



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Ottobre 2023

**Modellazione e simulazione  
energetica del Centro  
Polifunzionale Lingotto di Torino**

Relatore:

Dott. Davide Papurello

Candidato:

Stefano Clemente



# Sommario

Negli ultimi anni, la produzione di energia e il suo consumo ha esortato la comunità scientifica a cercare delle soluzioni per la riduzione dell'energia consumata e delle nuove tecniche di produzione, evitando l'emissione di gas climalteranti. Secondo l'Eurostat, in Europa, il 28% dell'energia finale è consumata dal settore edilizio, il quale risulta poco innovativo, siccome due terzi degli edifici sono stati costruiti prima del 1976. Quest'ultimi, essendo per la maggior parte edifici storici e tutelati, non possono essere restaurati con le tecniche tradizionali, le quali risulterebbero onerose o impossibili da applicare. Le tecniche di gestione non invasive dell'edificio sono d'aiuto per la riduzione dei consumi degli edifici storici, secondo la letteratura attuale. Un'altra possibile soluzione è creare un modello dinamico dell'edificio esistente, mediante l'utilizzo di *software* di modellazione energetica, che consentono di calcolare in anticipo i possibili risparmi di energia derivanti da un possibile efficientamento dell'edificio. L'obiettivo di questo lavoro consiste nella creazione di un edificio esistente: Centro Polifunzionale Lingotto. La procedura utilizzata si basa sul rilievo dei dati sul campo e da progetti del 1990, ove possibile. In alcuni casi, sono state fatte delle ipotesi siccome non erano presenti dati a sufficienza. I dati sono stati implementati nel *software* IES VE e il modello è stato calibrato sui consumi reali, rilevati dalle bollette del 2021 e del 2022. Sono state analizzate delle possibili soluzioni di intervento, mirate alla riduzione dei consumi globali del fabbricato.

# Abstract

In recent years, the production of energy and its consumption has urged the scientific community to look for solutions to reduce the energy consumed and new production techniques, avoiding the emission of climate-changing gases. According to Eurostat, in Europe, 28% of final energy is consumed by the building sector, which is not very innovative as two thirds of buildings were constructed before 1976. As most of these buildings are historic and listed, they cannot be restored using traditional techniques, which would be expensive or impossible to apply. Non-invasive building management techniques are helpful in reducing consumption in historic buildings, according to current literature. Another possible solution is to create a dynamic model of the existing building, using energy modelling softwares, which allow advanced calculations of possible energy savings resulting from the building's efficiency. The objective of this work consists of the creation of an existing building: the *Centro Polifunzionale Lingotto*. The procedure used is based on the survey of field data and from 1990 projects, where possible. In some cases, assumptions were made as there was not enough data available. The data was implemented in the IES VE software and the model was calibrated to the actual consumption, as measured by the bills of 2021 and 2022. Possible intervention solutions, aimed at reducing the overall consumption of the building, were analysed.



# Indice

1. Analisi dei consumi di energia e le politiche energetiche in EU .....	15
1.1 Analisi dei consumi di energia primaria in EU .....	15
1.1.1 Analisi dei consumi di energia primaria in Italia .....	18
1.2 Politiche energetiche europee .....	21
1.3 Direttive europee EPBD .....	22
2. Condizione del parco edilizio italiano e normative per l'efficientamento.....	25
2.1 Censimento del parco edilizio italiano .....	25
2.2 Normativa per l'efficientamento degli edifici storici .....	30
3. Strategie di ottimizzazione energetica con tecniche non invasive.....	32
3.1 Ruolo dell'occupante .....	32
3.2 Regolazione dei sistemi di climatizzazione.....	33
3.3 Riduzione degli apporti solari.....	34
3.4 Sistema <i>free-cooling</i> .....	35
4. Simulazione dinamica del caso studio: Centro Polifunzionale Lingotto .....	38
4.1 Sintesi storica dell'edificio .....	38
4.2 Costruzione del modello .....	39
4.3 Raccolta e stima dei dati .....	42
4.3.1 Dati climatici di Torino.....	42
4.3.2 Dati e modellazione geometrica .....	45
4.3.3 Dati termo-fisici dell'involucro opaco e trasparente .....	50
4.4 Apporti termici interni .....	53
4.4.1 Illuminazione artificiale .....	53
4.4.3 Occupazione.....	55
4.4.3 Apparecchiature elettriche .....	57
4.4.4 Tabelle riassuntive dei profili temporali .....	59
4.5 Zone termiche .....	60
4.6 Presentazione degli impianti installati .....	61
4.6.1 Sistema di produzione dell'acqua tecnica.....	61
4.6.2 Unità di trattamento aria .....	66
4.6.3 Terminali idronici .....	71
4.6.4 Potenze termiche totali installate .....	71
4.7 Modellazione degli impianti dell'edificio .....	72

4.7.1 Modellazione delle centrali termiche.....	72
4.7.2 Modellazione delle centrali frigorifere .....	76
4.7.3 Modellazione delle unità di trattamento aria e dei terminali .....	82
4.7.4 Schema di massima dei collegamenti alle centrali .....	94
4.8 Risultati della simulazione e calibrazione .....	94
4.8.1 Risultati della simulazione.....	95
4.8.2 Prima calibrazione .....	97
4.8.3 Seconda calibrazione .....	99
4.8.4 Terza calibrazione.....	100
4.8.5 Quarta calibrazione .....	101
5. Interventi migliorativi mirati alla riduzione dei consumi di energia .....	107
5.1 Sostituzione delle torri evaporative .....	107
5.1.1 Torri evaporative di nuova generazione .....	108
5.1.2 Utilizzo dell'acqua di falda nel raffreddamento .....	108
5.2 Applicazione di pellicole a controllo solare .....	109
5.3 Combinazione degli interventi migliorativi.....	110
6. Conclusioni .....	113
7. Bibliografia .....	115

