione termica sulle tubature.

Complessivamente i ventilconvettori installati nel blocco 2 dei camerini sono tre, uno a parete nella zona adiacente alla quinta, gli altri due sono installati nel controsoffitto del piano terra e del primo piano. Questi ultimi sono ventilconvettori canalizzabili non carenati, la cui aria trattata prodotta viene distribuita nel piano attraverso una serie di condotte e serrande. Negli uffici sono stati installati uno o due fancoil carenati da pavimento per ciascun locale a seconda della dimensione della stanza, per un totale di 12 ventilconvettori a parete. Nella controsoffittatura in prossimità della caffetteria sono installati due ventilconvettori canalizzabili analoghi a quelli del blocco 2, quasi mai in funzione in quanto l'area bar viene utilizzata saltuariamente. Sono infine presenti altri 2 ventilconvettori canalizzabili nella zona della regia e delle gallerie. Queste aree non vengono utilizzate in quanto gli spettatori non hanno accesso alle gallerie del teatro e la regia è stata trasferita al centro della sala. La seguente tabella riassume le potenze complessivamente installate nei blocchi costruttivi:

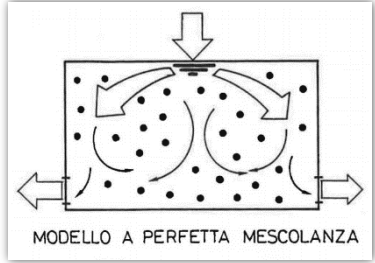
	Potenza termica [kW]	Potenza frigorifera totale [kW]
Blocco 1, piano terra	23.8	12.1
Blocco 1, primo piano	41.9	20.5
Blocco 2, piano terra	21.0	11.1
Blocco 2, primo piano	16.2	8.8
Regia e gallerie	25.8	13.0

Tabella 3.7 - Potenza installata ventilconvettori

Le potenze termiche indicate in *tabella 3.7* sono da intendersi con temperatura ambiente a 20°C e temperatura dell'acqua in ingresso pari a 65°C, le potenze frigorifere fanno riferimento a una temperatura interna di 26°C e temperature di ingresso e uscita dell'acqua refrigerata rispettivamente pari a 7°C e 12°C.

Regolazione e controllo

Il sistema di controllo dell'impianto di condizionamento è composto da una serie di interruttori on/off/auto presenti su di un quadro elettrico dedicato, attraverso il quale è possibile attivare i seguenti circuiti di condizionamento:

- **UTA1:** condizionamento a tutt'aria della sala del teatro, con due condotte in acciaio di sezione circolare con diametro pari a 0,72 m ad una altezza di 10 m dal suolo, disposte lateralmente lungo tutta la sala alla distanza di 150 cm dalle pareti, dotate ciascuna di sette bocchette di mandata a lancio profondo di forma rettangolare di dimensione 610 x 165 mm; le due condotte trattano l'intera portata di aria di mandata (30000 m³/h) prodotta dalla UTA1. La strategia di ventilazione è quella della **perfetta mescolanza**, metodo che prevede che l'aria di rinnovo sia immessa nella zona alta e centrale dell'ambiente e che la ripresa si trovi lateralmente in basso, consentendo la diluizione dell'aria pura con l'aria ambiente. Sono infatti presenti dodici griglie di ripresa calpestabili lungo entrambi i lati della sala di dimensione 900 x 700 mm; tramite la regolazione delle serrande nella UTA, parte dell'aria di ripresa è inviata nuovamente alla UTA, la restante parte è espulsa in ambiente esterno.
- 
- Figura 3.13 - Fonte: www.aivc.org
- **UTA2:** condizionamento a tutt'aria del foyer grazie a due condotte gemelle alle precedenti disposte lateralmente lungo l'ambiente, anch'esse a 10 m dal suolo, dotate ciascuna di nove bocchette di mandata analoghe alle precedenti. La strategia di ventilazione è la medesima della sala, con ventiquattro griglie di ripresa pedonabili di dimensione 1200 x 3000 mm disposte ai piedi delle vetrate del foyer, la cui aria di ripresa è inviata in parte alla UTA ed in parte espulsa in ambiente esterno attraverso la regolazione delle apposite serrande. Poiché l'area soppalcata è stata costruita in un secondo momento rispetto al teatro, per il condizionamento della saletta per riunioni e conferenze stampa sono state allestite delle derivazioni dalla condotta principale di mandata della UTA2. In questo caso sono state posizionate dentro il locale una serie di diffusori lineari, visibili in [figura 3.14](#), e non è stata prevista una estrazione meccanica dell'aria esausta.
 - **Circuito dei FANCOIL:** circuito percorso dall'acqua tecnica calda o fredda generata nella centrale termica. L'accensione di tale circuito prevede che tutti i terminali presenti nella struttura siano raggiunti dall'acqua tecnica, sia negli uffici, nei camerini, e nei servizi igienici, e che la loro attivazione sia a discrezione dell'utente occupante. Per ciascun piano del blocco 2 è presente un termostato la cui sonda comanda la valvola del ventilconvettore canalizzabile, mentre i fancoil del blocco 1 sono dotati ciascuno di una attivazione manuale e controllo automatico della temperatura.

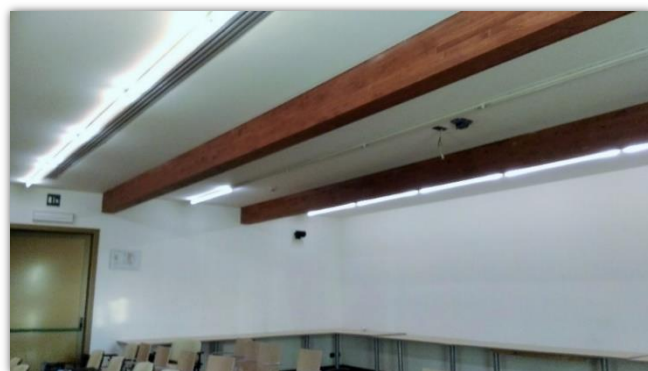


Figura 3.14 - Teatro della Concordia, diffusori lineari nel soppalco

La seguente fotografia è stata scattata dal ballatoio del soppalco: da qui sono visibili le bocchette pedonabili di ripresa dell'aria ai piedi delle vetrate, la condotta a sezione circolare dell'aria di mandata con le bocchette di mandata a lancio profondo, la lama d'aria di colore rosso in corrispondenza delle porte di ingresso, i corpi illuminanti sospesi.



Figura 3.15 - Teatro della Concordia, fotografia del foyer

3.2.5. Impianto di illuminazione

L'impianto di illuminazione del teatro è tal quale a come era stato previsto da progetto e solamente l'illuminazione d'emergenza è stata ristrutturata per necessaria messa a norma nell'estate del 2018. Sulla sommità di dodici dei ventotto pilastri sono presenti delle lampade a tronco di cono, distinguibili in *figura 3.6* e *figura 3.15*, con al loro interno otto tubi fluorescenti lunghi 1.8 m. Poiché ciascuna di queste lampade è collocata per metà all'interno e per metà all'esterno dell'edificio, risultando perciò visibili dalla strada, esse vengono accese ogni volta che nel teatro è in corso uno spettacolo per tutta la durata dello stesso, a indicare la presenza di un evento in corso. L'illuminazione dei grandi spazi è affidata a lampade sospese di tipo proiettore industriale (*figura 3.15*): in particolare nel foyer ne sono installate ventiquattro su due file a gruppi di tre (quattro di esse si trovano all'esterno del vetro, sotto la tettoia principale) e vengono utilizzati insieme a sedici lampade decorative con tecnologia LED (*figura 3.6*) posizionate a metà vetrata sul telaio della facciata. La sala è dotata di altrettanti proiettori industriali disposti con medesimo criterio al di sopra della prima parte di platea. Al di sotto delle gallerie l'illuminazione del fondo della platea è affidata a ventidue faretti da incasso collocati nella controsoffittatura. Al di sopra del palco sono presenti sei lampade fluorescenti a plafone disposte in due file da tre, mentre l'illuminazione scenica è affidata a due americane disposte sopra il palco e una in corrispondenza delle prime file della platea. Negli uffici sono state collocate complessivamente trentuno lampade fluorescenti a plafone mentre nei camerini ve ne sono trenta. Anche nei locali regia e galleria vi sono diciotto lampade della stessa tipologia, e altre venti nel corridoio d'accesso.

La seguente tabella riassume gli apparecchi illuminanti installati per ciascuna area funzionale.

Locale	Altezza [m]	Tipo lampada	Plafoniere	Lampade per plafoniera	Potenza assorbita [W/lampada]
SALA	9.30	fluorescente	24	1	400
	6.50	LED	22	2	42
	10.00	fluorescente	6	2	58
FOYER	8.00	fluorescente	24	1	400
	11.00	fluorescente	12	8	80
	6.50	LED	16	2	30
	3.50	fluorescente	5	2	58
CAMERINI	3.50	fluorescente	12	2	36
	3.50	fluorescente	12	2	58
	3.50	fluorescente	8	1	36
UFFICI	3.20	fluorescente	13	1	36
	3.50	fluorescente	8	2	36
	3.50	fluorescente	10	2	58
REGIA, GALLERIE	3.00	fluorescente	38	1	26
	3.00	fluorescente	6	2	36
	3.00	fluorescente	6	1	18

Tabella 3.8 - Censimento apparecchi illuminanti

4. *Software Design Builder*

4.1. Simulazione termodinamica

Per eseguire le simulazioni di bilancio termico complessivo dell'edificio utili alla costruzione di un modello realistico del caso di studio, il programma utilizzato è **Design Builder**, un software britannico con licenza. Design Builder sfrutta il metodo di **calcolo dinamico**, che consente di effettuare delle simulazioni del comportamento dell'edificio su *base oraria* o *sub-oraria* considerando anche l'accumulo e il rilascio di energia termica da parte della struttura. Ciò richiede una certa specificità dei dati da fornire in input per il calcolo, in particolare è necessario l'inserimento di dati climatici su base oraria oltre a informazioni precise sull'occupazione e l'utilizzo dell'edificio e dell'impianto.

Grazie alla sua semplice interfaccia con pannelli, pulsanti, e diverse schede con cui creare e modificare edifici e variare tutte le caratteristiche costruttive, impiantistiche e di attività, Design Builder è in grado di eseguire calcoli di carichi di riscaldamento e raffrescamento, dell'illuminazione naturale, simulazioni dello stato di fatto di edifici e CFD (fluidodinamica computazionale), dei costi degli edifici. Dati e risultati possono essere visualizzati in formato grafico esportabile in *.png* o in griglie esportabili in *.csv* (comma-separated values). Il formato *.csv* utilizza come carattere separatore tra i campi la virgola ed è facilmente gestibile da numerosi programmi tra cui Microsoft Excel.

Design Builder utilizza algoritmi e metodi di calcolo di un software open source, **EnergyPlus**, con il vantaggio di una significativa semplificazione di interazione per l'utente, consentendo di confrontare con facilità differenti soluzioni progettuali. EnergyPlus è sviluppato dal dipartimento Energia degli Stati Uniti ed è il software di simulazione dinamica degli edifici più diffuso su scala mondiale, in quanto consente la simulazione di tutti i flussi energetici che attraversano le superfici di controllo del sistema in analisi. È composto da tre moduli, tra loro complementari e comunicanti:

- *Surface heat manager* che simula le interazioni edificio-ambiente e tutti i carichi interni;
- *Air heat manager* che tiene conto dell'aria dell'ambiente e dell'impianto;
- *Building systems simulation manager* che simula l'impianto.

A ciascuno di questi blocchi sono associati i sottomoduli che simulano tutti i componenti del sistema edificio-impianto. Lo schema logico viene mostrato nel *grafico 4.1*.

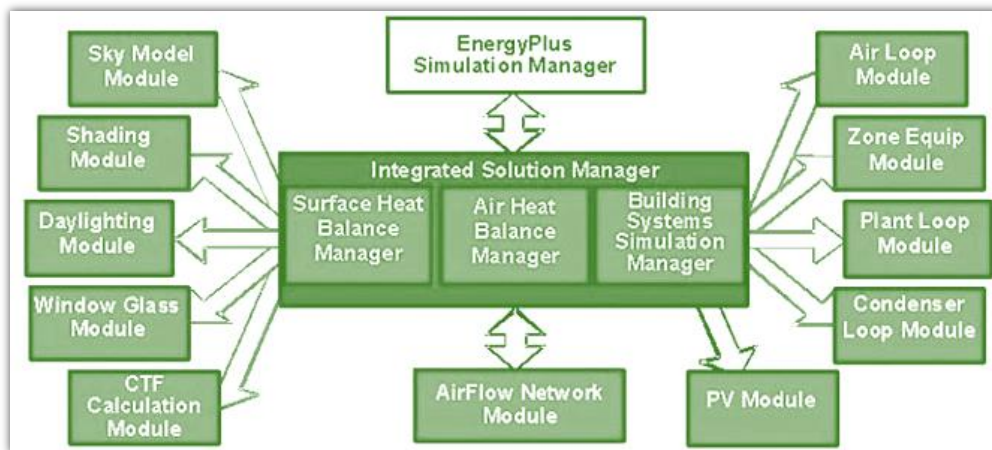


Grafico 4.1 - EnergyPlus, schema logico moduli interni

Sebbene sia diventato uno standard per altri sviluppatori di software, le grandi capacità di EnergyPlus sono oscurate da una interfaccia difficile e complicata, con le sole tabelle da riempire con tutti i tipi di dati e pochi template predefiniti. Un altro grande limite è la procedura di inserimento dei dati geometrici dell'edificio attraverso le coordinate di tutti i vertici delle facciate, che risulta molto complessa e può ostacolare i non esperti. Per questi motivi, molti sviluppatori hanno creato programmi basati sugli stessi algoritmi di calcolo di EnergyPlus ma con immissione dati ed esportazione e interpretazione dei risultati più agevoli, tra cui Design Builder.

4.2. Modello grafico 3D

Design Builder prevede la possibilità di creare il modello grafico degli edifici, ma risulta difficile realizzare con esso modelli di strutture particolarmente complesse. Per il presente lavoro si è stato perciò utilizzato un altro software: **Sketchup**, un'applicazione di computer grafica sviluppata da Google per la modellazione in tre dimensioni, orientata alla progettazione architettonica, all'urbanistica, all'ingegneria civile, allo sviluppo di videogiochi e alle professioni correlate. Con l'ausilio di **OpenStudio**, un'estensione di Sketchup in grado di effettuare simulazioni dinamiche anch'esse basate su EnergyPlus, è stato possibile disegnare il modello geometrico e esportarlo nel formato **.gbXML**, gestibile da Design Builder. Lo schema XML (eXtensible Markup Language) è un tipo di linguaggio informatico testuale che consente ai programmi di comunicare informazioni con poca o nessuna interazione umana. In particolare, l'estensione **.gbXML** è stata sviluppata proprio per facilitare il trasferimento delle informazioni di costruzione archiviate in modelli costruiti con software di progettazione edilizia, consentendo l'interoperabilità tra progettazione di edifici e software di analisi ingegneristica e simulazione energetica.

4.3. Dati climatici

Aspetto indispensabile per l'analisi energetica del comportamento dell'edificio, i dati climatici rappresentano la contestualizzazione territoriale, ambientale e climatico-meteorologica dell'edificio in esame: Design Builder richiede i dettagli del luogo (quota s.l.m., temperature orarie, precipitazioni e irraggiamento solare, esposizione al vento), i riferimenti per le condizioni di progetto dell'impianto di riscaldamento e di raffrescamento e quelli per la simulazione energetica.

Sul sito internet del Dipartimento di Energia USA, sviluppatore di EnergyPlus, sono resi disponibili i file climatici in formato *.epw* (*energy plus weather file*), necessari a Design Builder per effettuare la simulazione su base oraria. Le grandezze importate sono la temperatura dell'aria esterna e la temperatura di rugiada, l'umidità relativa, la pressione atmosferica, l'irraggiamento orizzontale globale, la componente orizzontale diffusa e normale diretta, l'andamento delle precipitazioni e del vento. Poiché la centralina climatica di Venaria Reale, denominata Venaria Ceronda, non è dotata di strumenti di misura per tutte le grandezze richieste e Venaria Reale non è compresa nelle località disponibili nel database del Dipartimento di Energia degli Stati Uniti d'America, si utilizzano i dati climatici riferiti alla centralina climatica di Caselle Torinese, comune confinante con Venaria Reale di cui è disponibile il file climatico nella libreria di Design Builder.

Per lo svolgimento del presente lavoro di tesi è stata contattata anche l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (ARPA) che ha comunicato i valori di temperatura medi, massimi e minimi giornalieri rilevati dalla centralina climatica Venaria Ceronda.

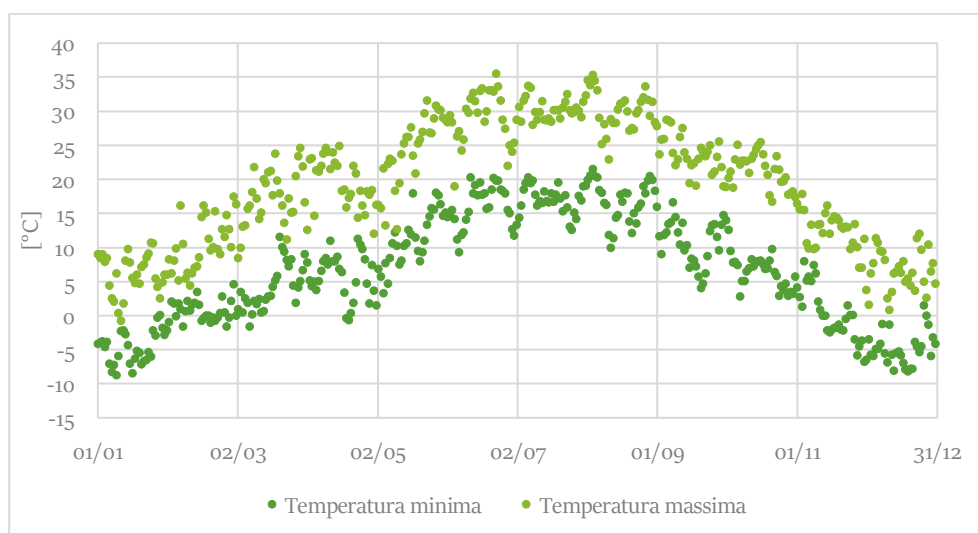


Grafico 4.2 - Temperatura massima e minima, anno 2017, Venaria Reale (Fonte: ARPA Piemonte)

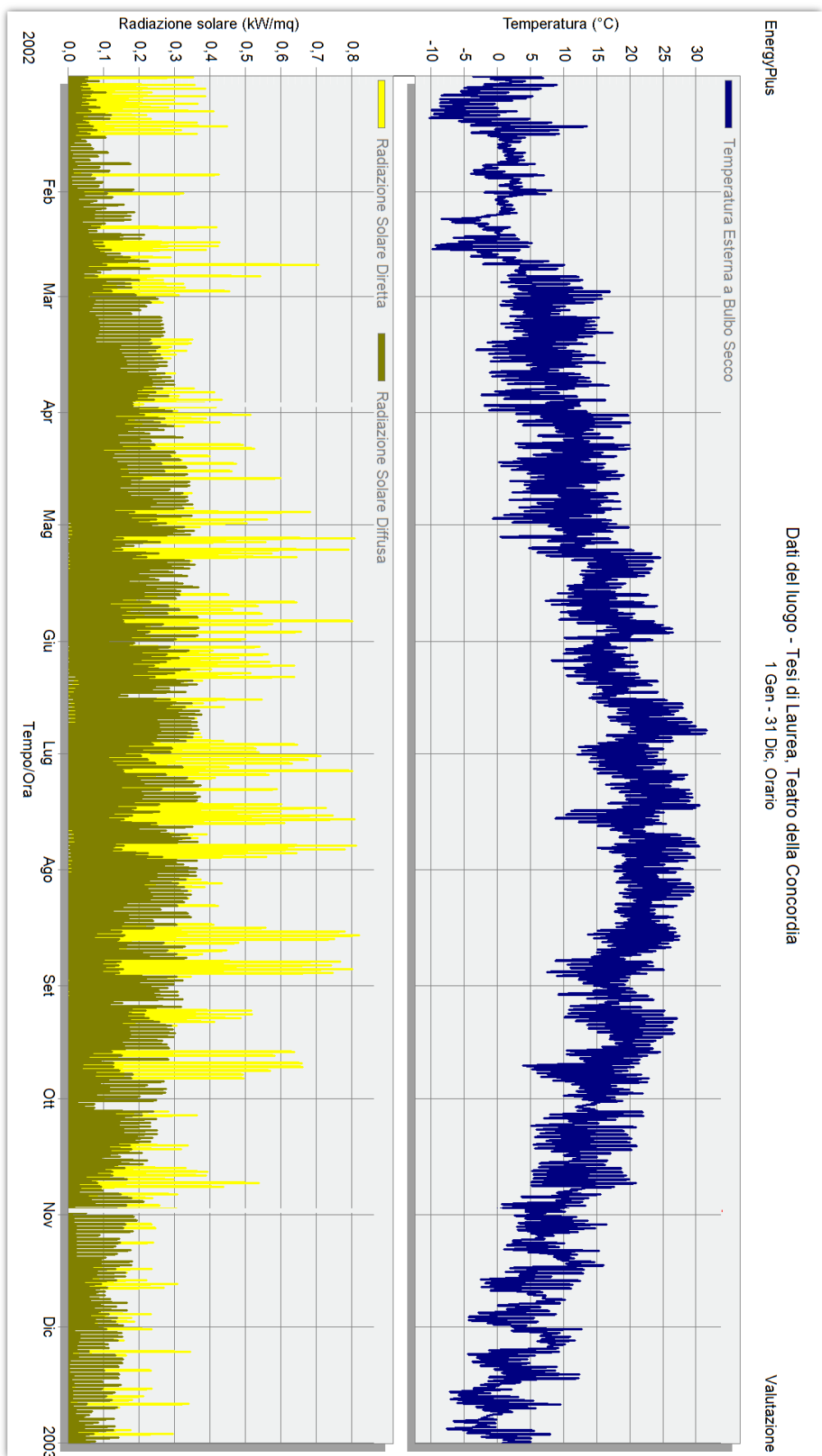


Grafico 4.3 - Design Builder, andamento orario di temperatura esterna e radiazione solare

5. Implementazione con Design Builder

5.1. Il modello .gbXML, da OpenStudio a Design Builder

Come anticipato nel *Capitolo 4*, il modello grafico è stato costruito con il software Sketchup e l'estensione OpenStudio, attraverso la quale è stato possibile creare diversi *Spazi*, che corrispondono alle zone termiche. Poiché è necessario considerare l'edificio nella sua interezza per effettuare valutazioni corrette su di esso, sono state definite anche le zone dell'edificio non occupate o non condizionate: Design Builder si basa infatti sul metodo di calcolo dinamico di EnergyPlus ed effettua i calcoli di bilancio energetico per ogni ora tenendo conto del calore immagazzinato nella massa dell'edificio e rilasciato da essa. Vengono dunque modellati su base oraria la trasmissione e lo stoccaggio termico, il flusso di calore tramite ventilazione, gli apporti interni e solari nelle diverse zone dell'edificio.