# Lista delle Tabelle

Tabella 1 - Edifici e complessi di edifici, utilizzati e non utilizzati, per tipo d'uso e regione [10].....	26
Tabella 2 - Temperature di bulbo secco ed umido misurate dalla sonda di temperatura esterna all'edificio .....	44
Tabella 3 - Volumi e superficie totali del modello costruito.....	47
Tabella 4 – Volumi e superfici suddivise per piano e per destinazione d’uso	47
Tabella 5 - Profili temporali di illuminazione.....	59
Tabella 6 - Profili temporali di occupazione .....	59
Tabella 7 - Profili temporali delle apparecchiature elettriche .....	60
Tabella 8 - Zone termiche dell'edificio con la relativa associazione dei profili temporali e gli apporti interni, tra parentesi il valore di attenuazione .....	61
Tabella 9 - Caratteristiche dei gruppi frigoriferi e delle torri evaporative di fase 2 .....	62
Tabella 10 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale frigorifera di fase 2.....	62
Tabella 11 - Caratteristiche dei gruppi frigoriferi e delle torri evaporative di fase 3 .....	63
Tabella 12 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale frigorifera di fase 3 .....	64
Tabella 13 - Caratteristiche degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 1 .....	64
Tabella 14 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale di fase 1	65
Tabella 15 - Caratteristiche degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 2 .....	65
Tabella 16 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale termica di fase 2 .....	65
Tabella 17 - Caratteristiche degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 3 .....	66
Tabella 18 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale termica di fase 3 .....	66
Tabella 19 - Caratteristiche delle UTA presenti nell'edificio. AC: tutt'aria. VP: aria primaria. RC: rilevati sul campo. RP: rilevati da progetto. IP: ipotizzati.....	67
Tabella 20 - Caratteristiche delle UTA presenti nell'edificio. AC: tutt'aria. VP: aria primaria. RC: rilevati sul campo. RP: rilevati da progetto. IP: ipotizzati.....	68
Tabella 21- Caratteristiche delle UTA presenti nell'edificio. AC: tutt'aria. VP: aria primaria. RC: rilevati sul campo. RP: rilevati da progetto. IP: ipotizzati.....	69



Tabella 22 - Potenze termiche delle batterie delle unità di trattamento aria divise per destinazione d'uso. PRE: Preriscaldamento. RAFFR: Raffrescamento. POST: postriscaldamento. REC: Recuperatore .....	70
Tabella 23 - Potenze nominali dei terminali idronici installati nell'edificio. IP: ipotizzati. RP: Rilevati da progetto .....	71
Tabella 24 - Potenze totali installate dell'impianto di emissione e di produzione .....	71
Tabella 25 - Configurazioni delle tipologie di UTA e di terminali nel modello dell'edificio.....	83
Tabella 26 - Scostamento e MBE in base ai consumi termici reali del teleriscaldamento .....	95
Tabella 27 - Scostamento e MBE in base ai consumi elettrici reali dell'illuminazione e del tecnologico .....	96
Tabella 28 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la prima calibrazione.....	98
Tabella 29 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento dopo la prima calibrazione.....	98
Tabella 30 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la seconda calibrazione .....	99
Tabella 31 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento dopo la seconda calibrazione.....	100
Tabella 32 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la terza calibrazione .....	100
Tabella 33 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento dopo la quarta calibrazione.....	101
Tabella 34 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la quarta calibrazione .....	102
Tabella 35 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico riferito ai consumi del 2021 .....	105
Tabella 36 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento riferito ai consumi dell'anno 2021 .....	106
Tabella 37 - Analisi dei consumi elettrici dopo la sostituzione delle torri evaporative con altre più efficienti .....	108
Tabella 38 - Analisi dei consumi elettrici dopo la sostituzione delle torri evaporative con l'impianto ad acqua di falda .....	109
Tabella 39 - Analisi dei consumi elettrici dopo all'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti.....	110
Tabella 40 - Analisi dei consumi del teleriscaldamento dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti .....	110
Tabella 41 - Analisi dei consumi del teleriscaldamento dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con altre più efficienti .....	111
Tabella 42 - Analisi dei consumi elettrici dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con altre più efficienti.....	111
Tabella 43 - Analisi dei consumi del teleriscaldamento dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con l'impianto ad acqua di falda .....	112
Tabella 44 - Analisi dei consumi elettrici dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con l'impianto ad acqua di falda.....	112



# Lista delle Figure

Figura 1 - Consumo finale di energia per vettore energetico, EU, 1990-2020 [1]	15
Figura 2 - Consumo finale di energia per settore, EU, 2020 [1]	16
Figura 3 - Dipendenza energetica per carburanti, EU, 1990-2020 [1]	17
Figura 4 - Panoramica della produzione di energia, fornitura e consumo in Italia, 2021 [2]	18
Figura 5 - Approvvigionamento energetico totale per fonte, consumo finale totale e PIL in Italia, 2005-2021 [2]	19
Figura 6 - Domanda energetica per settore e per fonte energetica in Italia [2]	19
Figura 7 - Emissioni di gas ad effetto serra per settore in Italia, 2005-2021 [2]	20
Figura 8 - Scenario emissioni di GHG in UE [6]	22
Figura 9 - Attestati di prestazione energetica in base all'anno di costruzione, la destinazione d'uso e le motivazioni [11]	27
Figura 10 - Attestati di prestazione energetica in base alla zona climatica di appartenenza e alla classe energetica [11]	27
Figura 11 - Attestati di prestazione energetica in base alla zona climatica di appartenenza e alla classe energetica di edifici NZEB [11]	28
Figura 12 - Consumi finali di energia per fonte energetica per gli edifici residenziali e per gli edifici adibiti ai servizi [2]	29
Figura 13 - Consumo di energia negli edifici residenziali secondo l'uso finale in Italia	30
Figura 14 - Stabilimento industriale Fiat ubicato a Torino [26]	38
Figura 15 - Bombardamenti avvenuti durante la seconda guerra mondiale [25]	39
Figura 16 - La ricostruzione dello stabilimento e l'obiettivo raggiunto tramite tale processo [25][26]	39
Figura 17 - Schema di avanzamento per la costruzione del modello energetico	41
Figura 18 - Vista aerea dell'edificio del caso studio [33]	43
Figura 19 - Tool per l'acquisizione delle temperature esterne effettive nel 2022, ApLocate	44
Figura 20 - Planimetria a quota +13.05 dell'edificio analizzato	46
Figura 21 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista SUD	48
Figura 22 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista OVEST	48
Figura 23 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista EST	48
Figura 24 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista NORD	49
Figura 25 - Modello geometrico dell'edificio analizzato	49
Figura 26 - Esempio di stratigrafia orizzontale, pavimento verso terra	51
Figura 27 - Esempio di stratigrafia verticale, parete esterna	51
Figura 28 - Esempio di serramento vetrato, Window 1	52
Figura 29 - Esempio di applicazione di tendaggi esterni, riquadro evidenziato	52
Figura 30 - Modellazione dell'illuminazione artificiale negli UFFICI	54