Secondo la norma UNI TS 11300-1, la zonizzazione non è richiesta se gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di condizionamento o se le temperature interne di regolazione per il riscaldamento o per il raffrescamento differiscono di meno di 4 K. Le zone termiche individuate in questa fase sono:

- il foyer;
- la sala;
- gli uffici;
- i camerini;
- i locali regia;
- il magazzino lato palco.

Una volta definiti pareti e pavimenti, sono state disegnate le aperture: grazie al plug-in OpenStudio, il software riconosce automaticamente le figure disegnate sulle pareti come aperture, in particolare attribuisce le caratteristiche di *finestra* a quelle rialzate rispetto al terreno e di *porta* a quelle a filo del piano del pavimento. Si noti che la parete a tutta vetrata del foyer è indicata in questa fase come generica parete verticale, poiché le caratteristiche di tutte le superfici saranno inserite in seguito su Design Builder. Le partizioni interne a ciascuna zona non sono state disegnate perché non erano rilevanti per i calcoli.

L'orientamento dell'edificio rispetto alle coordinate geografiche è conforme alla posizione reale del teatro, con l'ingresso del foyer rivolto verso ovest. Dopo aver definito l'involucro dell'edificio, si utilizza lo strumento “*Surface Matching*” per impostare le condizioni al contorno di ciascuna superficie:

ciò consentirà connessioni termiche tra le zone e informerà Design Builder se applicare la costruzione di tipo *involucro esterno* o *partizione interna*.

Di seguito vengono riportate alcune immagini di quanto ottenuto.

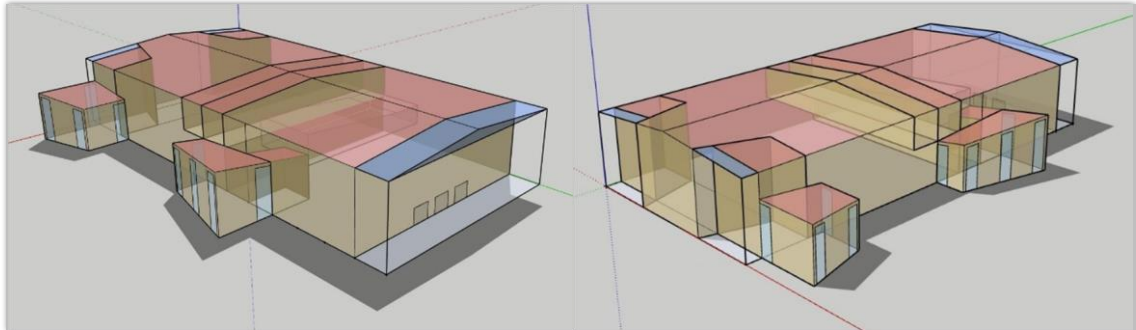


Figura 5.1 - Sketchup Rendering, tipo di costruzione

I rendering riportati in [figura 5.1](#) illustrano due viste isometriche dell'edificio, le cui superfici sono colorate in base al tipo di costruzione secondo OpenStudio: rosso per le coperture, blu per i piani d'ombreggio, azzurro per le finestre, giallo per le pareti verticali e bianco per i pavimenti.

La [figura 5.2](#) mostra il rendering secondo condizioni al contorno: grazie a OpenStudio è possibile infatti visualizzare di colore verde le partizioni interne, ovvero quelle superfici in comune tra le diverse zone termiche, mentre le pareti che affacciano sull'esterno sono di colore blu e i pavimenti di colore giallo.

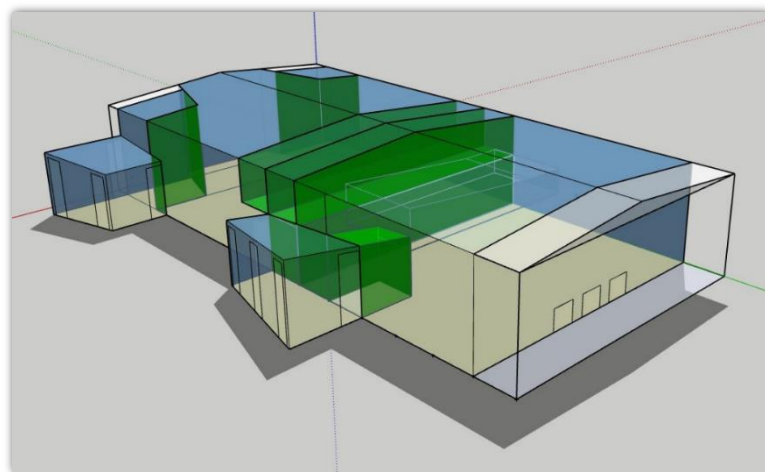


Figura 5.2 - Sketchup Rendering, condizioni al contorno

Una volta completate queste operazioni, il file è stato esportato nel formato *.gbXML* che è l'unico che Design Builder supporta per l'importazione del modello 3D.

Viene successivamente creato un nuovo progetto con Design Builder, la cui prima impostazione definita riguarda la località dell'edificio, al fine di impostare i dati climatici di progetto invernale, progetto

estivo e simulazione EnergyPlus. I valori che sono stati modificati rispetto a quelli di default sono i seguenti:

- Latitudine, longitudine, altitudine: 45.11, 7.63, 256 m s.l.m.;
- Temperatura esterna di progetto invernale: -8 °C.

Vengono inoltre modificati i fattori di conversione da sito a origine, che sono i moltiplicatori per convertire l'energia del sito in energia di fonte per ciascun tipo di carburante, necessari per tracciare il fabbisogno di calore ed elettricità dell'edificio in termini di immissione di fronte grezza, tenendo conto delle perdite e consentendo una valutazione completa dell'energia. I fattori di conversione da sito a origine in Italia sono indicati dal D.M. 26/06/2015 e valgono 2.42 per l'elettricità e 1.05 per il gas naturale. Viene infine creato un nuovo edificio con l'importazione del file *.gbXML* progettato in SketchUp: come atteso, Design Builder riconosce automaticamente le zone termiche create in OpenStudio e per ciascuna di esse definisce le superfici come pareti esterne, partizioni, pavimenti, tetti e soffitti, a seconda della loro definizione nel file originale. Anche l'orientamento dell'edificio, già impostato correttamente su Sketchup, viene riconosciuto e adottato da Design Builder.

5.2. Scelta e definizione dei template

Template di costruzione

Per ciascuna zona termica vengono determinate nella scheda "Costruzione" le stratigrafie dei diversi componenti dell'edificio, distinti secondo le loro condizioni al contorno. Esse sono state definite con il metodo "Layers", che consente di inserire il numero di strati desiderati e utilizzare i materiali predefiniti forniti dal database di Design Builder oppure crearne di nuovi in base alla necessità. Viene inoltre impostata la permeabilità all'aria di ciascun gruppo costruttivo attraverso la definizione del tasso di infiltrazione dell'aria, in questa fase pari al valore di 0.6 vol/h. La seguente tabella mostra i calcoli delle trasmittanze termiche di muri esterni, tetto inclinato, pavimento controterra e pareti divisorie interne effettuati da Design Builder.

Trasmittanze termiche elementi costruttivi opachi [W/m ² K]				
	Parete esterna	Tetto inclinato	Pavimento	Partizione
BLOCCO 1 E 2	0,298	0,300	0,324	1,149
BLOCCO 3	0,385	0,263	0,324	1,149

Tabella 5.1 - Trasmittanze termiche, calcolo Design Builder

Template delle aperture

Per simulare le finestre degli avancorpi di uffici e camerini è stato scelto un template predefinito di Design Builder disponibile nella scheda “Aperture”, costituito da un vetro doppio 6/6/6 mm con intercapedine 100% aria, mentre la stratigrafia del vetro del foyer è stata ricostruita immettendo per ciascuno strato il tipo e lo spessore di materiale così come descritto nel [paragrafo 3.2.1](#) nella parte relativa alle caratteristiche dell’involucro trasparente. La seguente tabella illustra i risultati dei calcoli delle proprietà delle aperture effettuati da Design Builder.

Proprietà elementi costruttivi trasparenti		
	Infissi	Vetrata Foyer
Fattore solare [%]	0,503	0,589
U _g -Value [W/m ² K]	2,094	1,477

Tabella 5.2 - Proprietà aperture, calcolo Design Builder

Template di occupazione

La sala del Teatro della Concordia può accogliere fino a 786 spettatori seduti e 2000 persone in piedi, grazie alla possibilità di rimuovere tutte le poltrone e trasformare la sala del teatro in un parterre da concerto. I profili di occupazione del Teatro sono stati ipotizzati come segue, effettuando alcune semplificazioni per permettere una maggiore semplicità di calcolo.

Uffici: il personale della direzione del teatro, composto da un massimo di 10 persone, è presente in negli uffici dal lunedì al sabato, dalle ore 9:00 alle ore 18:30, con pausa pranzo dalle 13:00 alle 14:30. Il periodo lavorativo esclude la prima settimana di gennaio e il periodo estivo dal 20 luglio al 1 settembre. Con queste ipotesi è stato valutato il coefficiente di densità di occupazione, pari a 0.08 persone/m², ed è stato formulato il programma compatto basato sul set di dati di *EnergyPlus Schedule: Compact* con il quale si è definita la frazione di occupazione per ogni intervallo temporale di interesse.

Sala: osservando la programmazione degli eventi della stagione teatrale corrente e intervistando la direzione del teatro, è stata ipotizzata una frequenza settimanale di due/tre spettacoli o concerti serali. Nella compilazione del programma compatto la scelta dei giorni settimanali di evento è avvenuta in maniera casuale, tenendo conto periodi di chiusura della struttura (giovedì, sabato e domenica dal 7 gennaio al 20 luglio; giovedì e sabato dal 1 settembre al 31 dicembre). Anche in questo caso è stata inserita la densità di occupazione, pari a 1.15 persone/m², il cui valore è stato stabilito conoscendo l’area della superficie calpestabile della platea e considerando la situazione di affluenza intermedia tra il layout di parterre e quello di platea di teatro.

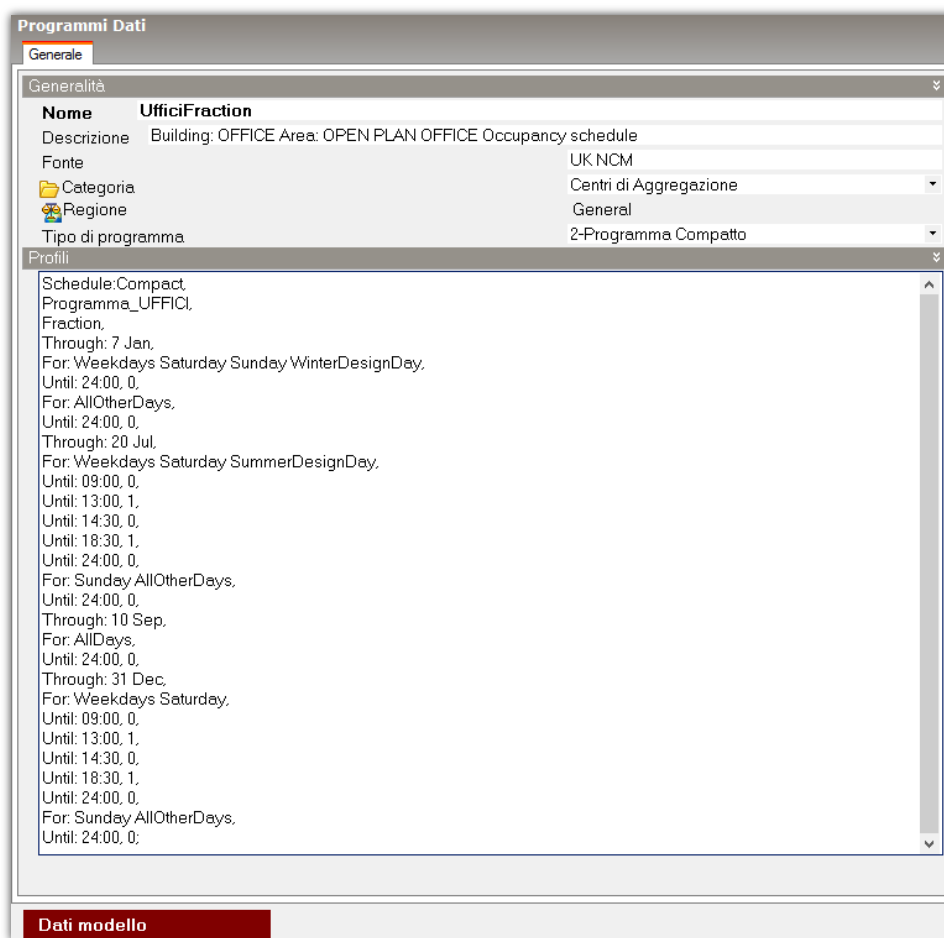


Figura 5.3 - Design Builder, esempio di Programma Compatto: Uffici

Foyer: con una densità di occupazione pari a 1.1 persone/m², la programmazione del foyer è stata definita in modo da essere complementare a quella della sala, ovvero considerando in primo luogo che non tutte le persone che in occasione degli eventi accedono alla sala si trovino nel foyer nello stesso momento ma che defluiscano in base all'orario di arrivo. In seconda battuta è stato anche considerato che all'inizio e durante lo spettacolo solo il 10% delle persone è considerato ancora all'interno del foyer. Anche in questo caso è stato usato il programma compatto, con il quale si definisce l'inizio dell'affluenza alle ore 17:00.

Camerini: la zona dei camerini viene considerata occupata da un massimo di 50 persone (densità di occupazione 0.3 persone/m²), valore stimato dalla direzione del teatro tenendo conto di concerti, spettacoli teatrali e saggi di danza; il programma compatto costruito appositamente stabilisce che l'occupazione inizi alle ore 9:00 del giorno dell'evento sino alle 24:00.

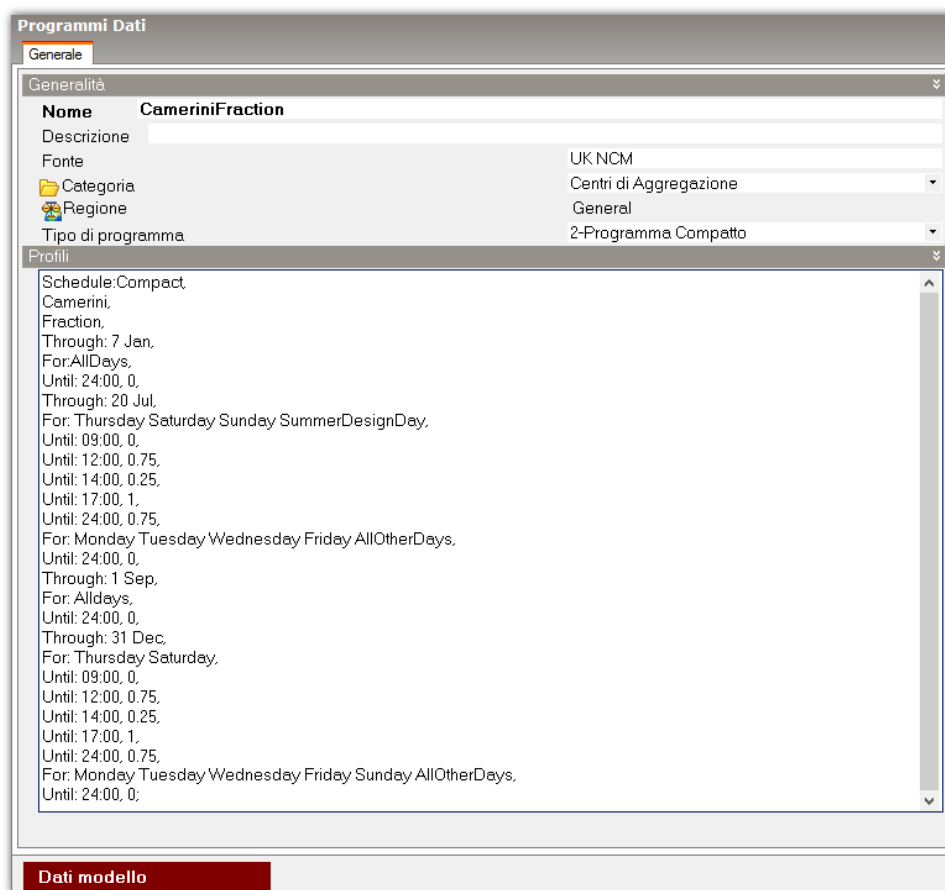


Figura 5.4 - Design Builder, esempio di Programma Compatto: Camerini

Magazzino, Regia: per questi locali sono stati adottati rispettivamente i template predefiniti <none> e <unoccupied>; il primo prevede l'assenza di terminali di condizionamento, il secondo l'assenza di persone per 24 ore al giorno tutti i giorni dell'anno.

Template di illuminazione e utilizzo dei dispositivi elettronici

L'illuminazione generale è stata impostata per ciascuna zona termica in base ai periodi di occupazione. Per inserire agevolmente la potenza per unità di superficie è stata sostituita l'unità di misura di default $[W/m^2/100 \text{ lux}]$ con $[W/m^2]$ nella scheda Opzioni modello-Dati Apporti-Unità apporto illuminazione. Di seguito viene riportata la semplificazione dei profili di illuminazione e utilizzo di altri dispositivi elettronici, basta su quanto già impostato per l'occupazione.

Uffici: dopo aver selezionato il template delle lampade fluorescenti per rappresentare quanto indicato in [tabella 3.8](#), con un programma compatto è stato impostato il programma ON/OFF dell'illuminazione generale, in particolare ON nei sei giorni lavorativi dalle 9:00 alle 11:00 e dalle 15:30 alle 18:30 e OFF per la parte restante del tempo. Negli uffici è inoltre considerata la presenza dei computer e di altri dispositivi d'ufficio quali fotocopiatrici e stampanti, per un totale stimato di $11.77 W/m^2$ di potenza installata. Per tali dispositivi si considera un apporto interno pari al 10% della potenza assorbita.

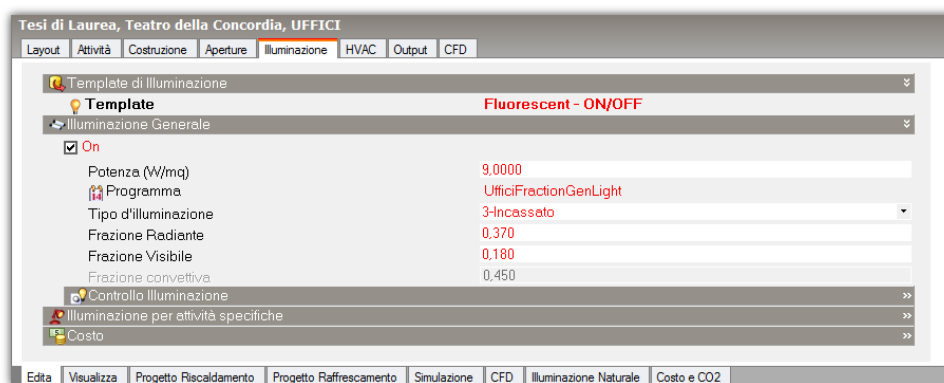


Figura 5.5 - Design Builder, illuminazione uffici

Sala: anche in questo caso viene inserito un programma compatto, che considera l'illuminazione generale accesa dalle 17:00 alle 21:00 del giorno di evento e ridotto al 10% durante le ore di spettacolo. Per tenere conto dell'apporto dovuto alle attrezzature luce-audio è stato impostato un programma compatto di funzionamento di "macchinari aggiuntivi" il cui periodo di funzionamento è definito in base alle informazioni raccolte da un colloquio con il responsabile tecnico dell'audio del teatro. La potenza massima che può essere fornita al palco durante uno spettacolo è di 80 kW, per cui viene ipotizzato un apporto di 60 W/m²; nei giorni di spettacolo è dunque previsto un funzionamento al 50% dalle 11:00 alle 16:00, del 75% dalle 16:00 alle 21:00 e del 100% dalle 21:00 alle 24:00.

Foyer: la programmazione del funzionamento dell'illuminazione generale del foyer è stata definita nulla nei giorni in cui non vi sono spettacoli, e pari al 75% dalle 17:00 alle 19:30 del giorno di spettacolo e completamente acceso dalle ore 19:30 alle 24:00.

Camerini: viene utilizzato il programma compatto costruito per l'occupazione con il quale si stabilisce che l'illuminazione risulta accesa dalle 9:00 del giorno dell'evento sino alle 24:00, a rappresentare la necessità di luce artificiale per le operazioni di preparazione di acconciature e trucco.

Magazzino, Regia: per questi locali è stato adottato il template Off 24/7 secondo il quale l'illuminazione artificiale è spenta per 24 ore al giorno tutti i giorni dell'anno.

5.3. Generazione fotovoltaica

Con il software Design Builder è stato possibile inserire la produzione fotovoltaica dinamica tramite la creazione di quattro array fotovoltaici modellati al fine di rappresentare l'effettivo impianto sull'edificio reale. Sono stati dunque ricreati i moduli LG-Chen[®] nella loro forma, disposizione, orientamento e inclinazione e collegati all'inverter trifase SCHUCO[®] con potenza massima 120 kW. Gli array sono inseriti come quattro pannelli unici, la cui larghezza è uguale a quella indicata nel diagramma del progetto esecutivo della fornitura in opera dell'impianto fotovoltaico. La scheda di costruzione del

collettore solare fotovoltaico consente infatti di selezionare il tipo di prestazione “*Un diodo equivalente*”, che permette l’inserimento del numero di stringhe in serie e in parallelo per ciascun array. I quattro gruppi generatori sono stati impostati tutti in regime “*Carico di base*”, ovvero vengono considerati disponibili a funzionare anche qualora la quantità di energia elettrica prodotta superi la domanda totale di energia elettrica dell’impianto.