Figura 31 - Modellazione del profilo di utilizzazione degli apparecchi illuminati .....	55
Figura 32 - Modellazione dell'occupazione negli UFFICI.....	56
Figura 33 - Modellazione del profilo di occupazione .....	57
Figura 34 - Modellazione delle apparecchiature elettriche negli UFFICI .....	58
Figura 35 - Modellazione del profilo delle apparecchiature elettriche .....	58
Figura 36 - Fonti energetiche e <i>meters</i> nel software IES VE.....	73
Figura 37 - Modello dello scambiatore di calore SC1 della centrale termica di fase 2 .....	73
Figura 38 - Modularità ed ordine di accensione degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 2 .....	74
Figura 39 - Modellizzazione del sistema di pompaggio e di controllo della centrale termica di fase 2 .....	75
Figura 40 - Schema della centrale termica di fase 2 .....	75
Figura 41 - Schema della centrale termica di fase 1 .....	76
Figura 42 - Schema della centrale termica di fase 3 .....	76
Figura 43 - Modellizzazione della macchina frigorifera GF1 della centrale frigorifera di fase 3 .....	77
Figura 44 - Ordine di accensione dei gruppi frigo della centrale frigorifera di fase 3 .....	77
Figura 45 - Modellazione dei condensatori della centrale frigorifera di fase 3 .....	78
Figura 46 - Modellazione delle torri evaporative della centrale frigorifera di fase 3 .....	79
Figura 47 - Circuito primario della macchina frigorifera della centrale frigorifera di fase 3 .....	80
Figura 48 - Circuito secondario della macchina frigorifera della centrale frigorifera di fase 3 .....	81
Figura 49 - Schema della centrale frigorifera di fase 3 .....	82
Figura 50 - Schema della centrale frigorifera di fase 2 .....	82
Figura 51 - Esempio di associazione di una batteria di preriscaldamento alla centrale termica di fase 2 .....	82
Figura 52 - Schema funzionale del circuito di TIPO I.....	83
Figura 53 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della batteria di preriscaldamento .....	85
Figura 54 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della batteria di raffreddamento.....	86
Figura 55 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della batteria di post-riscaldamento .....	87
Figura 56 - Caratteristiche tecniche del ventilatore di mandata.....	88
Figura 57 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della ventilazione nella configurazione nei mesi invernali .....	88
Figura 58 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della ventilazione nella configurazione nei mesi estivi.....	89
Figura 59 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della ventilazione in base alla concentrazione della CO2 .....	90
Figura 60 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione del recuperatore di calore nella stagione invernale.....	91
Figura 61 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione del recuperatore di calore nella stagione estiva .....	91
Figura 62 - Caratteristiche tecniche del ricircolo d'aria .....	92

Figura 63 - Schema funzionale del circuito tipo A (sinistra) e tipo B (destra)	92
Figura 64 - Schema funzionale del circuito tipo C (sinistra) e tipo F (destra)	93
Figura 65 - Schema funzionale del circuito tipo D (sinistra) e tipo E (destra)	93
Figura 66 - Schema funzionale del circuito tipo G .....	93
Figura 67 - Schema funzionale del circuito tipo H (sinistra) e tipo L (destra)	94
Figura 68 - Schema delle zone termiche collegate alle diverse centrali .....	94
Figura 69 - MBE complessivo per i consumo del teleriscaldamento.....	96
Figura 70 - MBE per i consumi di illuminazione.....	97
Figura 71 - MBE per i consumi delle centrali tecnologiche .....	97
Figura 72 – Indice MBE delle calibrazioni della centrale termica di fase 1 .	103
Figura 73 – Indice MBE delle calibrazioni delle centrali termiche di fase 2 e 3 .....	103
Figura 74 – Indice MBE delle calibrazioni di tutte le centrali termiche .....	104
Figura 75 - Indice MBE delle calibrazioni dell'illuminazione della zona termica	
GALLERIA .....	104
Figura 76 – Indice MBE delle calibrazioni del tecnologico.....	105



# Capitolo 1

## Analisi dei consumi di energia e le politiche energetiche in EU

All'interno di questo capitolo, procederemo a un'analisi dettagliata dei consumi di energia primaria in Europa, tenendo conto dei vari settori coinvolti. Inoltre, forniremo un riassunto esauriente delle politiche energetiche implementate dalla Comunità Europea per affrontare la costante crescita delle emissioni di gas a effetto serra nell'atmosfera. Sarà nostro obiettivo esaminare in modo approfondito l'impatto di tali politiche e le misure adottate per mitigare questa importante problematica ambientale.

### 1.1 Analisi dei consumi di energia primaria in EU

Nel corso del 2020, il consumo finale di energia nell'Unione Europea è stato quantificato in un totale di 37086 PJ [1]. Il diagramma presente nella Figura 1 offre una suddivisione dettagliata del consumo finale di energia, discriminando le fonti di combustibile utilizzate.

Inoltre, sarà interessante esaminare le tendenze di consumo e le implicazioni di questa suddivisione nei consumi energetici, al fine di comprendere appieno l'impatto delle diverse fonti di energia sull'economia energetica dell'Unione Europea.

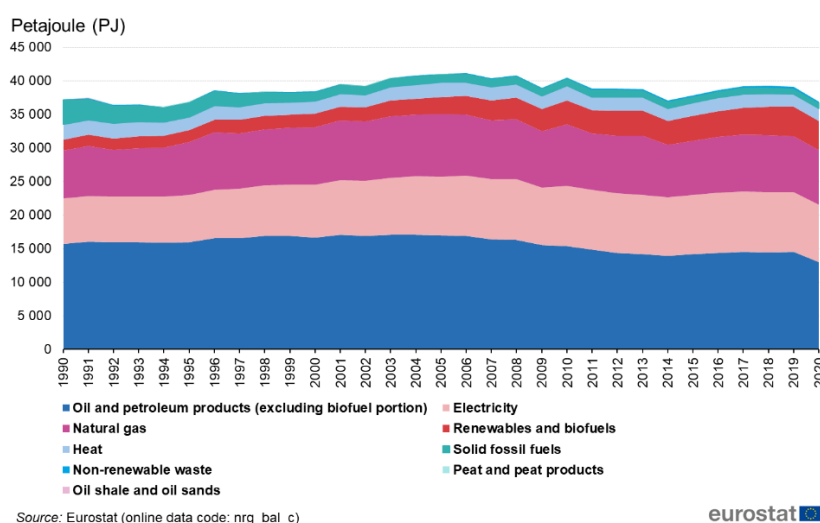


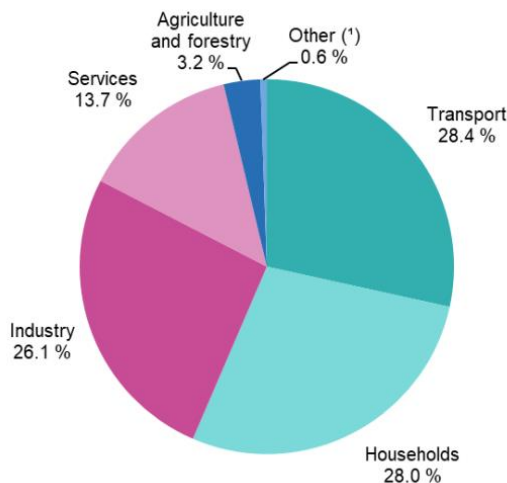
Figura 1 - Consumo finale di energia per vettore energetico, EU, 1990-2020 [1]

I prodotti petroliferi costituiscono una significativa quota del 35% del consumo finale di energia, seguiti da elettricità e gas naturale. Le recenti direttive europee stanno orientando sempre più verso l'elettrificazione, con particolare enfasi nel settore dei trasporti, che incide notevolmente sul consumo finale di prodotti petroliferi. Il consumo di energia primaria ha registrato un picco nel 2008, seguito da un periodo di contrazione fino al 2014, in gran parte a causa della crisi finanziaria. La produzione di energia primaria ha subito un cambiamento significativo, la produzione da fonti rinnovabili è triplicata dal 1990 a oggi. La ricerca ha svolto un ruolo fondamentale nella parziale sostituzione dell'uso di fonti fossili per le esigenze energetiche finali.

È fondamentale osservare come queste tendenze influiscano sul panorama energetico europeo, con un'attenzione crescente alla sostenibilità e alla diversificazione delle fonti di energia per garantire un futuro energetico più resiliente ed ecologicamente sostenibile.

L'analisi dei consumi energetici nei differenti settori fornisce una solida base per la pianificazione di interventi finalizzati a conseguire significativi risparmi energetici, evitando sprechi di risorse preziose e di capitali d'investimento (come illustrato nella Figura 2).

Tale approccio strategico consente di identificare le aree di maggiore consumo energetico e di concentrare gli sforzi su interventi mirati che portino a un utilizzo più efficiente delle risorse energetiche. Ciò non solo comporta un beneficio economico, ma anche un impatto positivo sull'ambiente attraverso la riduzione delle emissioni di gas serra e una maggiore sostenibilità nell'uso dell'energia. La Figura 2 illustra chiaramente come questa analisi guidi le decisioni e le azioni per un futuro energetico più responsabile ed efficiente.



(\*) International aviation and maritime bunkers are excluded from category Transport.

Source: Eurostat (online data code: nrg\_bal\_s)

eurostat 

Figura 2 - Consumo finale di energia per settore, EU, 2020 [1]

Emergono chiaramente i settori maggiormente energivori, ovvero il trasporto, l'industria e gli edifici, che insieme costituiscono circa l'80% del totale dell'energia consumata.



Alla luce dell'incidenza significativa di questi settori sul consumo energetico complessivo, le politiche energetiche future saranno focalizzate su strategie volte a ridurre la domanda di energia, promuovendo l'efficienza energetica dove possibile, e a sostituire progressivamente l'uso di energia fossile con fonti rinnovabili.

Un aspetto di notevole rilevanza, soprattutto negli ultimi tempi, riguarda la dipendenza energetica. La crisi legata alle importazioni di gas naturale ha messo in evidenza la marcata dipendenza della Comunità Europea dalle fonti fossili per il suo approvvigionamento energetico.

La Figura 3 rappresenta chiaramente il fabbisogno complessivo dell'Unione Europea in termini di energia lorda. Le tonalità più scure indicano la produzione interna di energia, mentre quelle più chiare evidenziano le importazioni.

Questo quadro evidenzia la necessità di ridurre la dipendenza dalle risorse fossili e di promuovere una maggiore indipendenza energetica attraverso l'adozione di fonti energetiche alternative, come le rinnovabili, e l'implementazione di politiche di efficienza energetica per garantire una fornitura energetica più stabile e sostenibile per l'Europa.