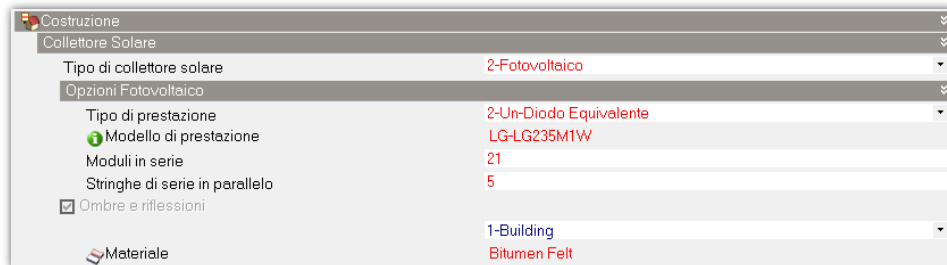


Figura 5.6 - Design Builder, scheda di inserimento array PV

La modalità di visualizzazione del software permette di avere un rendering con diagramma solare, attraverso il quale è immediato riconoscere la posizione vantaggiosa dell’impianto fotovoltaico del teatro.

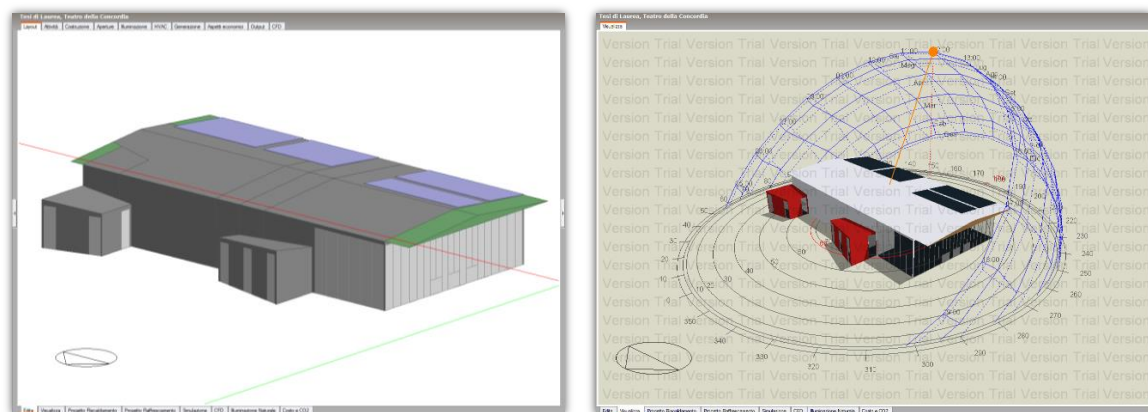


Figura 5.7 - Design Builder Rendering, layout e diagramma solare

5.4. Funzionamento <Sistema HVAC>

La [figura 5.8](#) mostra la schematizzazione dell’intero sistema HVAC del Teatro della Concordia: il software Design Builder è infatti dotato di una interfaccia grafica in cui è possibile inserire i componenti EnergyPlus nell’impianto HVAC con l’utilizzo del Template di Opzioni modello "Detailed Design with HVAC / Dati HVAC dettagliati". Modificando opportunamente un *Template HVAC dettagliato* predefinito disponibile in libreria denominato “VAV Reheat, Air-Cooled Chiller”, è stato definito in dettaglio il sistema HVAC collegando graficamente in un disegno impiantistico semplificato tutti i componenti con i diversi circuiti dedicati. Sono raffigurati il circuito ad acqua calda (colore rosso) generata dal gruppo caldaie e il circuito ad acqua refrigerata (colore blu) prodotta dal refrigeratore, che giungono

alle quattro zone termiche condizionate. Ciascun circuito è diviso in due sotto-circuiti, uno di domanda “Demand side” e uno di alimentazione “Supply side”: i sotto-circuiti “Supply side” comprendono i generatori di calore o di acqua refrigerata, i collettori primari di mandata e ritorno e il set-point manager dei gruppi di generazione; analogamente i sotto-circuiti “Demand side” rappresentano la sezione in cui tutti i terminali delle zone termiche di destinazione vengono collegati alla sorgente di riferimento. Si possono inoltre individuare le condotte dell’aria, di colore nero, che collegano le due UTA alle due zone condizionate a tutt’aria, la sala e il foyer.

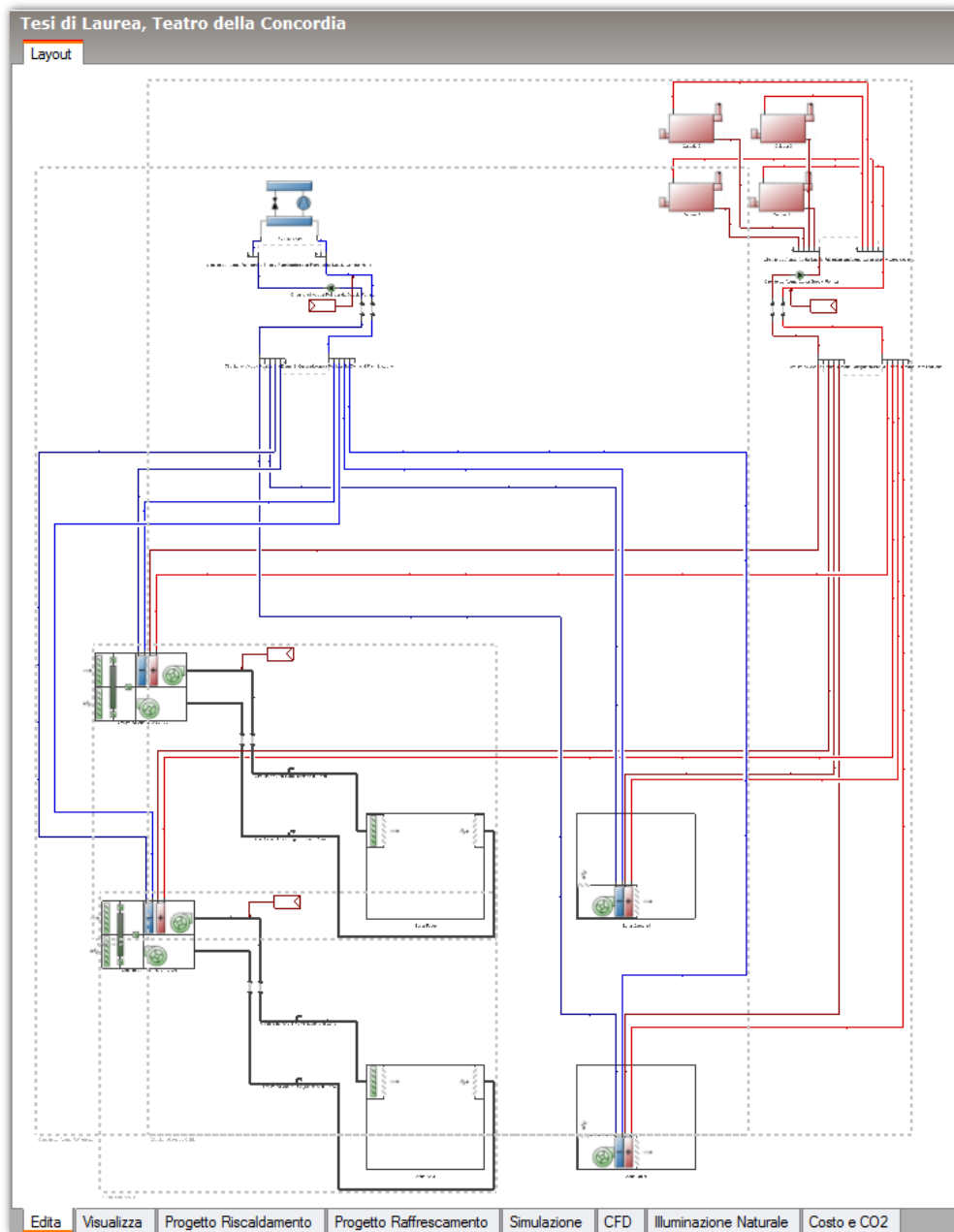


Figura 5.8 - Design Builder, schema HVAC

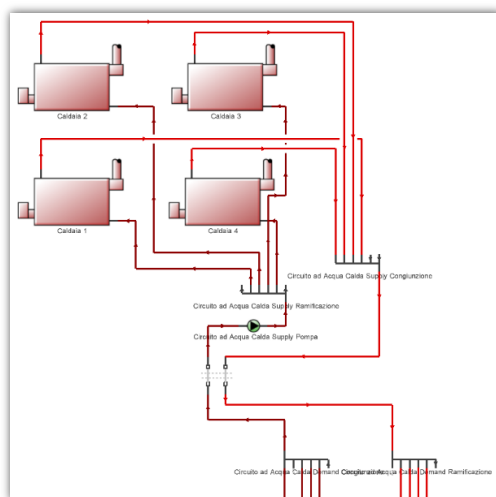


Figura 5.9 - Design Builder, circuito acqua calda

In particolare, il circuito “Demand side” dell'acqua calda è costituito dalle quattro caldaie atmosferiche “*Gas-fired boiler (non-condensing)*” presenti nel locale tecnico a cielo aperto, la cui potenza nominale è stata impostata a 460000 W e il rendimento termico a 0.9 così come da dati di targa; i tubi dell’acqua tecnica in uscita dalle caldaie convergono in un collettore denominato “Congiunzione”, dal quale viene inviata l’acqua calda al collettore di “Ramificazione” del circuito “Supply Side” perchè raggiunga ogni zona termica condizionata. Nel set-point manager è stato impostato il funzionamento in compensazione climatica, con temperatura di set-point dell’acqua calda che varia da 70°C a 60°C a seconda della temperatura esterna. Nelle impostazioni generali del circuito idronico dell’acqua calda viene infine impostato il funzionamento a cascata dei quattro generatori.

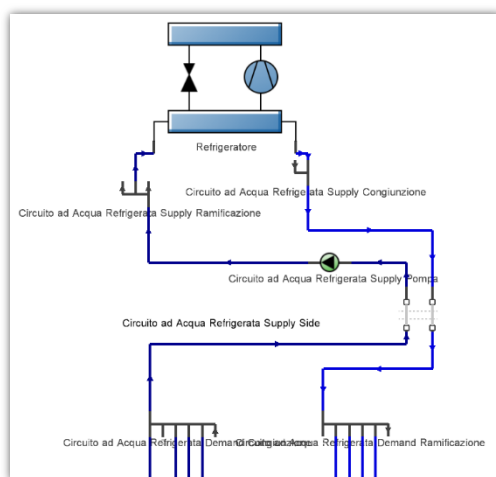


Figura 5.10 - Design Builder, circuito acqua refrigerata

Analogamente, il circuito “Demand side” dell'acqua refrigerata è costituito dal refrigeratore, la cui potenza nominale è stata impostata a 276 kW con un COP di default pari a 5.5, e dalle tubazioni dell’acqua tecnica in uscita e in ingresso dal refrigeratore. Come nel caso del circuito ad acqua calda,

il set-point manager è stato impostato in compensazione climatica, con temperature di mandata tra i 12°C e i 7°C al variare della temperatura esterna. L'acqua refrigerata è messa in circolazione da una pompa sul circuito di ritorno e tramite collettori di congiunzione e ramificazione raggiunge i terminali di destinazione e le batterie fredde delle UTA. La potenza elettrica assorbita della pompa è stata lasciata in "Autosize", come la quantità di acqua nel circuito.

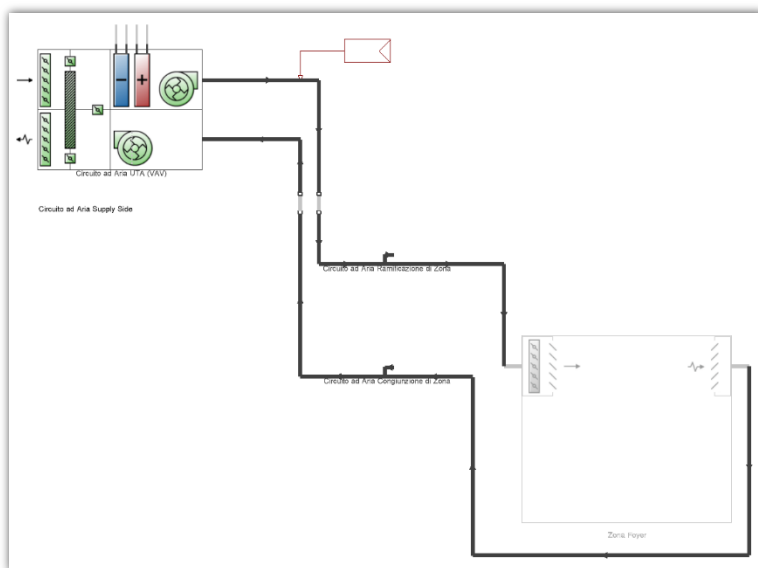


Figura 5.11 - Design builder, circuito ad aria

I circuiti ad aria sono rappresentati da una UTA, in cui sono distinguibili le batterie di riscaldamento (potenza nominale 175 kW), di raffrescamento (di cui sono state inserite le temperature nominali di ingresso e uscita rispettivamente pari a 7°C e 12°C) e di recupero termico con lo scambiatore a piastre. Viene inoltre impostata la prevalenza dei ventilatori pari a 150 Pa e il ricircolo, impostando una portata minima di aria esterna fissa, autocalcolata dal software. Nella zona termica di destinazione è possibile distinguere il singolo canale di distribuzione dell'aria VAV e la corrispondente ripresa.

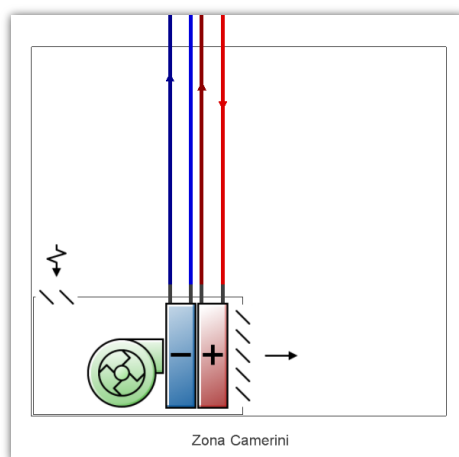


Figura 5.12 - Design Builder, unità fancoil

Infine, per le zone condizionate attraverso i ventilconvettori, sono state inserite le unità fancoil con ventilatori a portata variabile. La schematizzazione di Design Builder prevede che tutta la potenza termica e frigorifera installata nella zona venga concentrata in un unico ventilconvettore di zona. Le potenze sono state stabilite in base al numero e alla potenza di terminali installati nella zona termica considerata, come mostrato in *tabella 3.7*.

Per ciascuna zona termica vengono stabiliti i valori di set-point negli orari di occupazione di set-back per gli orari di non utilizzo degli ambienti. In particolare:

	Set-point [°C]	Set-back [°C]
FOYER	20	12
SALA	21	12
UFFICI	21	12
CAMERINI	22	5
LOCALI REGIA	10	10

Tabella 5.3 - Valori di set-point e set-back per simulazione

6. Risultati stato di fatto

In questo capitolo vengono analizzati i risultati del modello del Teatro della Concordia ottenuti con il software di simulazione energetica Design Builder, al fine di verificarne accuratezza e validità.

6.1. Verifica dimensionamento stagione invernale

6.1.1. Firma energetica, potenza generatore

La firma energetica, descritta nel [paragrafo 2.2.1.](#), è la rappresentazione grafica del consumo in funzione della temperatura esterna. Essa non dà indicazione sulle prestazioni ottimali di un edificio, è bensì uno strumento di analisi qualitativa utile per comparare i valori di consumo calcolati ed i consumi reali; in questo contesto verrà utilizzato per confrontare i consumi simulati col software Design Builder e quelli dell'edificio reale raccolti attraverso gli storici delle bollette.

Per rappresentare graficamente il consumo di energia per il riscaldamento in funzione della temperatura esterna, è necessario raccogliere i dati fatturati di gas naturale prelevato dalla rete di distribuzione. Si analizzano i prelievi di gas rilevati e comunicati nelle bollette messe a disposizione dalla Fondazione Via Maestra, riferite alle stagioni invernali 2016-2017 e 2017-2018. I dati vengono riportati in corrispondenza della temperatura esterna media mensile registrata negli stessi periodi dalla centralina ARPA – Venaria Ceronda, il più vicino centro di monitoraggio meteorologico.

Periodo	Consumo	Temperatura esterna
[-]	[Sm ³]	[°C]
Ott 2016	723	11.6
Nov 2016	3920	6.8
Dic 2016	4994	2.5
Gen 2017	8511	-0.2
Feb 2017	4694	4.8
Mar 2017	2230	10.4
Apr 2017	725	13.0

Tabella 6.1 - Storico bollette gas naturale 2016-2017 e temperature esterne medie mensili

Periodo	Consumo	Temperatura esterna
[-]	[Sm ³]	[°C]
Ott 2017	702	12.9
Nov 2017	3002	5.6
Dic 2017	5969	-0.1
Gen 2018	5301	4.1
Feb 2018	6747	2.1
Mar 2018	5859	6.4
Apr 2018	1364	14.1

Tabella 6.2 - Storico bollette gas naturale 2017-2018 e temperature esterne medie mensili

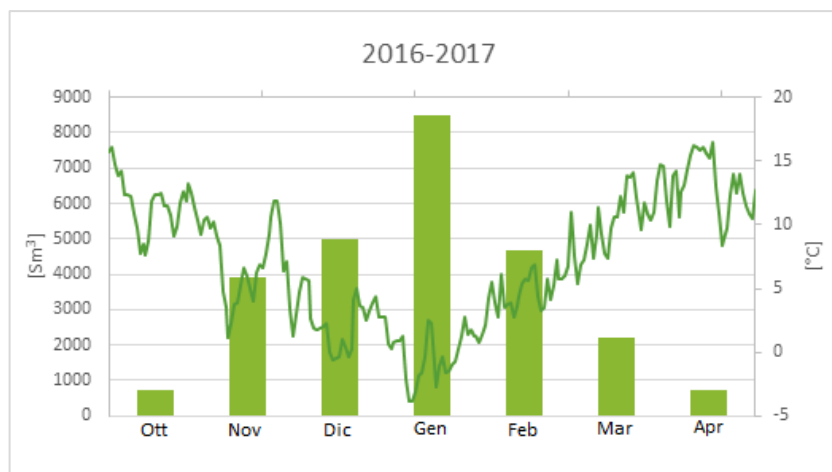


Grafico 6.1 - Andamento consumo e temperatura esterna giornaliera 2016-2017

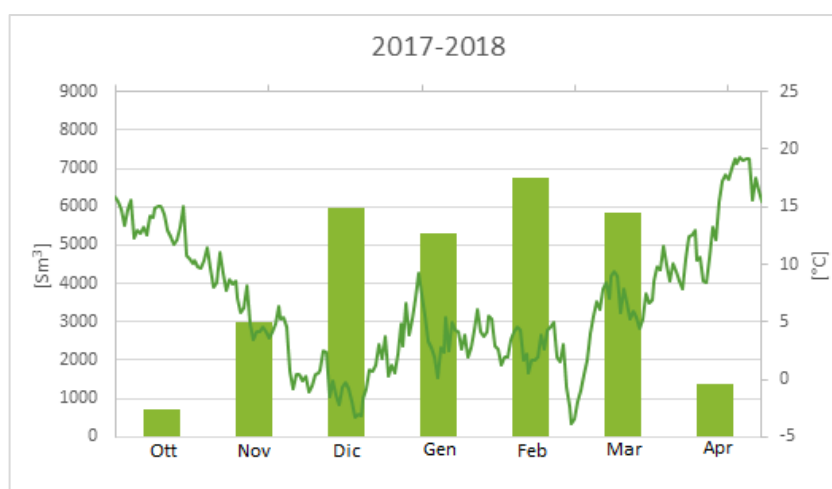


Grafico 6.2 - Andamento consumo e temperatura esterna giornaliera 2017-2018

I dati di consumo di gas naturale sono convertiti in dati di energia consumata tramite il potere calorifico del gas naturale, approssimato costante e pari a 35 MJ/Sm^3 (9.72 kWh/Sm^3). Per la costruzione di un grafico che metta in luce la correttezza del dimensionamento del gruppo caldaie è necessario costruire la firma energetica con riferimento alla potenza media generata: a tale scopo si effettua una ipotesi semplificativa sulle ore di funzionamento dell'impianto di riscaldamento, in base alla programmazione teatrale. Si considera infatti che per ciascun evento l'impianto di riscaldamento sia acceso tra le 10 e le 11 ore, con i seguenti risultati:

Ore di funzionamento mensili

Mese	Giorni di spettacolo	Ore funzionamento impianto
Ott	Giovedì - Sabato	85
Nov	Giovedì - Sabato	85
Dic	Giovedì - Sabato	85
Gen	Giovedì - Sabato - Domenica	125
Feb	Giovedì - Sabato - Domenica	125
Mar	Giovedì - Sabato - Domenica	125
Apr	Giovedì - Sabato - Domenica	125

Tabella 6.3 - Ipotesi ore di funzionamento impianto di riscaldamento

Con queste ipotesi viene calcolata la potenza media mensile dell'impianto termico come rapporto tra energia e ore di funzionamento, con la quale si costruisce la firma energetica per il dimensionamento.

Periodo	Potenza	Temperatura esterna
[-]	[kW]	[°C]
Ott 2016	82.7	11.6
Nov 2016	448.4	6.8
Dic 2016	571.2	2.5
Gen 2017	662.0	-0.2
Feb 2017	365.1	4.8
Mar 2017	173.4	10.4
Apr 2017	56.4	13.0

Tabella 6.4 - Potenza media mensile generatori di calore 2016-2017

Periodo	Potenza	Temperatura esterna
[-]	[kW]	[°C]
Ott 2017	80.3	12.9
Nov 2017	343.4	5.6
Dic 2017	682.7	-0.1
Gen 2018	412.3	4.1
Feb 2018	524.8	2.1
Mar 2018	455.7	6.4
Apr 2018	106.1	14.1

Tabella 6.5 - Potenza media mensile generatori di calore 2017-2018

Con lo strumento della regressione lineare del software Microsoft Excel vengono tracciate le due rette che rappresentano le firme energetiche delle due stagioni invernali considerate.