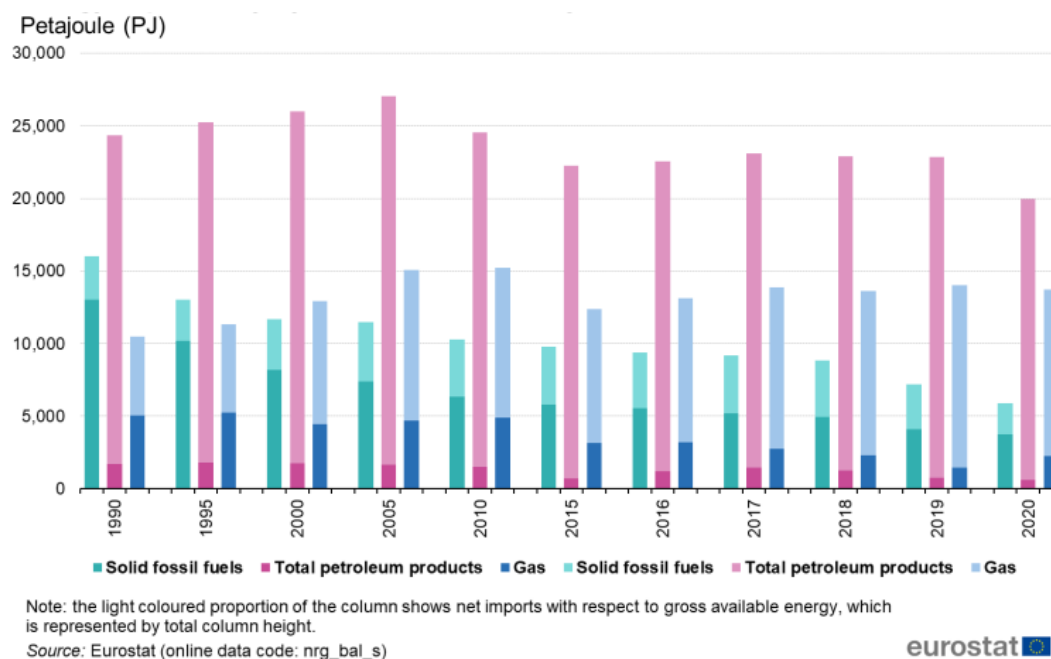


Figura 3 - Dipendenza energetica per carburanti, EU, 1990-2020 [1]

La produzione interna di energia ha mostrato una diminuzione significativa dal 1990 a oggi, in gran parte a causa dell'esaurimento delle risorse locali disponibili. Tuttavia, è interessante notare che, nonostante ciò, il consumo complessivo di energia è rimasto sostanzialmente stabile, fatta eccezione per le fonti fossili solide. La mancanza di produzione interna è stata quindi compensata con l'importazione di carburanti.

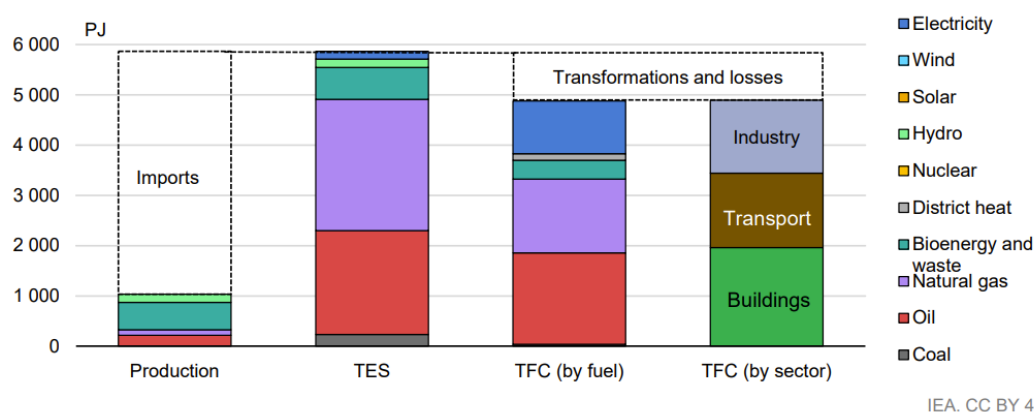
Una strategia chiave per affrontare la dipendenza energetica è la riduzione dei consumi energetici e lo sviluppo di metodologie alternative per la produzione di energia, che non facciano ricorso alle fonti fossili. Ciò non solo contribuirà a ridurre la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili, ma avrà anche un impatto positivo sulla sostenibilità ambientale, promuovendo fonti energetiche rinnovabili e tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico.

### 1.1.1 Analisi dei consumi di energia primaria in Italia

Il sistema energetico italiano ha subito significativi mutamenti negli ultimi anni, caratterizzati da un'evoluzione notevole nelle fonti energetiche adoperate. Attualmente, le principali fonti energetiche prodotte in Italia comprendono principalmente il gas naturale e l'energia rinnovabile. Rispetto a queste, la presenza di petrolio e carbone nel mix energetico è notevolmente ridotta [2].

Le nuove direttive europee, mirate alla riduzione delle emissioni di gas serra, promuovono attivamente l'adozione delle fonti energetiche rinnovabili nell'ambito del consumo energetico complessivo.

L'Italia, per soddisfare l'80% del suo fabbisogno energetico, si affida principalmente alle importazioni di petrolio e gas. Tuttavia, la produzione nazionale è prevalentemente costituita da fonti rinnovabili, tra cui spiccano le bioenergie, l'energia idrica, solare ed eolica.



IEA. CC BY 4.0.

Figura 4 - Panoramica della produzione di energia, fornitura e consumo in Italia, 2021 [2]

La Figura 4 fornisce un'illustrazione chiara del mix energetico italiano e delle perdite associate al trasporto e alla trasformazione dell'energia. Esaminando attentamente questi dati, possiamo confermare quanto detto in precedenza e osservare una marcata dipendenza dal gas naturale e dai prodotti petroliferi. Inoltre, è interessante notare che, nell'ultima parte del grafico, si evidenzia come il settore edilizio richieda una notevole quantità di energia primaria.

Nel corso degli ultimi quindici anni, si è verificata una significativa riduzione della domanda complessiva di energia nel mercato italiano, che ammonta a circa il 20%. Questo risultato è stato ottenuto principalmente grazie a miglioramenti nell'efficienza di conversione delle fonti energetiche in calore ed energia elettrica.

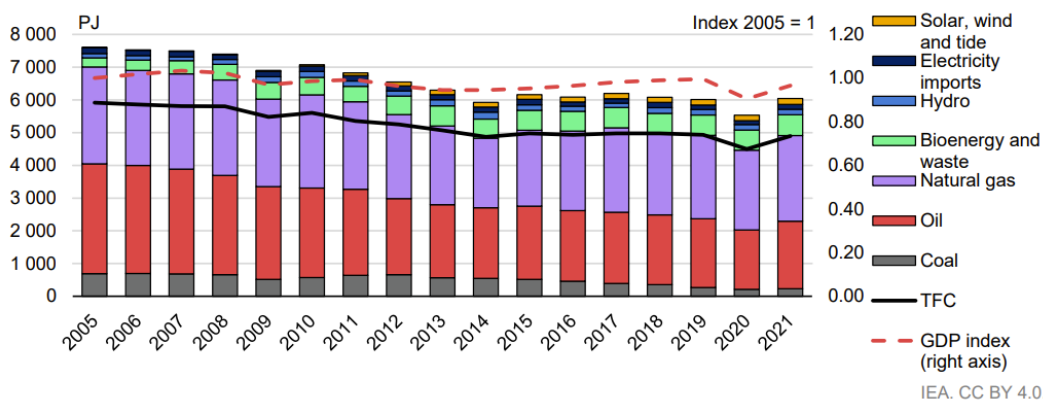


Figura 5 - Approvvigionamento energetico totale per fonte, consumo finale totale e PIL in Italia, 2005-2021 [2]

La Figura 5 illustra la relazione tra la domanda di energia primaria, il Prodotto Interno Lordo (PIL) italiano e i consumi di energia primaria da parte degli utenti finali. Dall'analisi del grafico emergono alcune tendenze significative: la riduzione dei consumi energetici ha principalmente interessato la domanda di prodotti petroliferi e carbone, con conseguente diminuzione. Nel contempo, la quantità di gas naturale è rimasta sostanzialmente stabile, mentre si è registrato un leggero incremento nella produzione di energia da fonti rinnovabili.

Il settore edilizio gioca un ruolo fondamentale nel ridurre il consumo di energia finale, rappresentando circa il 40% del consumo totale. Come illustrato nella Figura 6, le fonti energetiche utilizzate in questi settori sono così suddivise: il 51% è costituito dal gas naturale, il 27% da elettricità, il 14% da bioenergie e rifiuti, mentre la parte restante comprende petrolio, energia solare e teleriscaldamento.

Questi dati evidenziano l'importanza cruciale degli edifici nella riduzione del consumo energetico complessivo e la necessità di una transizione verso fonti energetiche più sostenibili e pulite per incrementare la sostenibilità del sistema energetico italiano.

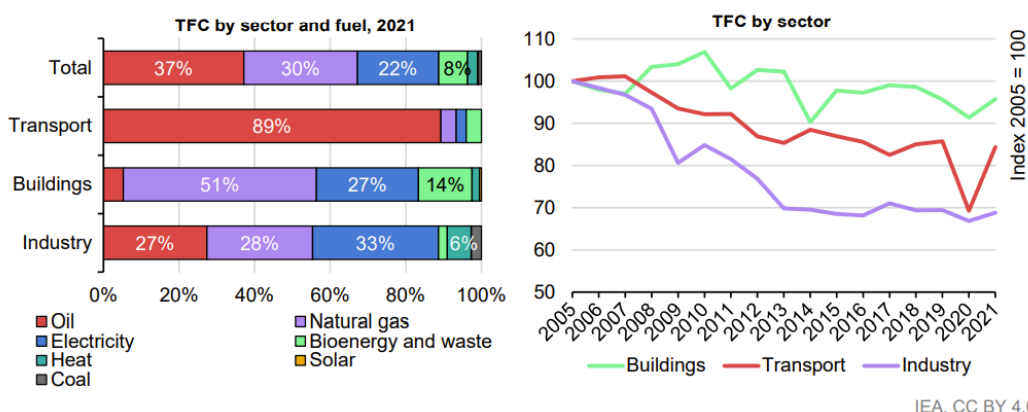


Figura 6 - Domanda energetica per settore e per fonte energetica in Italia [2]

Nel grafico a destra (Figura 6), è possibile osservare l'evoluzione dei consumi totali finali indicizzati per gli edifici, i trasporti e il settore industriale, nel periodo compreso tra il 2005 e il 2021. Da questa rappresentazione emerge un quadro interessante: nel settore industriale e dei trasporti, si è verificata una significativa

riduzione dei consumi, il che può essere attribuito a una maggiore efficienza nei processi di trasformazione e all'adozione di pratiche mirate a ridurre gli sprechi energetici. Per quanto riguarda il settore edilizio, invece, i consumi sono rimasti sostanzialmente costanti, con alcune fluttuazioni. Questa stabilità potrebbe indicare la necessità di ulteriori sforzi e politiche mirate per promuovere l'efficienza energetica negli edifici e ridurre il consumo complessivo.

In generale, questi dati illustrano l'importanza delle iniziative volte all'efficienza energetica e all'ottimizzazione dei consumi in tutti i settori, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale e promuovere un uso più sostenibile delle risorse energetiche.