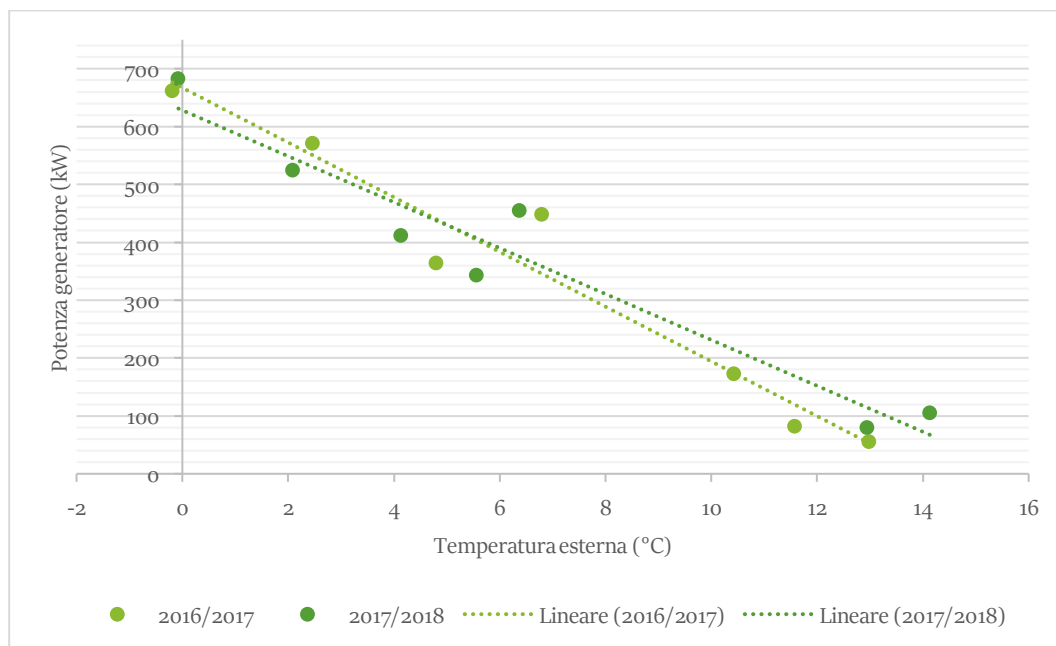


Grafico 6.3 - Firma energetica per il dimensionamento (1)

Per verificare il calcolo di dimensionamento, si prolungano queste rette sino alla temperatura di progetto invernale, che per Torino è uguale a -8°C . Il valore che la potenza del generatore assume per tale temperatura esterna è quella che rappresenta il comportamento dell'edificio in termini di massima potenza che può essere richiesta al generatore nelle condizioni di progetto.

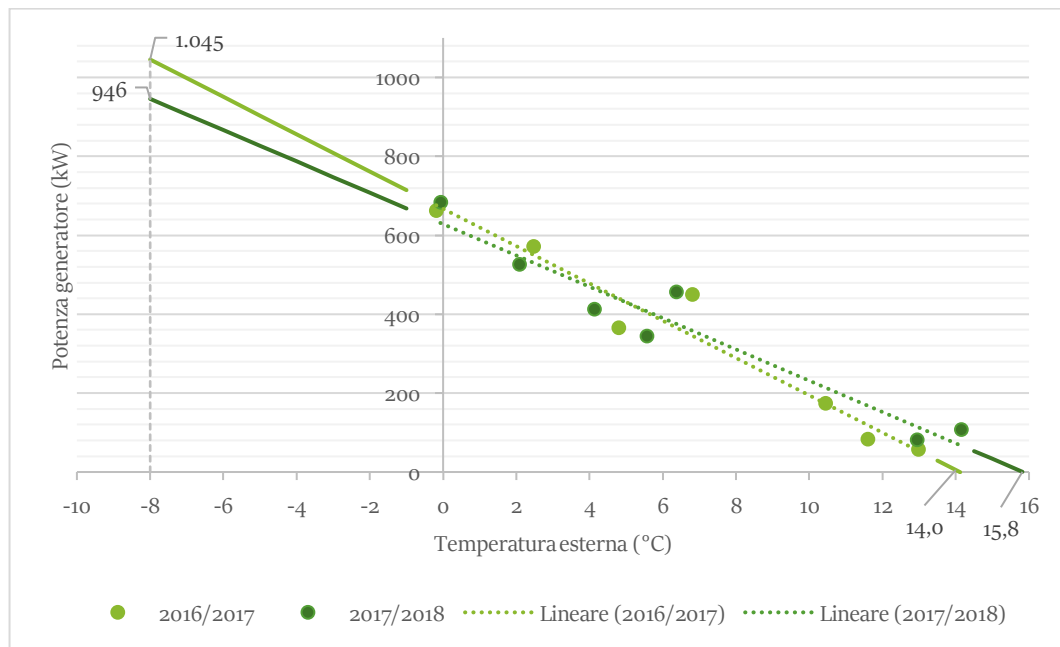


Grafico 6.4 - Firma energetica per il dimensionamento (2)

Vengono quindi evidenziati sul grafico i valori di potenza termica corrispondenti a -8°C , **946 kW** e **1045 kW**, che saranno confrontati in seguito con il dato di output nelle condizioni invernali di progetto ottenuto con Design Builder, alla luce di quanto illustrato nel [Capitolo 5](#). In edifici esistenti, per impianti di solo riscaldamento, la retta interpolante punta generalmente alla potenza nulla per una temperatura esterna di 17°C : il contributo degli apporti gratuiti fa sì che la potenza richiesta dall'edificio si azzeri prima che la temperatura media esterna raggiunga i 20°C ¹⁰. La potenza richiesta si annulla infatti per una temperatura compresa comunemente fra 16 e 18°C negli edifici esistenti, mentre nel caso di edifici nuovi o di recente costruzione, termicamente più isolati, questa temperatura tende ad abbassarsi verso i $14\text{-}15^{\circ}\text{C}$. Ciò si osserva nelle firme energetiche delle due stagioni invernali del Teatro della Concordia considerate, dove le temperature esterne di azzeramento del carico sono pari a **$14,0^{\circ}\text{C}$** e **$15,8^{\circ}\text{C}$** rispettivamente per le stagioni 2016/2017 e 2017/2018.

6.1.2. Confronto con progetto riscaldamento di Design Builder

Design Builder è in grado di fornire i dati dimensionamento in condizioni di progetto invernali ed estive: in particolare, per il progetto di riscaldamento si può inserire la temperatura di progetto della

¹⁰ Fonte: L. SOCAL, F. SOMA, La firma energetica, in "Progetto2000" di EDILCLIMA S.r.l, Volume 36, Giugno 2009

propria regione legislativa nella apposita scheda “Località” alla sezione “Dati climatici Progetto Riscaldamento”, come illustrato nella schermata seguente:

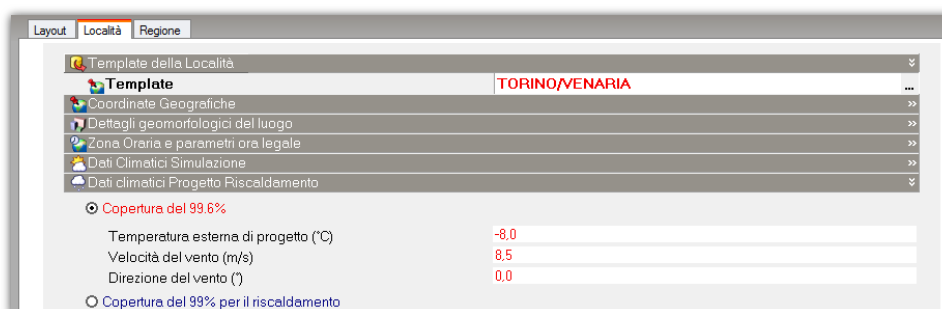


Figura 6.1 - Design Builder, impostazioni di località

Di seguito viene riportata la schermata degli output del progetto di riscaldamento di Design Builder ottenuti con calcolo in regime stazionario, ovvero considerando che il flusso termico sia costante nel tempo. Si osservano i carichi termici suddivisi per tipologia di dispersione: la potenza di riscaldamento sensibile di zona complessiva riferita all'intero edificio ottenuta con i calcoli di simulazione di EnergyPlus risulta pari a 1027 kW.

Tesi di Laurea, Teatro della Concordia		
Regime Stazionario Riepilogo		
EnergyPlus Output		Valutazione
Perdita di calore e temperatura		
Temperatura Aria (°C)		20,23
Temperatura Radiante (°C)		15,68
Temperatura Operante (°C)		17,96
Temperatura Esterna a Bulbo Secco (°C)		-8,00
Vetrata (kW)		-50,18
Pareti (kW)		-16,50
Soffitti (interni) (kW)		-10,34
Pavimenti (interni) (kW)		3,90
Pavimenti (controterra) (kW)		0,63
Partizioni (interne) (kW)		-4,76
Tetti (kW)		-14,47
Infiltrazione esterna (kW)		-140,09
Ventilazione esterna (kW)		-795,75
Riscaldamento Sensibile di Zona (kW)		1027,54

Figura 6.2 - Design Builder, output progetto di riscaldamento

Lo scostamento tra il valore ottenuto dalla simulazione di Design Builder e quelli generati tramite le firme energetiche è quindi intorno al -8.0% rispetto alla stagione 2016/2017 e al 1.7% rispetto alla stagione 2017/2018. Alla luce di questo risultato possono essere fatte due considerazioni:

- gli scostamenti sono giustificabili da due aspetti principali:
 1. le importanti semplificazioni della stagione teatrale, che nella realtà non segue un programma identico di anno in anno e non ha la ripartizione settimanale e mensile fissa, come invece è stata ipotizzato per generare la firma energetica e importato nel modello;

2. le incertezze sul file climatico, i cui dati fanno riferimento a un'altra stagione invernale e non sono stati raccolti in prossimità dell'edificio studiato ma in un comune confinante;
- gli scarti ottenuti sono ritenuti ragionevoli e attendibili, ne segue che il modello risponde in modo sufficientemente corretto alle ipotesi e ai dati di inseriti in fase di importazione su Design Builder;
 - l'impianto attuale risulta sovradimensionato di oltre il 40% rispetto alla potenza complessiva installata delle quattro caldaie pari a 1840 kW, perciò in una futura soluzione di retrofit sarà possibile prendere in considerazione generatori di taglia inferiore.

Il prossimo paragrafo tratterà nel particolare l'andamento dei consumi elettrici e di gas naturale nella stagione invernale simulata con Design Builder e ne effettuerà il confronto con i dati delle bollette.

6.2. Simulazione dei consumi stagione invernale

6.2.1. Consumi gas naturale

Per comparare i consumi reali di gas naturale del Teatro della Concordia con quelli ottenuti attraverso la simulazione dinamica, vengono messi a confronto i dati di bolletta a disposizione (per l'ultima stagione di riscaldamento i dati sono disponibili fino a dicembre 2018) e quelli ottenuti effettuando una simulazione oraria dell'edificio dal 1 ottobre al 30 aprile. Nel *grafico 6.5*, che mostra l'andamento dei consumi di gas naturale nel caso invernale, si può osservare che lo sviluppo ottenuto dalla simulazione ha forma di campana, con consumi più alti nel mese più rigido, quello di gennaio, e progressivamente più bassi verso le mezze stagioni. Al contrario i dati a disposizione dell'edificio reale mostrano alcune irregolarità nei consumi: queste anomalie sono da addebitarsi alle singolarità delle stagioni teatrali, la cui programmazione è stata fortemente semplificata e standardizzata nel modello di Design Builder (*tabella 6.3*). Si può osservare tuttavia che per ciascun mese il risultato di consumo della simulazione è paragonabile al consumo mensile di almeno una delle stagioni passate, dando così validità alle ipotesi fatte.

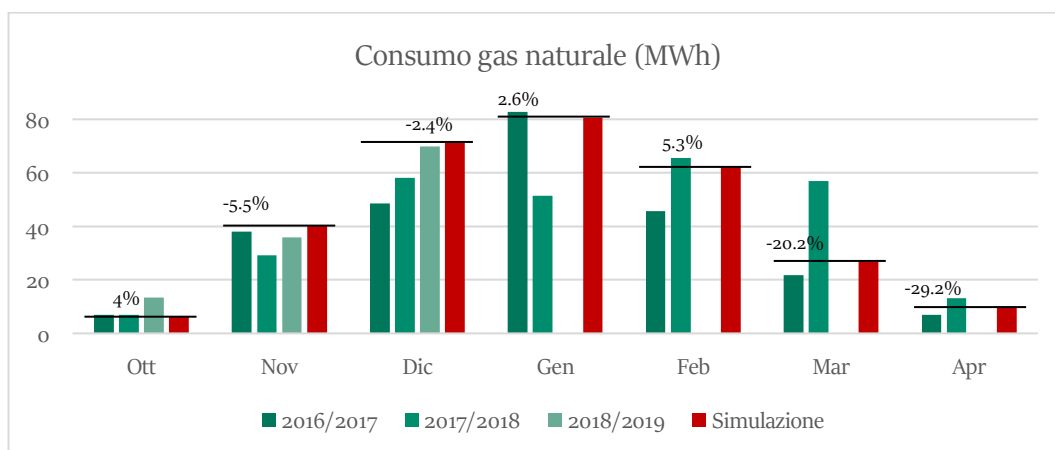


Grafico 6.5 - Confronto mensile consumi gas naturale

Si nota inoltre che i consumi stagionali di riscaldamento ottenuti con la simulazione sono maggiori rispetto a quelli reali: anche in questo caso si tratta di un errore dovuto agli eventi ipotizzati, si procede perciò confrontando la somma dei consumi dell'intera stagione di riscaldamento:

	2016/2017	2017/2018	Simulazione
	250804 kWh	281400 kWh	298504 kWh
Scostamento	16.0%	5.7%	

Tabella 6.6 - Confronto stagionale consumi gas naturale

Il valore dello scostamento medio, ottenuto tra il valore simulato e quello mediato sulle due stagioni reali, è pari al 10.8% ed è riconducibile alle ipotesi adottate.

6.2.2. Verifica temperature interne

Un altro parametro utile per riscontrare il corretto funzionamento del modello è quello di verificare l'andamento delle temperature interne nelle diverse zone termiche. Viene scelta una settimana invernale di riferimento, dal 2 all'8 dicembre, durante la quale si studia l'andamento orario delle temperature medie dell'aria interna ed esterna. Vengono inoltre riportati i valori della **temperatura radiante** e **operante**, la prima definita come temperatura di un ambiente fittizio caratterizzato da pareti aventi tutte la stessa temperatura, nel quale un soggetto scambia per irraggiamento lo stesso flusso termico che scambia nell'ambiente reale in cui ogni parete ha una propria temperatura, e la seconda è la temperatura uniforme di una cavità in cui la persona scambia calore per irraggiamento e convezione come nell'ambiente reale non uniforme. Quest'ultima in particolare è definibile come la temperatura che viene effettivamente percepita dal corpo umano.

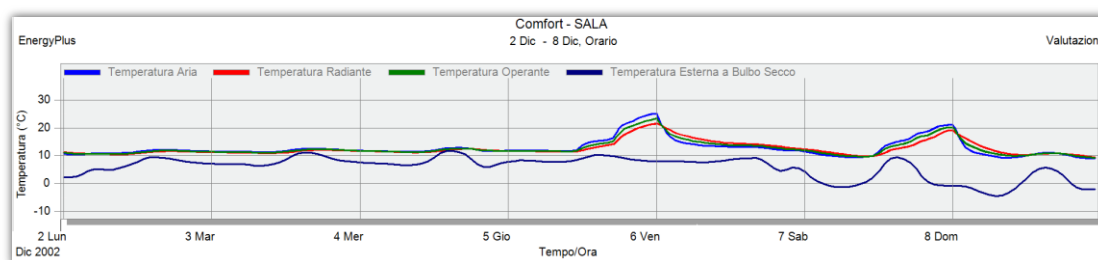


Grafico 6.6 - Design Builder, temperatura sala

Si osserva che in occasione del concerto del venerdì la temperatura dell'aria nella sala sera supera il set-point di riscaldamento di alcuni gradi centigradi a causa del forte apporto interno di occupazione. Il sabato, in occasione dello spettacolo teatrale, la temperatura interna raggiunge il set-point di 21°C a spettacolo in corso, a causa della temperatura esterna particolarmente bassa, inferiore a quella raggiunta nella stessa fascia oraria degli altri giorni della settimana. In entrambi i giorni di evento è

possibile osservare tre step di aumento della temperatura, il primo dovuto agli apporti interni di illuminazione generale e funzionamento dei macchinari aggiuntivi luce-audio, gli altri due all'impianto di condizionamento e all'occupazione.

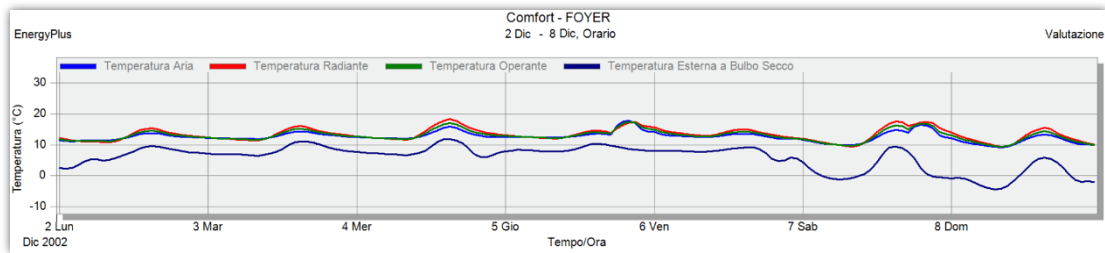


Grafico 6.7 - Design Builder, temperatura foyer

A causa dell'involucro quasi del tutto trasparente, la temperatura interna del foyer è strettamente legata alle condizioni di temperatura esterna e irraggiamento solare; per tale ragione di seguito viene riportato anche l'andamento orario della radiazione solare nella medesima settimana.

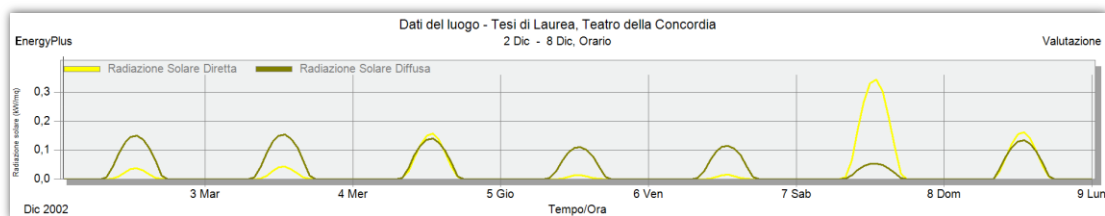


Grafico 6.8 - Design Builder, radiazione solare

Si osserva che gli aumenti di temperatura nelle ore centrali della giornata sono infatti influenzati oltre che dalla temperatura esterna, anche dalla radiazione: mercoledì 4 e sabato 7 dicembre infatti la temperatura dell'aria e la temperatura radiante subiscono un aumento maggiore rispetto alle due giornate precedenti nelle ore centrali del giorno, dovuto alla presenza di una radiazione diretta più intensa rispetto al lunedì e al martedì della stessa settimana. In entrambi i giorni di evento, ma più spiccatamente nella giornata di sabato, è possibile inoltre individuare due curve di aumento della temperatura interna, la prima dovuta alle condizioni esterne, l'altra all'apporto interno e al funzionamento dell'impianto di riscaldamento.

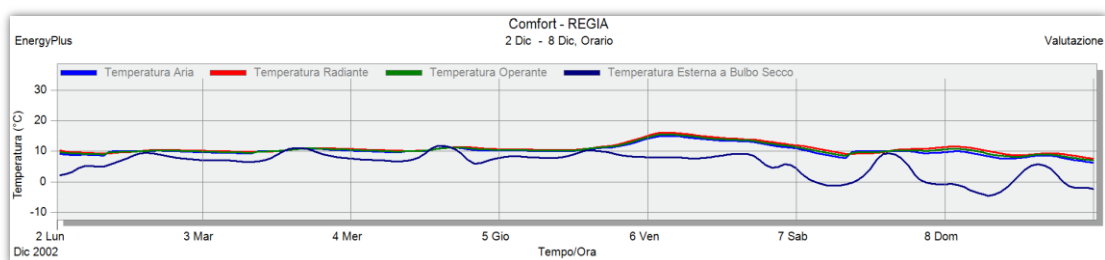


Grafico 6.9 - Design Builder, temperatura regia

La temperatura nel locale regia ha un andamento circa costante e pari al set-back impostato. Si osserva un leggero aumento della temperatura a seguito del concerto di giovedì 5 dicembre, dovuto alla trasmissione del calore proveniente dalla sala.

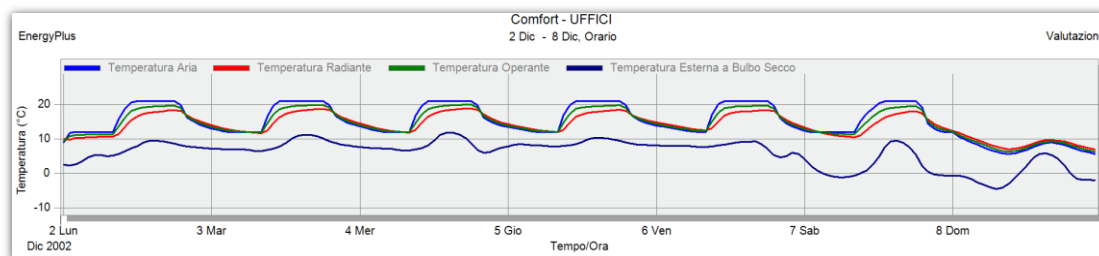


Grafico 6.10 - Design Builder, temperatura uffici

La temperatura negli uffici viene mantenuta intorno al set-back di 12°C nelle ore notturne infrasettimanali, mentre in occasione delle ore lavorative essa raggiunge i 21°C di set-point solamente verso le ore 11:00, causando un leggero discomfort negli operatori della direzione del teatro durante le prime ore del mattino. Questo può essere dovuto alla posizione sfavorevole dell'avancorpo degli uffici, esposto a nord e ombreggiato dal teatro stesso, alla temperatura di set-back bassa e alla scarsità di apporti interni per la bassa densità di occupazione. La temperatura radiante è sempre marcatamente inferiore a quella media dell'aria in quanto il sistema di riscaldamento con ventilconvettori riscalda direttamente l'aria immessa in ambiente, senza la presenza di superfici calde radianti. Si nota inoltre la minore pendenza della curva di aumento della temperatura interna nella giornata di sabato 7 dicembre: la lentezza del raggiungimento del set-point è anche in questo caso provocata dal rilevante abbassamento della temperatura durante la notte.