Un altro aspetto di notevole rilevanza riguarda la produzione di gas a effetto serra, gran parte dei quali derivano dalla combustione di fonti fossili. La riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> è possibile attraverso una duplice strategia: ridurre i consumi energetici e aumentare la produzione di energia da fonti rinnovabili. La Figura 7 rappresenta chiaramente l'evoluzione delle emissioni di gas serra nel periodo dal 2005 al 2021, suddivise per settori.

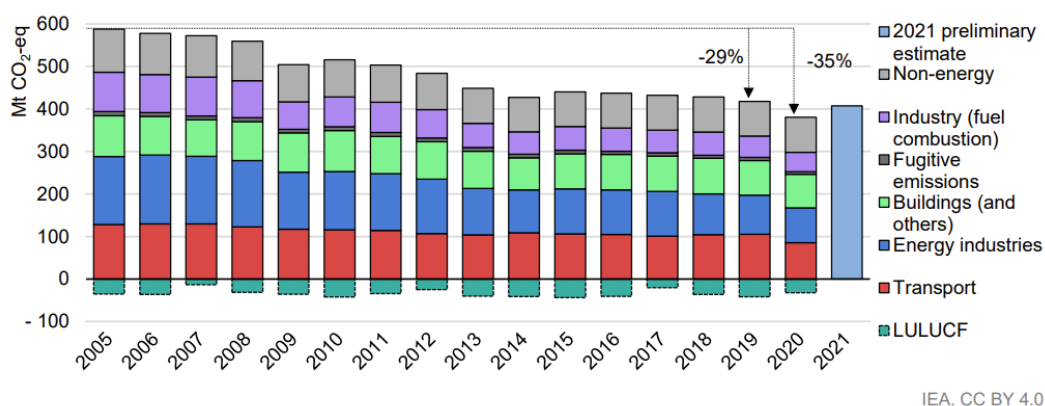


Figura 7 - Emissioni di gas ad effetto serra per settore in Italia, 2005-2021 [2]

Nel periodo fino al 2019, la produzione di CO<sub>2</sub> equivalente ha subito una significativa riduzione, pari al 29% rispetto ai livelli registrati nel 2005. Questa decrescita è principalmente attribuibile all'aumento dell'efficienza del sistema energetico italiano. Tuttavia, è interessante notare che, per quanto riguarda il settore edilizio, è stata registrata solo una lieve riduzione che non ha influito in modo significativo sul totale delle emissioni. Questa situazione è in gran parte il risultato delle caratteristiche del parco edilizio italiano, che è per la maggior parte datato e richiede un'analisi approfondita nei capitoli successivi. La riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente è stata particolarmente significativa nel settore industriale, noto per il suo alto consumo energetico. Questo miglioramento è stato favorito da incentivi statali denominati "Certificati Bianchi", che hanno incoraggiato l'adozione di pratiche più efficienti dal punto di vista energetico nell'industria. È importante notare che il 2020 non è stato considerato nell'analisi, poiché rappresenta un valore fuori scala a causa delle misure sanitarie adottate a seguito della pandemia, che hanno drasticamente ridotto i consumi energetici in modo sostanziale.

In sintesi, l'analisi delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente in Italia riflette una tendenza positiva verso una maggiore efficienza energetica, soprattutto nel settore industriale. Tuttavia, la sfida di ridurre ulteriormente le emissioni richiederà sforzi

continui e strategie mirate, specialmente nel settore edilizio, al fine di promuovere una transizione energetica più completa e sostenibile per il futuro.

## **1.2 Politiche energetiche europee**

In questo paragrafo, viene fornita un'ampia panoramica sulle politiche energetiche europee, dal Protocollo di Kyoto fino ad oggi, evidenziando gli obiettivi e gli impatti delle iniziative adottate nel corso degli anni.

Il Protocollo di Kyoto, stilato nel 1997, rappresenta un punto di svolta nella lotta ai cambiamenti climatici, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra rispetto al 1990. Tuttavia, la sua adozione su scala globale avvenne solo nel 2005, quando 55 paesi firmarono l'accordo. Questo protocollo fu una risposta alle crescenti preoccupazioni della comunità scientifica internazionale riguardo ai gas climalteranti, fornendo metodologie e azioni per mitigare il cambiamento climatico. L'obiettivo era una riduzione del 5% delle emissioni di gas serra tra il 2008 e il 2012 rispetto al 1990 [3].

L'Unione Europea ha recepito gli obiettivi del Protocollo di Kyoto attraverso il "Pacchetto clima-energia 20-20-20", fissato nel 2007 e attuato nel 2009. Questo pacchetto ha introdotto obiettivi ambiziosi, tra cui la riduzione del 20% delle emissioni di gas serra rispetto al 1990, il 20% della produzione di energia da fonti rinnovabili e un miglioramento del 20% nell'efficienza energetica. L'adozione di questo pacchetto ha determinato cambiamenti significativi nell'economia dell'UE, con un'enfasi sulla riduzione dei consumi, l'efficienza energetica e la drastica riduzione delle emissioni di gas serra. L'UE ha raggiunto con successo gli obiettivi principali imposti dal pacchetto clima-energia del 2009, con una quota di fonti rinnovabili pari al 21,3%, una riduzione del 31% delle emissioni di gas serra lorda e una riduzione netta del 34% rispetto al 1990 [5].

Nel 2011, la Commissione Europea ha introdotto una nuova direttiva a lungo termine, mirando a raggiungere emissioni nette di CO<sub>2</sub> pari a zero entro il 2050, attraverso la "Tabella di marcia verso un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio nel 2050". Questo obiettivo implica una riduzione dell'80% delle emissioni di CO<sub>2</sub> e la realizzazione di impianti per la cattura del carbonio. Considerando le attuali politiche, si prevede una riduzione massima delle emissioni del 60% entro il 2050, come illustrato nella Figura 8.