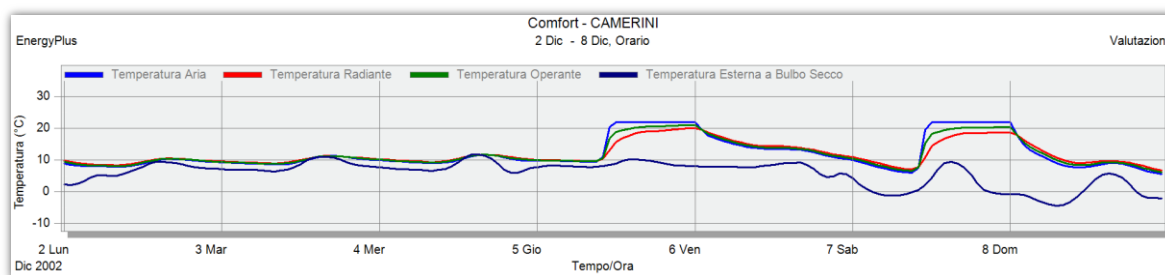


Grafico 6.11 - Design Builder, temperatura camerini

Nei camerini è particolarmente evidente il raggiungimento del set-point desiderato di 22°C durante le ore di occupazione. A differenza di quanto accade con gli uffici, la maggiore densità di occupazione ipotizzata favorisce il mantenimento della temperatura di set-point anche sabato 7 dicembre, quando la temperatura esterna durante la notte è scesa sotto lo zero; la temperatura radiante è anche in questo caso inferiore a quella media dell'aria in quanto anche in questa zona termica il riscaldamento è affidato a ventilconvettori.

6.2.3. Consumi elettricità

Per procedere ad analizzare i consumi elettrici del teatro vengono raccolte le bollette elettriche, fornite dall'Azienda Speciale Multiservizi di Venaria, e sono stati richiesti al distributore i dati di prelievo orario di energia elettrica dalla rete nel periodo di riferimento dal 1 ottobre 2017 al 30 aprile 2018. Il file di dati trasmesso dal distributore riporta i prelievi in kWh riferiti al quarto d'ora: tali valori sono stati trasformati da energia [kWh] a potenza prelevata [kW] e sono stati confrontati con i risultati di Design Builder.

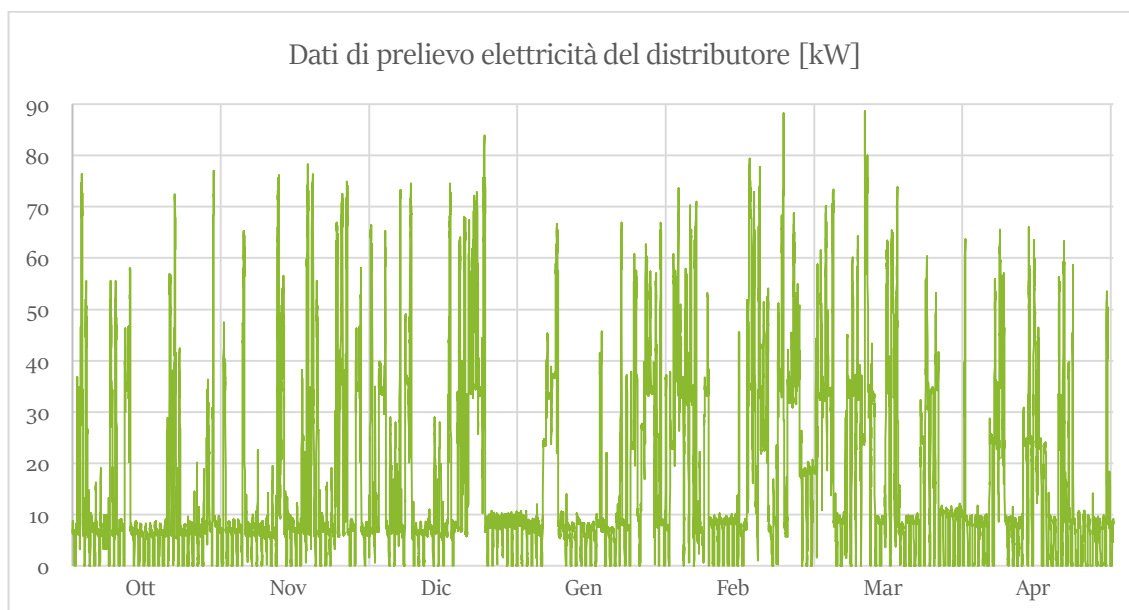


Grafico 6.12 - Prelievi di energia elettrica, dal 1 ottobre al 30 aprile

Da questo grafico sono visibili distintamente i picchi di consumo che arrivano a superare gli 80 kW durante gli eventi e la potenza elettrica di baseline circa pari a 10 kW. Per una migliore visualizzazione dell'andamento dei prelievi si riportano i dati riferiti a periodi più brevi.



Grafico 6.13 - Prelievi di energia elettrica, dal 4 al 10 novembre

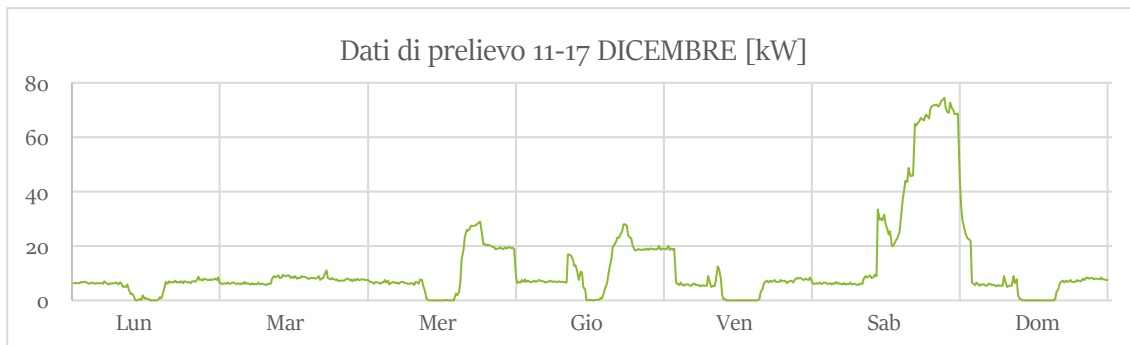


Grafico 6.14 - Prelievi di energia elettrica, dall'11 al 17 dicembre

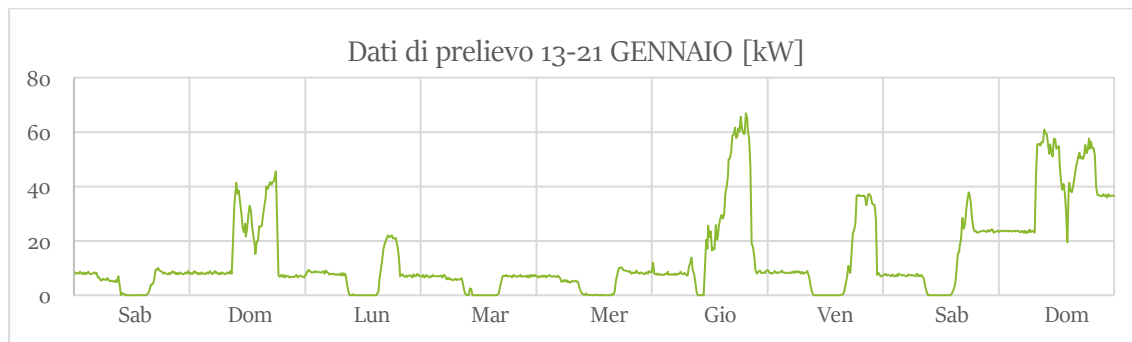


Grafico 6.15 - Prelievi di energia elettrica, dal 15 al 23 gennaio

Da questi grafici è possibile osservare che nelle ore centrali della giornata il prelievo di energia elettrica dalla rete nazionale è nullo. Questo si spiega con il funzionamento dell'impianto fotovoltaico, di cui però non sono disponibili i dati reali di produzione. Nella settimana campione del mese di dicembre vi è una giornata in cui il prelievo non si azzerava ma resta costante: ciò può essere dovuto a un malfunzionamento dell'impianto fotovoltaico o a operazioni di manutenzione. Dalla settimana dal 4 al 10 novembre è possibile distinguere chiaramente due eventi settimanali serali, domenica 5 e venerdì 10. Nel fine settimana del 20-21 gennaio si nota poi che il consumo durante le ore notturne del sabato non diminuisce fino al valore atteso di baseline: ciò è spiegabile con il funzionamento dell'impianto di condizionamento, rimasto acceso durante la notte in vista dell'evento che ha occupato tutta la giornata della domenica, visibile con il picco di consumo elettrico già a partire dal mattino. Sono inoltre visibili una serie di irregolarità, come ad esempio lunedì 6 novembre e domenica 14 gennaio, che rientrano nella variabilità e molteplicità della tipologia di eventi che la struttura ospita e in eventuali irregolarità di funzionamento dell'impianto di condizionamento.

Al fine di effettuare un confronto dei consumi elettrici, di seguito viene riportato il grafico con i valori di output dei consumi elettrici e della produzione del fotovoltaico ottenuti con la simulazione di Design Builder. Per poter effettuare la comparazione con i dati reali è stato necessario esportare i risultati di simulazione oraria in formato .csv ed elaborarli al fine di tenere conto della produzione fotovoltaica. Per ciascun valore orario è stata effettuata la sottrazione tra il dato di richiesta e quello di produzione,

la cui differenza è stata considerata solo se positiva e sostituita con uno zero se negativa. Il grafico seguente mostra i risultati ottenuti sul periodo di osservazione dal 1 ottobre al 30 aprile.

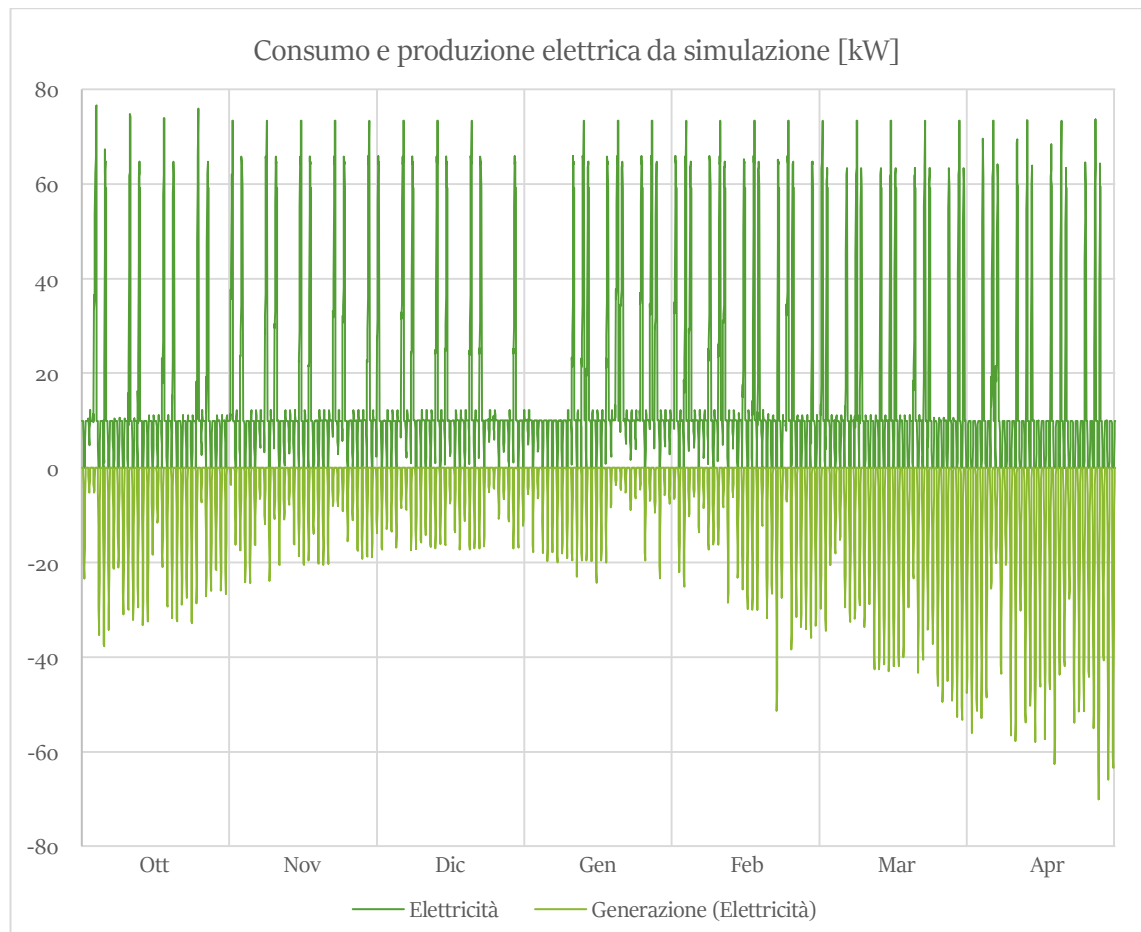


Grafico 6.16 - Design Builder, consumi elettrici e produzione fotovoltaica, 1 ottobre - 30 aprile

Si nota la regolarità dei picchi imposti dalla stagione teatrale artefatta per il presente studio e la produzione fotovoltaica, la cui curva vede il suo minimo nei mesi di dicembre e gennaio e aumenta progressivamente verso i mesi primaverili. Anche in questo caso, si riportano i valori riferiti alla settimana dal 2 all'8 dicembre, come per l'analisi dell'andamento delle temperature interne.

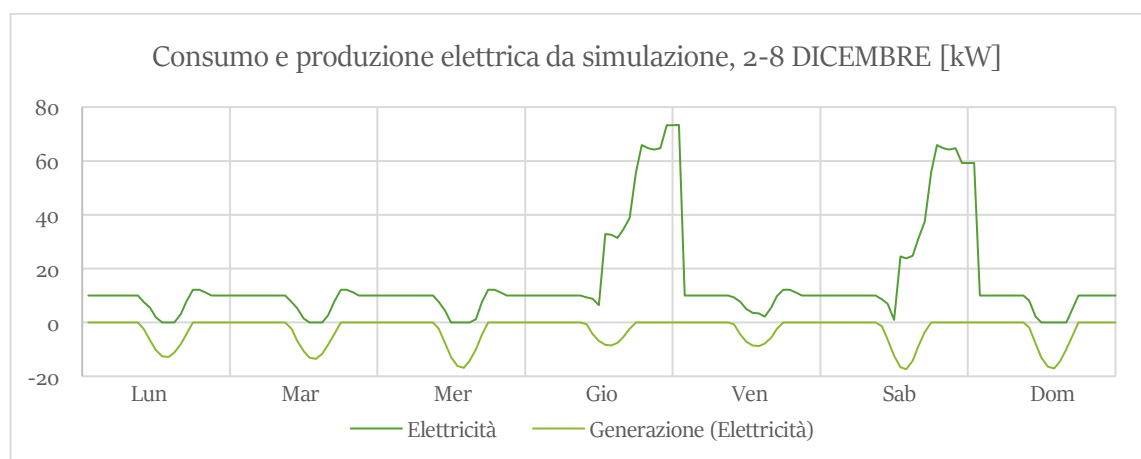


Grafico 6.17 - Design Builder, consumi elettrici e produzione fotovoltaica, 2 - 8 dicembre

Si nota che il profilo del consumo settimanale è assimilabile ai consumi reali analizzati precedentemente. I picchi di aumento della richiesta elettrica sono concentrati nelle ore serali di giovedì e sabato, riconducibili pertanto agli eventi ipotizzati nella semplificazione del modello. È inoltre distinguibile l'azzeramento della richiesta elettrica in concomitanza della produzione fotovoltaica, come viene riscontrato anche nell'analisi prelievi reali.

Per quanto concerne i consumi mensili, viene riportato di seguito il grafico che mostra i consumi e la produzione elettrica simulati da Design Builder a confronto con quelli registrati dalle bollette elettriche a disposizione:

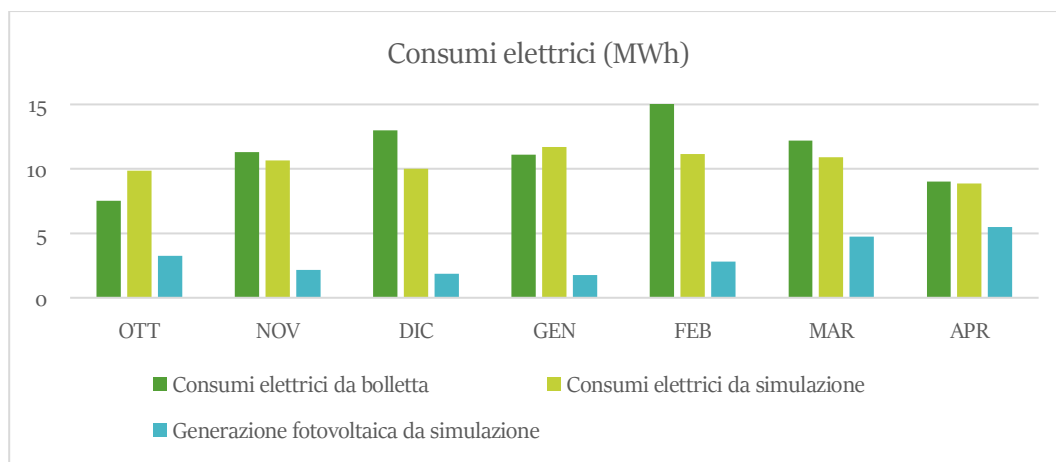


Grafico 6.18 - Confronto consumo mensile energia elettrica

Le bollette elettriche a disposizione coprono sfortunatamente la sola stagione 2017-2018, per cui risulta più difficoltoso effettuare delle comparazioni rigorose: si registra infatti un particolare aumento del consumo nel mese di febbraio 2018, per il quale però non è possibile paragonare i consumi dello stesso periodo in stagioni differenti. La generazione fotovoltaica indicata nel grafico è riferita alla sola quantità effettivamente assorbita dal teatro, ottenuta come differenza tra la richiesta totale simulata e quella ottenuta con la differenza oraria tra richiesta e produzione, su base mensile. Risulta evidente l'incidenza della produzione fotovoltaica sui prelievi dalla rete elettrica nei mesi di ottobre, marzo e aprile, mentre è meno spiccata nei mesi precedenti.

	2017/2018	Simulazione
	79194 kWh	73127 kWh
Scostamento	-7.7 %	

Tabella 6.7 - Confronto stagionale consumi energia elettrica

I valori di consumo di energia elettrica simulati sull'intera stagione risultano inferiori del 7.7% rispetto a quelli della stagione invernale di riferimento.

7. *Soluzioni proposte*

In questo capitolo verranno trattate due soluzioni di efficientamento energetico implementate con il software Design Builder. Poiché il software non prevede un template predefinito per descrivere il comportamento della parete solare, la modellazione dinamica non ha trattato i benefici che tale dispositivo potrebbe apportare in caso di funzionamento. Inoltre, la bassa quantità di ore annuali di utilizzo dell'impianto di illuminazione e la tipologia non obsoleta di lampade suggerisce di non intervenire con il rinnovamento degli apparecchi illuminanti. Poiché la struttura analizzata è di recente costruzione, si è scelto infine di non sostituire i generatori di calore, ritenendo che le caldaie a gas naturale attualmente installate siano caratterizzate da buona efficienza sia in termini di consumo che di produzione di inquinanti atmosferici. Lo studio procede perciò con una prima analisi dell'inserimento di materiale isolante all'interno dell'involucro edilizio; in una seconda fase viene proposto una variazione della configurazione dell'impianto di riscaldamento attraverso la soluzione del pavimento radiante.

7.1. **Involucro edilizio**

Una accurata progettazione dell'involucro edilizio risulta di particolare importanza in quanto gli elementi che lo compongono hanno l'obiettivo di garantire il benessere termo-igrometrico negli ambienti occupati dell'edificio e allo stesso tempo di limitare l'utilizzo degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva, minimizzando gli scambi energetici tra ambiente interno e ambiente esterno al fine di limitare i consumi energetici. Lo scopo dell'involucro è quindi quello di proteggere l'ambiente dalle sollecitazioni termiche esterne, garantendo una buona attitudine a ridurre e ritardarne l'effetto oltre a un buon isolamento termico.

L'isolamento viene valutato attraverso la trasmittanza termica, la grandezza fisica che misura la quantità di potenza termica scambiata da un materiale o un corpo per unità di differenza di temperatura e di superficie, definendo perciò l'attitudine di un componente allo scambio di energia. Volendo inoltre considerare la trasmissione del calore attraverso l'involucro in funzione del tempo e dell'andamento delle sollecitazioni interne ed esterne, i parametri che dipendono esclusivamente dalle caratteristiche capacitive dei materiali costituenti le pareti sono la massa frontale e la capacità termica frontale. La massa frontale M_f , espressa in kg/m^2 , è la massa del componente edilizio per unità di superficie, mentre la capacità frontale CF rappresenta l'energia termica accumulata nella parete per ogni grado di aumento della temperatura media e per unità di superficie d'involucro.

Le trasmittanze termiche delle superfici opache del Teatro della Concordia, riportate in *tabella 5.1*, sono solo di poco maggiori rispetto a quelle dell'edificio di riferimento definito dal D.M. 26 giugno 2015 sui "Requisiti minimi" (per edifici nuovi o soggetti a ingenti interventi di ristrutturazione) e la trasmittanza della vetrata del foyer garantisce, nel limite della tipologia stessa del componente, buone performance termiche dal punto di vista dell'isolamento. Tuttavia, la massa frontale delle pareti prefabbricate risulta molto bassa, mediamente attorno a 50 kg/m², a causa dell'assenza di componenti pesanti come ad esempio blocchi in laterizio. Per questo motivo si sceglie di simulare il comportamento dell'edificio con l'inserimento in intercapedine di strati spessi 10 cm di polistirene, materiale isolante denso che aumenta la massa frontale della parete. Il polistirene viene inserito sul lato freddo dell'intercapedine, per limitare il rischio di condensazione interstiziale. Dati i valori di trasmittanza termica già molto bassi, è prevedibile che il riempimento dell'intercapedine d'aria nelle pareti dei blocchi 1,2 e 3 non produrrà risultati particolarmente rilevanti. Di seguito vengono confrontati i risultati dei consumi di gas naturale ottenuti con una simulazione dal 1 ottobre al 30 aprile, modificando le stratigrafie delle pareti verticali.

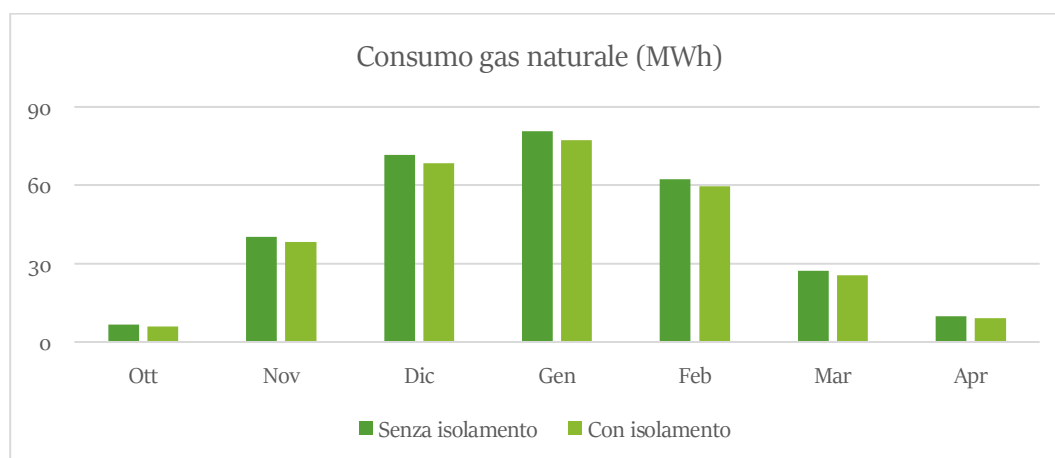


Grafico 7.1 - Confronto consumo mensile gas naturale con e senza isolamento intercapedine

Si osserva che sebbene venga registrata una diminuzione dei consumi, questa soluzione non è particolarmente efficace in termini di risparmio di energia per il riscaldamento, i cui valori stagionali sono riportati in tabella seguente:

Totale ante-operam	Totale post-operam	Risparmio
298504 kWh	284083 kWh	14422 kWh

Tabella 7.1 - Confronto consumo stagionale gas naturale con e senza isolamento intercapedine

Il risparmio simulato è circa pari al 4.8% dei consumi per il riscaldamento ante-operam, valore ritenuto insufficiente per la fattibilità dell'intervento.

A titolo di esempio si riporta anche il consumo di gas nell'ipotesi in cui, a parità impostazioni di modello, il teatro fosse stato costruito in muratura per confrontare la tecnica costruttiva del prefabbricato

e quella del blocco in laterizio. A tale scopo viene utilizzato un template predefinito di parete verticale composto da muratura in paramano, uno strato di 5 cm di lana di roccia, blocco di cemento e intonaco standard.

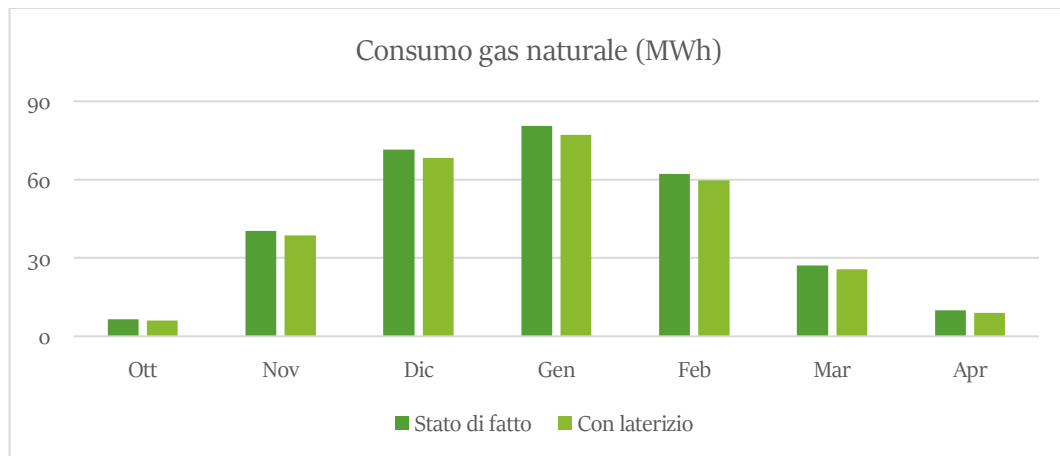


Grafico 7.2 - Confronto consumo mensile gas naturale con diverse costruzioni

Totale ante-operam	Totale post-operam	Risparmio energetico
298504 kWh	284246 kWh	14259 kWh

Tabella 7.2 - Confronto consumo stagionale gas naturale con diverse costruzioni

Si osserva che la differenza tra il prefabbricato e il blocco in laterizio è esigua: questo è dovuto a due ragioni principali, il fattore forma dell'edificio in relazione al tipo di impianto. Il fattore forma, descritto nel **Decreto Legislativo 311/06**, è definito come rapporto tra la superficie disperdente S e il volume lordo climatizzato V , dove per superficie disperdente si intende la superficie che delimita il volume climatizzato rispetto all'esterno, al terreno e ad ambienti non dotati di impianto di climatizzazione. Questo rapporto è utile per misurare la "compattezza" di un edificio, che è un parametro importante per valutare l'efficienza energetica di una costruzione.

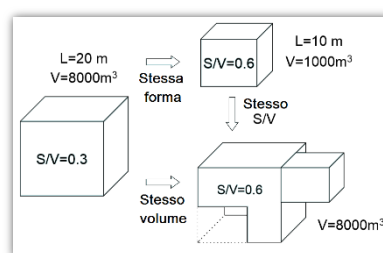


Figura 7.1 - Esempi di fattori forma per diverse configurazioni di edificio

In questo caso, i grandi locali della struttura, ovvero il foyer e la sala, fanno sì che il fattore forma sia intorno allo 0.3, che significa che la superficie disperdente è bassa rispetto al volume condizionato, ragione per cui modificare le caratteristiche della superficie disperdente non ha portato a significative diminuzioni di consumo.

7.2. Riscaldamento a pavimento radiante nella sala

Alla luce di quanto ottenuto nel paragrafo precedente, si decide di cambiare strategia per ottenere un risparmio dei consumi energetici. Si ipotizza dunque di intervenire sul sistema di condizionamento, valutando l'installazione del riscaldamento a pavimento radiante nella sala. Questa tipologia di riscaldamento è ampiamente diffusa in progetti di rifunzionalizzazione di ambienti molto ampi, come teatri o sale conferenze ma anche nelle palestre delle scuole, in quanto è particolarmente indicata per il miglioramento del comfort generale e permette di ridurre i consumi di energia. La sensazione di benessere termico che si instaura all'interno di un locale si ottiene infatti quando la temperatura dell'aria assume una distribuzione quanto più possibile vicina alla **curva ideale di benessere termico**, secondo la quale le zone a pavimento devono essere leggermente più calde rispetto a quelle a soffitto: è diffusa infatti la sensazione di disagio che si avverte quando la temperatura della testa è superiore a quella delle caviglie. La collocazione dei pannelli radianti a pavimento, grazie all'irraggiamento proveniente dal basso, produce una stratificazione delle temperature che si avvicina molto alla curva ideale, come indicato nella figura seguente:

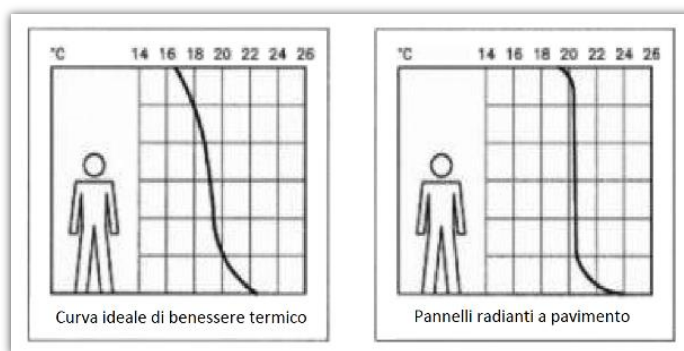


Figura 7.2 - Curva di benessere ideale

I prossimi paragrafi tratteranno dunque la possibilità di inserire il riscaldamento a pavimento radiante nella sala del teatro, al fine di ottenere un risparmio di energia basato su una migliore funzionalità del sistema di riscaldamento che andrebbe in questo modo a veicolare la sorgente calda in prossimità della zona occupata, garantendo un buon livello di comfort per gli spettatori.

7.2.1. Tecnologia per il pavimento radiante

Al fine di evitare di dover sostituire del tutto la pavimentazione attuale, la soluzione più semplice è quella del riscaldamento a pavimento a secco. Essa non richiede infatti l'utilizzo di massetto cementizio a copertura dell'impianto per lo scambio di calore con l'ambiente e i tubi nei quali circola l'acqua dell'impianto scambiano direttamente con il rivestimento della pavimentazione. Grazie alla scelta dei materiali utilizzati e al loro principio costruttivo, i sistemi a secco hanno una bassissima inerzia termica e consentono di raggiungere la temperatura superficiale desiderata in pochi minuti; la velocità

di posa li rende adatti a situazioni di necessità di rapida conclusione dei lavori grazie alla possibilità di posa su pavimenti preesistenti, con una riduzione drastica del tempo di cantiere. Questa tecnologia può inoltre prevedere l'utilizzo di uno strato di ripartizione del carico in fibrocemento a posa flottante sopra il sistema radiante. Su di esso può essere incollato qualsiasi tipo di rivestimento resiliente.

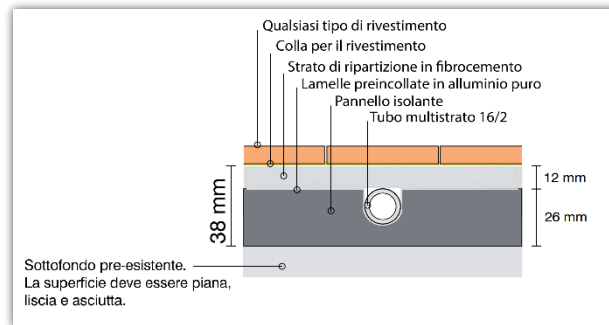


Figura 7.3 - Esempio di stratigrafia, riscaldamento a pavimento radiante a secco

Con tempi di avviamento del sistema molto bassi, il comfort viene garantito in tutti quegli ambienti in cui il fabbisogno energetico è influenzato da un riscaldamento discontinuo come ad esempio hotel, chiese o, come in questo caso, sale di teatri.

7.2.2. Modifiche al modello

Per procedere in tale direzione risulta necessario modificare il modello tridimensionale .gbXML al fine di avere una migliore caratterizzazione dello spazio in vista del posizionamento del pavimento radiante. Si ricorre dunque nuovamente all'uso di Sketchup e dell'estensione OpenStudio, con i quali lo spazio della sala viene sostituito con tre nuovi spazi al fine di simularne una stratificazione: il primo strato è alto 3,5 metri, il secondo 3,0 metri, il terzo e più alto ha un'altezza media di 5,0 m.

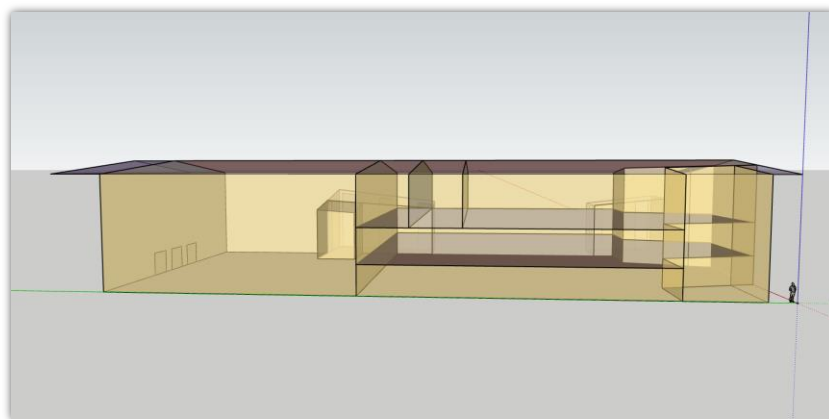


Figura 7.4 - Sketchup Rendering, modello con sala stratificata

Anche in questa fase, come per il modello geometrico precedente, è fondamentale utilizzare lo strumento "Surface Matching" per fare sì che Design Builder applichi correttamente le condizioni al con-

torno di ciascuna superficie, in particolare nei piani di sezione dei tre strati che devono essere importati come partizioni interne. La figura seguente mostra il modello importato in Design Builder, in cui è stato evidenziato lo strato più basso, ovvero l'unico in cui è prevista occupazione e nel quale verrà installato il pavimento radiante.

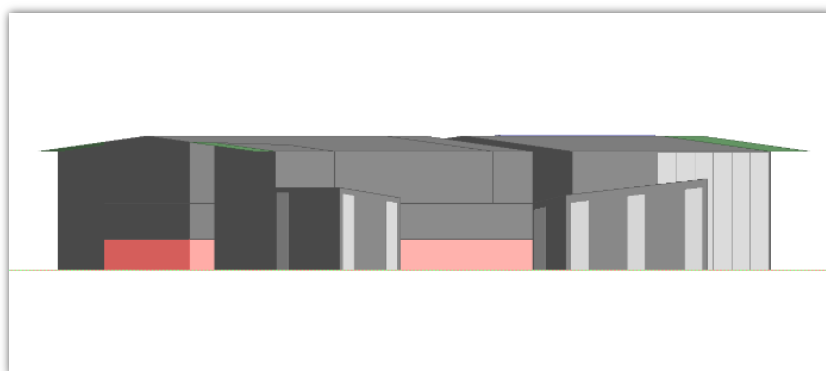


Figura 7.5 - Design Builder, modello con sala stratificata

Per consentire lo scambio termico fra i tre strati della sala è necessario modificare la stratigrafia dei pavimenti e soffitti interni nel template di costruzione della sala. L'ipotesi adottata in questo campo è che pavimenti e soffitti interni siano composti da un unico strato sottile denominato "*Hole and Vents*", presente nella categoria <Sistema> della libreria di Design Builder, che ha le caratteristiche di una presa d'aria e viene utilizzato per modellare il flusso d'aria attraverso le aperture. In questo modo è possibile imporre al software di considerare che i due piani di sezione sono fittizi e che attraverso di essi è contemplato lo scambio di calore come fossero composti da aria.

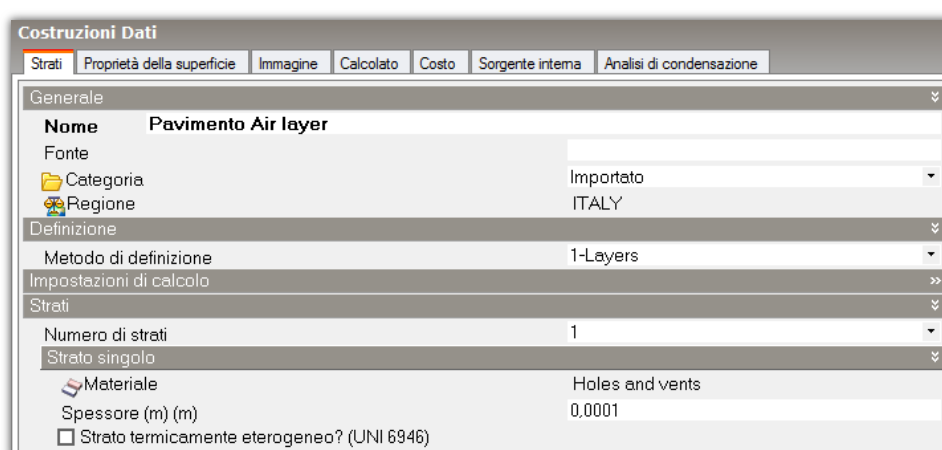


Figura 7.6 - Design Builder, "Hole and vents" (1)

Per migliorare il comportamento dei due piani fittizi, vengono inoltre fissati nella scheda "Proprietà della superficie" i coefficienti convettivi di trasmissione del calore interno ed esterno a $200 \text{ W/m}^2\text{K}$, valori molto alti che servono a simulare lo scambio convettivo tra l'aria alle diverse altezze.

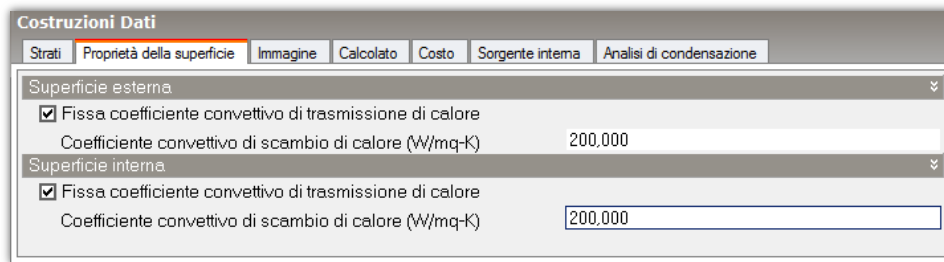


Figura 7.7 - Design Builder, "Hole and vents" (2)

Dopo aver modificato le caratteristiche della costruzione, è necessario perfezionare anche i template degli apporti interni e del sistema HVAC. In particolare:

- nello strato più basso, denominato "Sala PT", sono state lasciate invariate le impostazioni di occupazione ed eliminati gli altri apporti interni in quanto l'illuminazione generale e i dispositivi luce-suono a servizio del palco si trovano in strati superiori. Nella stratigrafia del pavimento controterra viene spuntata l'opzione "Sorgente interna", posizionata tra lo strato di isolante e il massetto, con un passo delle spire di 30 cm.
- lo strato intermedio denominato "Sala P1" è caratterizzato dall'assenza di apporti interni di occupazione, dispositivi elettronici e illuminazione generale. È inoltre eliminata la presenza di impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione;
- nello strato superiore denominato "Sala P2" è stato lasciato l'impianto ad aria VAV che garantisce i ricambi d'aria necessari per il programma di occupazione stabilito, con apporti di illuminazione generale e luce-suono palco, e occupazione nulla.

Per verificare che il modello non abbia perso le caratteristiche iniziali, si esegue nuovamente il calcolo di dimensionamento con Design Builder, con i seguenti output:

Tesi di Laurea, Teatro della Concordia	
Regime Stazionario Riepilogo	
Perdita di calore e temperatura	
EnergyPlus Output	Valutazione
Temperatura Aria (°C)	20,52
Temperatura Radiante (°C)	19,00
Temperatura Operante (°C)	19,76
Temperatura Esterna a Bulbo Secco (°C)	-8,00
Vetrata (kW)	-35,82
Pareti (kW)	-20,13
Soffitti (interni) (kW)	-123,27
Pavimenti (interni) (kW)	123,27
Pavimenti (controterra) (kW)	-0,56
Partizioni (interne) (kW)	0,00
Tetti (kW)	-16,47
Infiltrazione esterna (kW)	-152,37
Ventilazione esterna (kW)	-787,39
Riscaldamento Sensibile di Zona (kW)	1013,45

Figura 7.8 - Design Builder, output progetto di riscaldamento

Si osserva che la richiesta di dimensionamento per il riscaldamento sensibile di zona sull'intero edificio è rimasto pressoché invariato passando da 1027 a 1013 kW (-1%). Il lieve calo della potenza di dimensionamento è attribuibile al fatto che lo strato intermedio della sala non è direttamente climatizzato ma assorbe calore da quelli adiacenti. Si prosegue perciò con la modellazione dell'impianto HVAC per procedere alla simulazione.

Nuovo funzionamento <Sistema HVAC>

Anche sullo schema grafico semplificato dell'impianto di condizionamento devono essere apportate alcune modifiche al fine di modellare il riscaldamento con pavimento radiante.

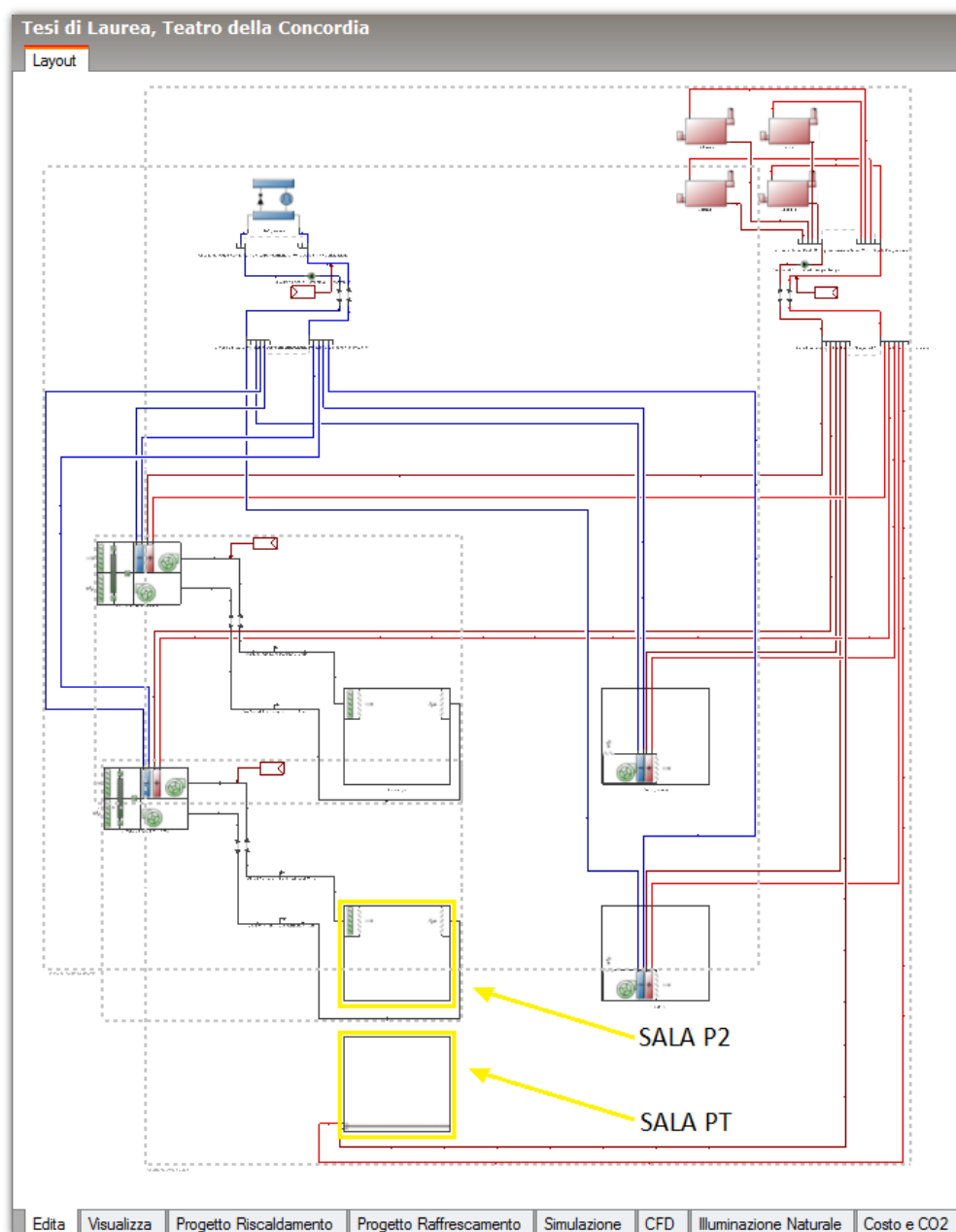


Figura 7.9 – Design Builder, nuovo schema HVAC

Il set-point manager del circuito di acqua calda viene impostato su temperature inferiori, 55-45°C al posto delle precedenti 70-60°C. Restano invariate le impostazioni per tutte le zone termiche descritte nel [paragrafo 5.4](#), ad eccezione della sala: essa infatti ora è suddivisa in tre zone termiche separate, ciascuna delle quali è dotata di differenti tipologie di terminali dell'impianto HVAC: la zona "Sala PT" viene scollegata dal circuito ad aria della UTA1 e vi è inserito il dispositivo "Pavimento riscaldato", la cui portata massima di acqua calda viene autocalcolata da Design Builder, e viene definito il programma di disponibilità ON/OFF, che ne garantisce il funzionamento solo in occasione degli eventi. Il termostato di zona è impostato con set-point 21°C durante gli eventi e per il tempo restante con set-back 12°C. La zona "Sala P1", non essendo dotata di impianto di riscaldamento né di ventilazione non viene inserita nello schema grafico HVAC, mentre la zona "Sala P2" viene collegata al circuito ad aria e dotata dell'impianto ad aria diretta VAV. Il termostato di zona è in questa zona impostato con set-point a 16°C e set-back a -50°C.

Una volta effettuate tutte queste modifiche, si può procedere con la simulazione della stagione invernale, dal 1 ottobre al 30 aprile.

7.2.3. Confronto comfort e distribuzione dell'aria

In primo luogo viene analizzato l'andamento della temperatura nella zona "Sala PT", ovvero quella occupata dagli spettatori, per verificare il corretto inserimento dei dati di input e la performance del nuovo impianto. Il grafico seguente mostra l'evoluzione oraria della temperatura nella stessa settimana invernale considerata nell'analisi dello stato di fatto, dal 2 all'8 dicembre.

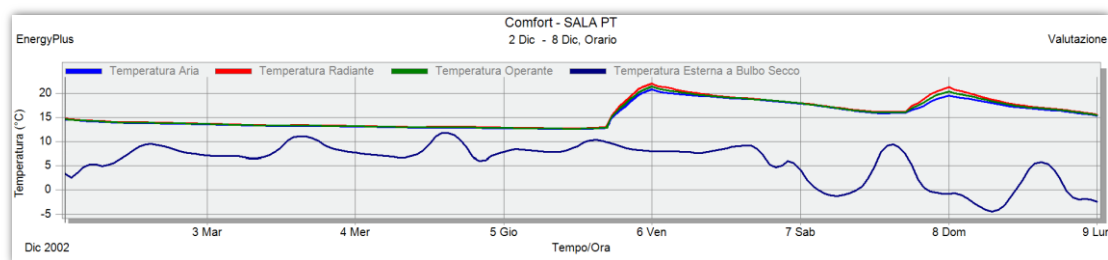


Grafico 7.3 - Design Builder, temperatura sala PT

Si osserva che in occasione dei due eventi settimanali la curva di aumento della temperatura non cambia inclinazione in modo significativo, in quanto gli apporti interni per l'illuminazione generale per i macchinari aggiuntivi luce-suono sono inseriti solamente nel piano più alto. Le tre temperature osservate, la media dell'aria, la temperatura radiante e la temperatura operante, sono più vicine tra loro rispetto al caso precedente: questo è dovuto proprio alla presenza della superficie riscaldata del pavimento, che aumenta la temperatura media radiante della zona, senza che la temperatura media dell'aria superi il set-point come accadeva con il riscaldamento a tutt'aria.

Osservando l'evoluzione della temperatura dell'aria si nota che essa all'inizio della serata di evento non è ancora pari alla temperatura di set-point di 21°C, ma trattandosi di una temperatura media si può supporre che nell'area occupata la temperatura dell'aria sia superiore di circa 1°C a quella mediata nell'intero strato, grazie all'irraggiamento dal basso.

Infine, esaminando le temperature nella zona "Sala P2", si osserva che la temperatura ha un andamento simile a quello della zona occupata, con un leggero aumento nelle ore centrali della giornata di evento, dovuto agli apporti interni di illuminazione generale e luce-suono per il palco.

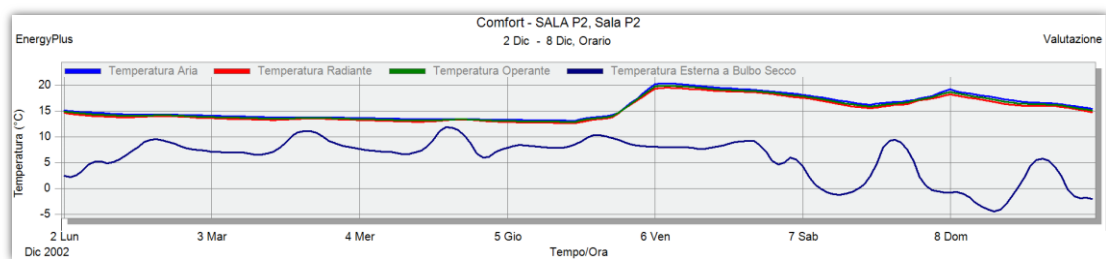


Grafico 7.4 - Design Builder, temperatura sala P2

I due seguenti grafici riportano infine il nuovo andamento della temperatura nei blocchi costruttivi riscaldati con i ventilconvettori, i due avancorpi di uffici e camerini: si può osservare che negli uffici il raggiungimento del set-point è leggermente più lento rispetto al caso precedente a causa della più bassa temperatura di mandata dell'acqua, fenomeno che invece non si verifica nei camerini.

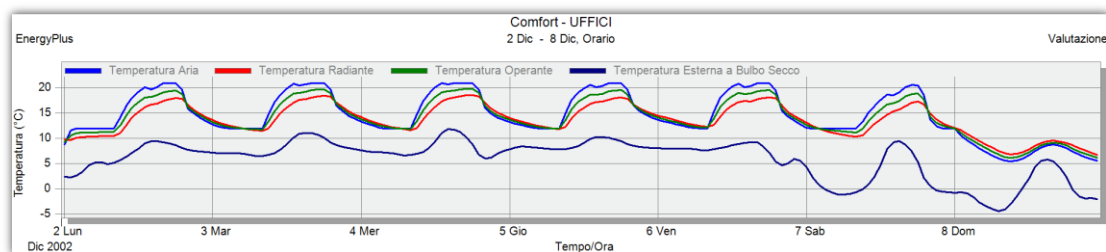


Grafico 7.5 - Design Builder, nuovo andamento temperatura uffici

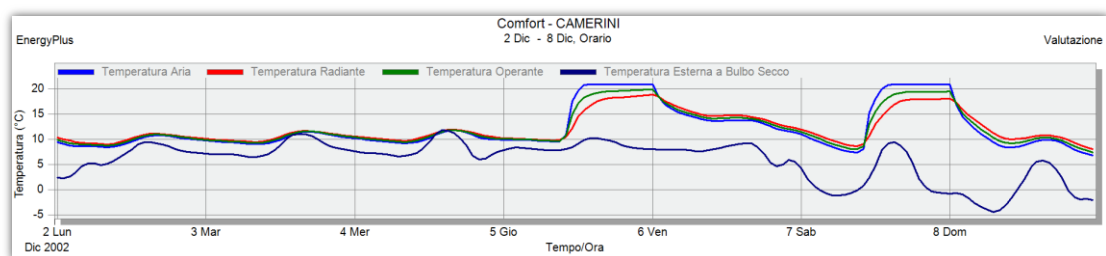


Grafico 7.6 - Design Builder, nuovo andamento temperatura camerini

Simulazione CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Viene di seguito trattata l'analisi della distribuzione dell'aria nei due casi attraverso la simulazione CFD. Si tratta di un insieme di metodi numerici utilizzati per calcolare le proprietà del fluido all'interno di uno spazio tridimensionale. Il simulatore di calcolo implementato da Design Builder per il modulo CFD è ancora una volta EnergyPlus: questa sezione permette di valutare gli effetti degli impianti HVAC sull'ambiente interno, come la ripartizione spaziale di temperatura, la distribuzione delle velocità e di altre proprietà dei flussi d'aria, risultando particolarmente utile per approfondire lo studio del comfort termo-igrometrico all'interno dei locali analizzati. Attraverso una accurata definizione delle condizioni al contorno e della discretizzazione dello spazio interessato dal fenomeno propagatorio, il calcolo permette di visualizzare i risultati ottenuti tramite scale cromatiche o vettoriali.

Importazione condizioni al contorno

Per migliorare lo studio della distribuzione dell'aria nella sala del Teatro della Concordia sono state inserite le file di poltrone e il blocco del palco scenico, per i quali è stata selezionata l'opzione "Massa" che non consente all'aria di attraversare i blocchi.

Immissione ed estrazione dell'aria: per modellare i flussi d'aria in ingresso come condizioni al contorno, è stato necessario collocare due blocchi componente di acciaio che rappresentassero le due condotte di immissione dell'aria trattata proveniente dall'UTA. Sulla superficie di questi blocchi sono state inserite le quattordici bocchette di mandata a lancio profondo di forma rettangolare, con getto a 45° rispetto alla direzione Y e

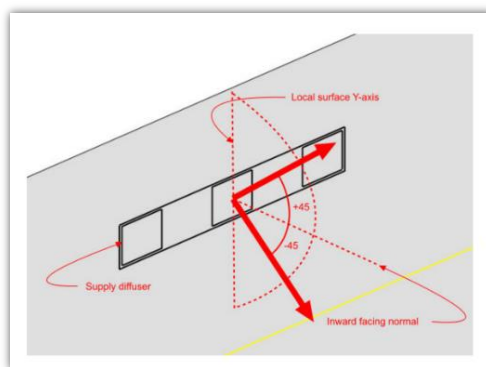


Figura 7.10 - Fonte: Design Builder Simulation and CFD Training Guide 2009

portata ripartita uniformemente sulle bocchette lungo tutta la condotta. La temperatura dell'aria immessa nel caso di condizionamento a tutt'aria è pari a 35°C, mentre nel caso con pavimento radiante è pari a 20°C. L'estrazione dell'aria è stata impostata inserendo le griglie di ripresa calpestabili lungo entrambi i lati della sala, così come riportato dei disegni as-built e verificato in sede di sopralluogo. Per il corretto funzionamento della simulazione CFD risulta necessario avere un perfetto bilanciamento tra i flussi d'aria in ingresso e in uscita per proseguire con la modellazione.

Temperature superficiali: è possibile considerare condizioni al contorno di temperature superficiali realistiche mediante l'importazione di dati precedentemente simulati in Design Builder. Tali informazioni di output possono essere registrate selezionando l'opzione "Memorizza output della superficie / Temperatura superficiale interna" nella scheda "Output" del blocco SALA. A seguito della simulazione di EnergyPlus, attraverso la finestra "Condizioni al contorno CFD" presente negli Strumenti vengono

inseriti i dati di temperatura risultanti. Per lo svolgimento dell'analisi si è scelto di importare le temperature superficiali ottenute alle ore 12:00 del giorno 2 dicembre, che rispecchiano la situazione in cui il funzionamento dell'impianto è impostato sulla temperatura di set-back.

Condizioni al Contorno CFD

Bilancio flussiTemperature

Dominio

Trascinare qui l'intestazione della colonna per raggruppare secondo la colonna trascinata

Zona	Oggetto	Contorno	Tipo di condizione al contorno	Temperatura [°C]
SALA > Zona 1	Soffitto/tetto - 326,561 mq	Soffitto/tetto - 326,561 mq	Superficie	11,27
SALA > Zona 1	Parete - 292,623 mq - 0,0°	Parete - 292,623 mq - 0,0°	Superficie	9,89
SALA > Zona 1	Partizione - 212,264 mq (FOYER...	Partizione - 212,264 mq (FOYER...	Superficie	9,90
SALA > Zona 1	Partizione - 183,683 mq (REGIA...	Partizione - 183,683 mq (REGIA...	Superficie	10,82
SALA > Zona 1	Parete - 292,681 mq - 180,0°	Parete - 292,681 mq - 180,0°	Superficie	12,36
SALA > Zona 1	Pavimento controterra - 1136,25...	Pavimento controterra - 1136,25...	Superficie	11,20
SALA > Zona 1	Partizione - 80,616 mq (CAMERI...	Partizione - 80,616 mq (CAMERI...	Superficie	10,75
SALA > Zona 1	Tetto esterno - 5° Inclinazione 4...	Tetto esterno - 5° Inclinazione 4...	Superficie	11,33
SALA > Zona 1	Tetto esterno - 5° Inclinazione 4...	Tetto esterno - 5° Inclinazione 4...	Superficie	11,31
SALA > Zona 1	Partizione - 80,251 mq (MAGAZ...	Partizione - 80,251 mq (MAGAZ...	Superficie	10,81
SALA > Zona 1	Parete - 124,379 mq - 163,3°	Parete - 124,379 mq - 163,3°	Superficie	11,67
SALA > Zona 1	Parete - 163,599 mq - 90,0°	Parete - 163,599 mq - 90,0°	Superficie	9,88
SALA > Zona 1	Parete - 124,379 mq - 16,7°	Parete - 124,379 mq - 16,7°	Superficie	11,36

Importa

Figura 7.11 - Design Builder, Condizioni al contorno CFD

Discretizzazione dello spazio

Il metodo di calcolo richiede che lo spazio geometrico all'interno del quale devono essere condotti i calcoli sia suddiviso in celle adiacenti non sovrapposte: quando viene creato un progetto CFD, viene generata automaticamente una griglia che identifica tutti i vertici del dominio del modello e genera da essi le coordinate chiave lungo gli assi cartesiani X, Y e Z (larghezza, profondità, altezza). La griglia utilizzata da Design Builder CFD è infatti una griglia cartesiana rettilinea non uniforme, che significa che le linee della griglia sono parallele agli assi principali e che è consentita la non uniformità della spaziatura tra di esse.

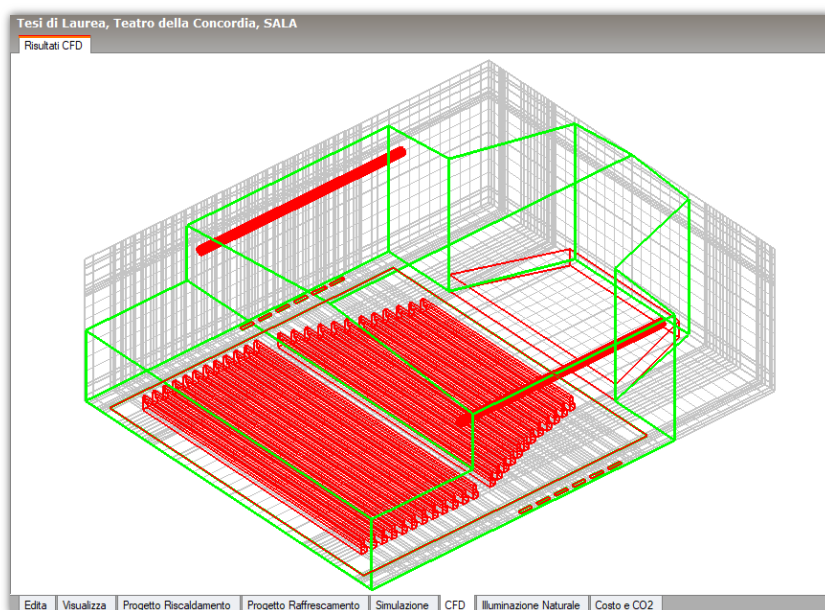
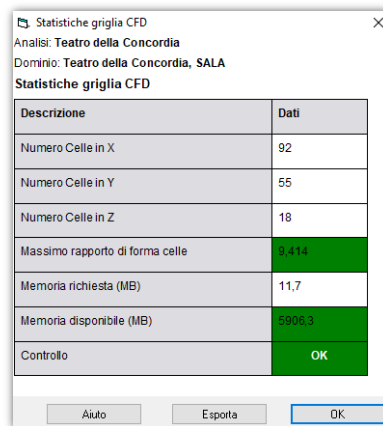


Figura 7.12 - Design Builder, griglia CFD

Le informazioni sulla griglia CFD possono essere ottenute utilizzando lo strumento “*Mostra statistiche della griglia CFD*”, che visualizza la finestra di dialogo delle statistiche della griglia CFD: se il rapporto di forma massimo delle celle oltrepassa il limite consentito di 50 o la memoria richiesta supera la memoria fisica disponibile, la voce "Controllo" indicherà un errore.

Dalle statistiche della griglia si osserva che il software ha suddiviso automaticamente il volume in più di 90000 celle e che i limiti di rapporto di forma massimo e memoria richiesta non vengono superati.



Descrizione	Dati
Numero Celle in X	92
Numero Celle in Y	55
Numero Celle in Z	18
Massimo rapporto di forma celle	9,414
Memoria richiesta (MB)	11,7
Memoria disponibile (MB)	5806,3
Controllo	OK

Figura 7.13 - Design Builder, statistiche griglia CFD

Visualizzazione grafica dei risultati

Tutte le opzioni di calcolo vengono lasciate invariate ad eccezione delle impostazioni di controllo delle variabili dipendenti, per le quali viene impostato il valore di 10^{-3} per la terminazione dei residui. Il modello di turbolenza adottato è “k-ε”, che fa riferimento alle equazioni di Navier-Stokes mediate: le grandezze risultano non istantanee, ma mediate in un certo periodo di tempo, sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni studiati e abbastanza grande rispetto ai disturbi della turbolenza. Questo modello è ritenuto dispendioso dal punto di vista computazionale ma accurato.

Al termine di queste operazioni viene avviata la simulazione CFD, i cui risultati vengono riportati di seguito.

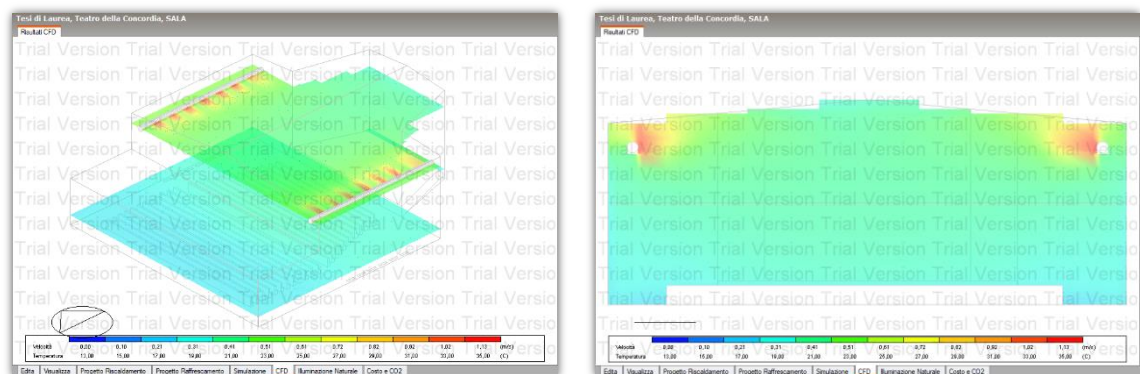


Figura 7.14 - Design Builder, CFD output di simulazione impianto a tutt'aria

Dall'analisi grafica degli output della simulazione CFD risulta evidente la stratificazione verticale della temperatura: la scala cromatica utilizzata evidenzia infatti che l'aria calda immessa dalle bocchette delle condotte viene inviata verso il centro della sala per poi cadere verso il basso ed essere aspirata dalle bocchette di estrazione laterali, ma la temperatura nella parte alta del locale è mediamente superiore rispetto a quella della zona occupata di circa 4°C.

Per l'analisi del caso con pavimento radiante è stata inserita manualmente la condizione al contorno di temperatura sul pavimento controterra ricavata dalla relativa simulazione, pari a 26°C, valore accettato poiché la temperatura massima ammissibile per le zone occupate in accordo alla norma ISO 11855-1 è pari a 29°C.

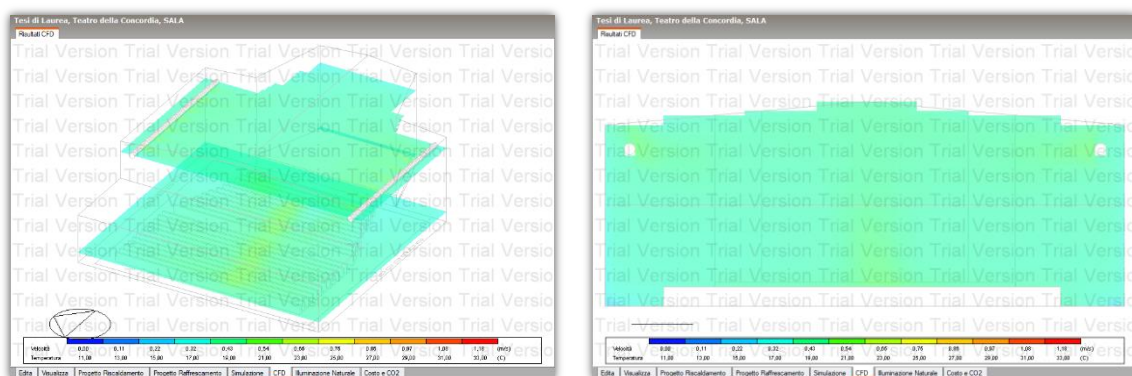


Figura 7.15 - Design Builder, CFD output di simulazione pavimento radiante

Si osserva che, come previsto, tra le poltrone della platea la temperatura nella sala è più uniforme: non vengono infatti evidenziati i getti di aria calda dalle condotte di immissione e la distribuzione della temperatura a 80 cm dal pavimento è circa uniforme intorno a 21°C. Si noti che nella zona occupata, la temperatura dell'aria nell'area centrale è leggermente più alta di quella registrata nelle zone più lontane dal centro della platea: tale zona infatti risente dell'irraggiamento di una porzione di pavimento radiante superiore rispetto alle zone laterali.

7.2.4. Confronto consumi

Analizzando i consumi di gas naturale durante la stagione di riscaldamento ottenuti da Design Builder con la nuova configurazione e paragonandoli ai consumi della simulazione del modello con il riscaldamento a tutt'aria, è immediato osservarne una riduzione: i risultati di entrambi i casi sono messi a confronto nel seguente istogramma.

Si nota una attenuazione della campana dei consumi, a indicare che la nuova soluzione è particolarmente adatta nei mesi in cui le temperature esterne sono più rigide. Il risparmio di energia per il riscaldamento è infatti generato dal vantaggio di prediligere la zona occupata piuttosto che l'intero volume della sala, in modo da fornire calore esclusivamente là dove è necessario.

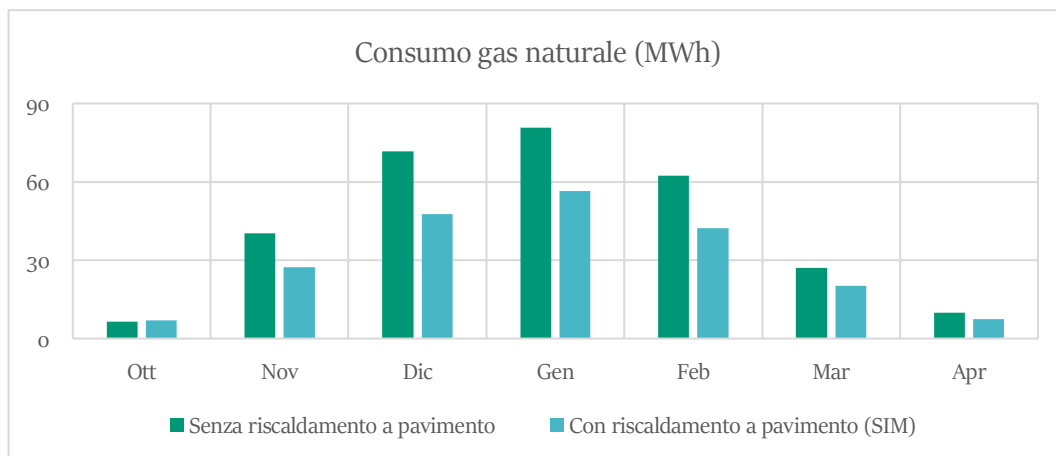


Grafico 7.7 - Confronto consumo mensile gas naturale con e senza riscaldamento a pavimento

Totale ante-operam	Totale post-operam	Risparmio energetico
298504 kWh	208447 kWh	90058 kWh

Tabella 7.3 - Confronto consumo stagionale gas naturale con e senza riscaldamento a pavimento

Il risparmio simulato è circa pari al 29% dei consumi ante-operam, valore che a differenza di quanto ottenuto con la precedente ipotesi di efficientamento energetico incide in modo significativo sui consumi di gas naturale nella stagione invernale.

Si registra tuttavia un aumento dei consumi elettrici per le pompe del sistema, registrato in tutti i mesi della stagione invernale, di entità comunque minima rispetto ai consumi elettrici mensili della struttura (grafico 6.18).

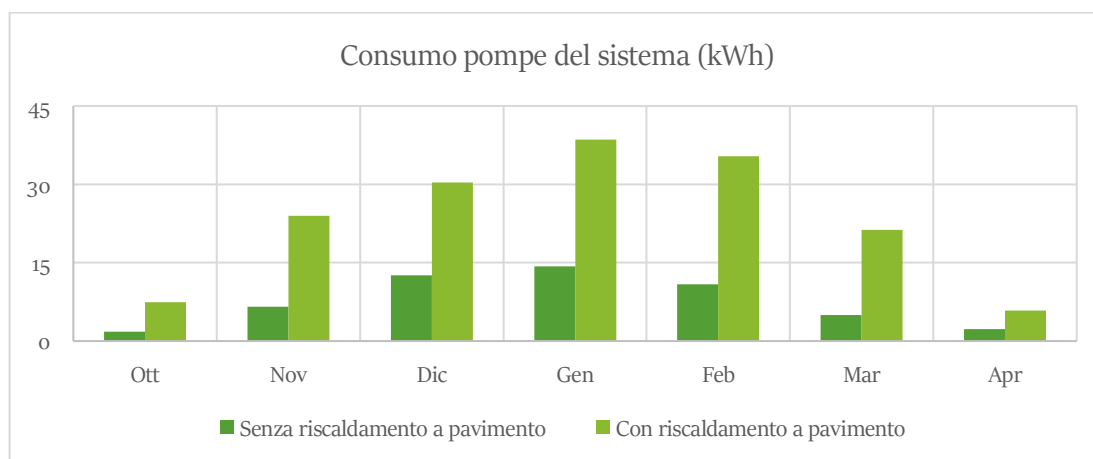
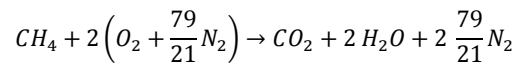


Grafico 7.8 - Confronto consumo pompe del sistema con e senza riscaldamento a pavimento

7.2.5. Stima delle emissioni di CO₂ evitate

Il risparmio energetico ottenuto in termini di risparmio di combustibile per il riscaldamento genera anche una diminuzione delle emissioni di anidride carbonica del teatro, che può essere stimato con una serie di semplici operazioni.

Considerando la composizione del gas naturale come 100% gas metano, si ipotizza che la combustione avvenga in maniera stechiometrica (ovvero con la massima concentrazione di CO₂ nei fumi secchi pari a circa l'11,7% in volume e in assenza di produzione di monossido di carbonio):



Si osserva che per ogni Sm³ di gas metano bruciato si produce uno Sm³ di anidride carbonica, ovvero 1.94 kg di CO₂. Noto il potere calorifico del gas naturale, ipotizzato pari a 9,7 kWh/Sm³:

$$M_{CO_2} = \frac{90058 \text{ kWh}}{9.7 \frac{\text{kWh}}{\text{Sm}^3_{CH_4}}} \cdot 1.94 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{Sm}^3_{CH_4}} = 18011 \text{ kg}_{CO_2} \sim 18 \text{ ton}_{CO_2}$$

Attraverso l'intervento sull'impianto di condizionamento si potrebbero emettere in atmosfera circa 18 tonnellate di anidride carbonica in meno all'anno rispetto alla produzione attuale.

8. Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi sono state analizzate le caratteristiche strutturali ed energetiche di un teatro cittadino di recente costruzione situato in provincia di Torino. Lo studio è nato dall'interesse del gestore del teatro verso il tema del risparmio energetico in relazione al comfort degli spettatori durante la stagione invernale. L'analisi dello stato di fatto è stata basata su dati as-built, analisi delle bollette e una serie di visite alla struttura e colloqui con la direzione del teatro. I dati raccolti sono stati organizzati e importati, con l'ausilio di una interfaccia grafica specifica, in un software di simulazione energetica con metodo di calcolo dinamico. Con lo strumento della firma energetica e il confronto tra consumi reali e simulati è stato possibile verificare il funzionamento del modello e procedere nella valutazione di interventi di efficientamento energetico.

Nella modellazione dinamica della struttura non è stata contemplata la parete solare per mancanza di un template predefinito di implementazione sul software di simulazione energetica e per questo motivo non sono stati valutati i benefici che tale dispositivo potrebbe apportare in caso di funzionamento. Inoltre, poiché la struttura analizzata è di costruzione recente, si è scelto di non intervenire sui dispositivi di produzione del calore, che allo stato attuale è affidata a generatori a gas naturale caratterizzati da buona efficienza, né sull'impianto di illuminazione a causa della tipologia non obsoleta di lampade installate e della bassa quantità di ore annuali di utilizzo. Inoltre, i risultati ottenuti sono da considerarsi validi nei limiti della semplificazione del modello sul software utilizzato, sul quale sono state fatte ipotesi in termini di dati climatici, utilizzo della struttura e dell'impianto di climatizzazione. L'irregolarità delle stagioni teatrali da un anno all'altro e la periodicità non costante degli eventi ha avuto inoltre un forte impatto sulla variazione dei consumi reali. L'accuratezza dei dati di input è inoltre influenzata dalla mancanza di informazioni inequivocabili sulla gestione degli spazi e degli impianti, come il monitoraggio degli apparecchi dell'impianto di climatizzazione e di misurazioni in opera.

La prima ipotesi di intervento prevede l'inserimento di lastre di materiale isolante nelle intercapedini di aria delle pareti verticali della struttura. Si osserva che tale operazione non conduce a risparmi energetici significativi a causa della tipologia costruttiva dello stato attuale e del grande volume degli spazi occupati: si nota infatti che l'aspetto più gravoso sul carico termico non è la perdita per trasmissione attraverso l'involucro ma il trattamento dei grandi volumi di aria. Alla luce dei risultati ottenuti in questa prima fase, è stata valutata la possibilità di cambiare la configurazione dell'impianto di riscaldamento, inserendo il pavimento radiante nella sala del teatro. Per implementare questo inter-

vento è stato necessario apportare alcune modifiche al modello di partenza: nel modello tridimensionale la sala è stata suddivisa in tre strati, per ciascuno dei quali è stato necessario variare le impostazioni dell'impianto HVAC in modo da prevedere l'immissione di aria proveniente dalla UTA a una temperatura inferiore e il pavimento radiante nello strato più basso. Questo intervento ha condotto a una riduzione di circa 30% dei consumi simulati di gas naturale nella stagione di riscaldamento e a un miglioramento del comfort degli spettatori della sala grazie a un aumento della temperatura radiante in prossimità della zona occupata, mostrando come in questo caso una strategia basata sulla presenza di terminali di riscaldamento collocati esclusivamente in prossimità della zona di richiesta risulti preferibile al trattamento di tutta l'aria.

9. Riferimenti

- [1] L. SOCAL, F. SOMA, La diagnosi e la certificazione energetica degli edifici, Edilclima, 2012
- [2] L. SOCAL, F. SOMA, La firma energetica, in “Progetto2000” di EDILCLIMA S.r.l, Volume 36, Giugno 2009, pp. 04-11
- [3] A. CAPOZZOLI, A. GORRINO, Caratterizzazione energetica e tecnologie costruttive dell’involucro edilizio, Vol. 6, Forte Chance Piemonte, 2010
- [4] V. CORRADO, I. BALLARINI, Energy audit and certification of buildings - Appunti del Corso, Politecnico di Torino, A.A. 2018
- [5] G.V. FRACASTORO, Energy savings and comfort in buildings – Appunti del Corso, Politecnico di Torino, A.A. 2017
- [6] E. FABRIZIO, V. MONETTI, Methodologies and advancements in the calibration of building energy models, in “Energies” di MDPI, Volume 8, Marzo 2015, pp. 2548-2574
- [7] S. LACASSAGNE, P. SCHILKEN, La signature énergétique, in “Outils de planification énergétique territoriale ” per ADEME/Energie-Cités, Gennaio 2003, pp. 27-32
- [8] G. IEZZI, Collettori solari ad aria SolarWall®. Soluzione a basso costo per il preriscaldamento dell’aria esterna destinata alla ventilazione e al riscaldamento degli ambienti, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino, A.A. 2005
- [9] M. FANTUZZI, Analisi di efficienza energetica mediante modellazione in regime dinamico, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, A.A. 2013
- [10] L. CIVALLERI, Cooling systems in desert climates: Case of study of a new multi-purpose building in Doha (Qatar), Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, Politecnico di Torino, A.A. 2017
- [11] IEA Global Energy & CO2 Status Report: www.iea.org/geco/
- [12] European Association of local authorities in energy transition: www.energy-cities.eu/
- [13] Agenzia nazionale per l'energia e lo sviluppo economico sostenibile: www.enea.it/
- [14] FIRE, Federazione italiana per l’uso razionale dell’energia: fire-italia.org/
- [15] Strategia Energetica Nazionale 2017: www.mise.gov.it/
- [16] Cartografia satellitare di Google Maps: maps.google.it/
- [17] SketchUp - modellazione 3D: www.sketchup.com/it
- [18] Plug-in OpenStudio: www.openstudio.net/
- [19] Design Builder Software: www.designbuilderitalia.it/
- [20] Banco dati meteorologica ARPA Piemonte: www.arpa.piemonte.it/

- [21] DIRETTIVA 2002/91/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia
- [22] DIRETTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE
- [23] DIRETTIVA 2018/844/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica
- [24] Legge n. 10 del 1991, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana
- [25] UNI EN 15603:2008 - Prestazione energetica degli edifici - Consumo energetico globale e definizione dei metodi di valutazione energetica
- [26] UNI CEI TR 11428:2011 - Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica
- [27] UNI CEI EN 16247-1:2012 - Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali
- [28] UNI TS 11300-1:2014 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale

Indice delle figure

Figura 3.1 - Teatro della Concordia, ingresso	15
Figura 3.2 - Teatro della Concordia, Sala	16
Figura 3.3 - Teatro della Concordia, pianta piano terreno.....	16
Figura 3.4 - Teatro della Concordia, pianta primo piano.....	17
Figura 3.5 - Teatro della Concordia, esempi di stratigrafia parete e copertura blocco 1 e 2	18
Figura 3.6 - Teatro della Concordia, dettagli facciata vetrata foyer.....	19
Figura 3.7 - Teatro della Concordia, dettaglio infissi camerini	20
Figura 3.8 - Teatro della Concordia, vista satellitare impianto fotovoltaico	21
Figura 3.9 - Teatro della Concordia, gruppo caldaie in locale tecnico a cielo aperto	22
Figura 3.10 - Teatro della Concordia, UTA1 in locale tecnico a cielo aperto	23
Figura 3.11 - Teatro della Concordia, parete solare	24
Figura 3.12 - Unità di trattamento dell'aria, schema funzionale.....	25
Figura 3.13 - Fonte: www.aivc.org	27
Figura 3.14 - Teatro della Concordia, diffusori lineari nel soppalco	28
Figura 3.15 - Teatro della Concordia, fotografia del foyer	28
Figura 5.1 - Sketchup Rendering, tipo di costruzione	35
Figura 5.2 - Sketchup Rendering, condizioni al contorno	35
Figura 5.3 - Design Builder, esempio di Programma Compatto: Uffici	38
Figura 5.4 - Design Builder, esempio di Programma Compatto: Camerini.....	39
Figura 5.5 - Design Builder, illuminazione uffici	40
Figura 5.6 - Design Builder, scheda di inserimento array PV	41
Figura 5.7 - Design Builder Rendering, layout e diagramma solare	41
Figura 5.8 - Design Builder, schema HVAC	42
Figura 5.9 - Design Builder, circuito acqua calda	43
Figura 5.10 - Design Builder, circuito acqua refrigerata.....	43
Figura 5.11 - Design builder, circuito ad aria	44
Figura 5.12 - Design Builder, unità fancoil.....	44
Figura 6.1 -Design Builder, impostazioni di località.....	50
Figura 6.2 - Design Builder, output progetto di riscaldamento	50
Figura 7.1 - Esempi di fattori forma per diverse configurazioni di edificio	61
Figura 7.2 - Curva di benessere ideale	62
Figura 7.3 - Esempio di stratigrafia, riscaldamento a pavimento radiante a secco.....	63

Figura 7.4 - Sketchup Rendering, modello con sala stratificata	63
Figura 7.5 - Design Builder, modello con sala stratificata.....	64
Figura 7.6 - Design Builder, "Hole and vents" (1)	64
Figura 7.7 - Design Builder, "Hole and vents" (2).....	65
Figura 7.8 - Design Builder, output progetto di riscaldamento.....	65
Figura 7.9 - Design Builder, nuovo schema HVAC	66
Figura 7.10 - Fonte: Desing Builder Simulation and CFD Training Guide 2009	69
Figura 7.11 - Design Builder, Condizioni al contorno CFD.....	70
Figura 7.12 - Design Builder, griglia CFD	70
Figura 7.13 - Design Builder, statistiche griglia CFD.....	71
Figura 7.14 - Design Builder, CFD output di simulazione impianto a tutt'aria.....	71
Figura 7.15 - Design Builder, CFD output di simulazione pavimento radiante.....	72

Indice dei grafici

Grafico 2.1 - Emissioni globali di CO2 relative al settore energetico ¹	2
Grafico 2.2 - Quadro legislativo italiano al 2015	6
Grafico 2.3 - UNI CEI 16247-1, schema logico diagnosi energetica	10
Grafico 2.4 - Firma energetica di primo grado, esempio.....	11
Grafico 2.5 - Firma energetica di secondo grado, esempio.....	11
Grafico 2.6 - Procedimento di simulazione	12
Grafico 4.1 - EnergyPlus, schema logico moduli interni	31
Grafico 4.2 - Temperatura massima e minima, anno 2017, Venaria Reale (Fonte: ARPA Piemonte) 32	
Grafico 4.3 - Design Builder, andamento orario di temperatura esterna e radiazione solare	33
Grafico 6.1 - Andamento consumo e temperatura esterna giornaliera 2016-2017.....	47
Grafico 6.2 - Andamento consumo e temperatura esterna giornaliera 2017-2018	47
Grafico 6.3 - Firma energetica per il dimensionamento (1)	48
Grafico 6.4 - Firma energetica per il dimensionamento (2).....	49
Grafico 6.5 - Confronto mensile consumi gas naturale	51
Grafico 6.6 - Design Builder, temperatura sala.....	52
Grafico 6.7 - Design Builder, temperatura foyer.....	53
Grafico 6.8 - Design Builder, radiazione solare.....	53
Grafico 6.9 - Design Builder, temperatura regia.....	53
Grafico 6.10 - Design Builder, temperatura uffici	54

Grafico 6.11 - Design Builder, temperatura camerini	54
Grafico 6.12 - Prelievi di energia elettrica, dal 1 ottobre al 30 aprile	55
Grafico 6.13 - Prelievi di energia elettrica, dal 4 al 10 novembre.....	55
Grafico 6.14 - Prelievi di energia elettrica, dall'11 al 17 dicembre.....	56
Grafico 6.15 - Prelievi di energia elettrica, dal 15 al 23 gennaio	56
Grafico 6.16 - Design Builder, consumi elettrici e produzione fotovoltaica, 1 ottobre - 30 aprile	57
Grafico 6.17 - Design Builder, consumi elettrici e produzione fotovoltaica, 2 - 8 dicembre	57
Grafico 6.18 - Confronto consumo mensile energia elettrica	58
Grafico 7.1 - Confronto consumo mensile gas naturale con e senza isolamento intercapedine	60
Grafico 7.2 - Confronto consumo mensile gas naturale con diverse costruzioni	61
Grafico 7.3 - Design Builder, temperatura sala PT	67
Grafico 7.4 - Design Builder, temperatura sala P2	68
Grafico 7.5 - Design Builder, nuovo andamento temperatura uffici.....	68
Grafico 7.6 - Design Builder, nuovo andamento temperatura camerini	68
Grafico 7.7 - Confronto consumo mensile gas naturale con e senza riscaldamento a pavimento	73
Grafico 7.8 - Confronto consumo pompe del sistema con e senza riscaldamento a pavimento	73

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 - Fattori di conversione in energia primaria, Allegato 1 D.M. Requisiti minimi 2015	7
Tabella 2.2 - Livelli di dettaglio basati su dati di input disponibili.....	14
Tabella 3.1 - Esempi di stratigrafie dell'involucro opaco	19
Tabella 3.2 - Datasheet vetrata foyer.....	20
Tabella 3.3 - Generatori di calore, dati di targa.....	22
Tabella 3.4 - Gruppo frigorifero, dati di targa	23
Tabella 3.5 - Batterie termiche e recuperatore di calore, dati di targa	25
Tabella 3.6 - Ventilatori UTA, dati di targa.....	25
Tabella 3.7 - Potenza installata ventilconvettori.....	26
Tabella 3.8 - Censimento apparecchi illuminanti.....	29
Tabella 5.1 - Trasmittanze termiche, calcolo Design Builder	36
Tabella 5.2 - Proprietà aperture, calcolo Design Builder	37
Tabella 5.3 - Valori di set-point e set-back per simulazione.....	45
Tabella 6.1 - Storico bollette gas naturale 2016-2017 e temperature esterne medie mensili.....	46
Tabella 6.2 - Storico bollette gas naturale 2017-2018 e temperature esterne medie mensili	46

Tabella 6.3 - Ipotesi ore di funzionamento impianto di riscaldamento	47
Tabella 6.4 - Potenza media mensile generatori di calore 2016-2017	48
Tabella 6.5 - Potenza media mensile generatori di calore 2017-2018	48
Tabella 6.6 - Confronto stagionale consumi gas naturale	52
Tabella 6.7 - Confronto stagionale consumi energia elettrica	58
Tabella 7.1 – Confronto consumo stagionale gas naturale con e senza isolamento intercapedine	60
Tabella 7.2 – Confronto consumo stagionale gas naturale con diverse costruzioni	61
Tabella 7.3 – Confronto consumo stagionale gas naturale con e senza riscaldamento a pavimento .	73