Queste iniziative dimostrano il forte impegno dell'UE nella lotta ai cambiamenti climatici e nella promozione di un'economia a basse emissioni di carbonio. Tuttavia, il cammino verso un futuro sostenibile richiederà ulteriori sforzi e politiche mirate per raggiungere gli obiettivi ambiziosi stabiliti.

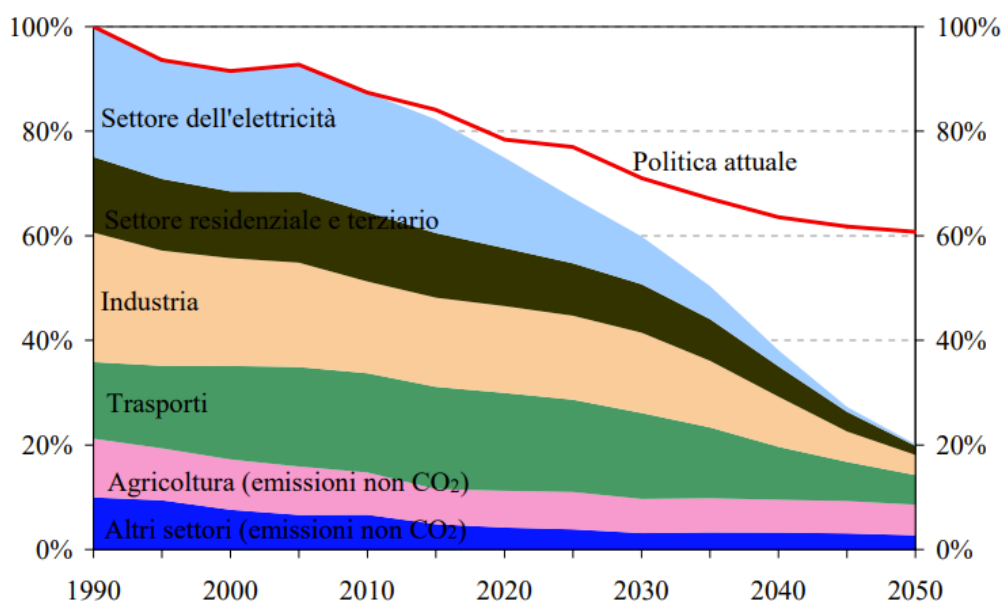


Figura 8 - Scenario emissioni di GHG in UE [6]

Il settore edilizio riveste un ruolo cruciale nella realizzazione di questo scenario ambizioso. Attualmente, essi contribuiscono in modo significativo alle emissioni totali di gas serra, rappresentando circa il 20% del totale. Tuttavia, l'obiettivo di raggiungere emissioni nette pari a zero entro il 2050 fa sì che il settore edile deve intraprendere azioni decisive e impegnative.

Per raggiungere questa riduzione sostanziale delle emissioni, saranno necessari investimenti considerevoli nel settore edilizio. Questi investimenti dovrebbero mirare a migliorare l'efficienza energetica degli edifici esistenti, promuovere la costruzione di nuovi edifici a emissioni zero e incentivare l'adozione di tecnologie a basse emissioni di carbonio. Ciò richiederà un coordinamento efficace tra governi, istituzioni, industria e cittadini, insieme a politiche e incentivi mirati.

In conclusione, l'obiettivo di raggiungere emissioni nette di CO<sub>2</sub> pari a zero entro il 2050 è ambizioso ma essenziale per affrontare la crisi climatica. Gli edifici svolgono un ruolo fondamentale in questo processo e, con gli investimenti e gli sforzi giusti, possono diventare una risorsa cruciale per la realizzazione di un futuro più sostenibile e privo di emissioni. La sfida è grande, ma il risultato potenziale è una società più verde, sana e resiliente per le generazioni future.

### 1.3 Direttive europee EPBD

La **Direttiva 2002/91/CE** del Parlamento Europeo sul rendimento energetico nell'edilizia (*Energy Performance of Building Directive, EPBD*) è stata recepita in Italia e pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 4 Gennaio 2003. L'obiettivo della presente direttiva è promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prestazioni per quanto riguarda il clima degli ambienti interni e l'efficacia sotto il profilo dei costi [7]. I contenuti principali riguardano:

- Impostazione di una metodologia unificata per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici;

- Imposizione di requisiti minimi di rendimento energetico per edifici di nuova costruzione oppure esistenti dopo una importante ristrutturazione;
- La certificazione energetica degli edifici;
- Ispezioni delle centrali termiche, con maggiore attenzione per gli impianti che hanno più di quindici anni.

Gli edifici esistenti con metratura maggiore di 1000 mq saranno obbligati a rispettare i requisiti minimi imposti dalla direttiva se effettuano una ristrutturazione importante. Gli edifici che non devono rispettare la direttiva sono:

- Edifici e monumenti ufficialmente protetti come patrimonio designato o nei casi di valore architettonico o storico;
- Edifici adibiti a luoghi di culto;
- Edifici temporanei con tempo di utilizzo non superiore a 2 anni;
- Edifici residenziali usati meno di quattro mesi all'anno;
- Fabbricati indipendenti con metratura inferiore ai 50 mq.

Le prime due categorie di edifici sono state escluse dalla normativa perché il loro efficientamento ha bisogno di uno studio più approfondito, mentre le altre categorie non influiscono in maniera rilevante sulla produzione di CO<sub>2</sub>.

La **Direttiva 2010/31/CE (EPBD Recast)** emanata dal parlamento europeo il 19 maggio 2010 ha sostituito la precedente direttiva 2002/91/CE [8]. L'obiettivo della direttiva è il medesimo, ma chiarendo e rafforzando alcune parti della precedente. Le disposizioni modificate sono:

- Si fa chiarezza sull'attestato di prestazione energetica, il quale comprende sia la prestazione energetica dell'edificio analizzato sia i valori di riferimento e i requisiti minimi. L'attestato deve comprendere raccomandazioni sull'uso efficace ed ottimale dell'edificio. Viene abolita la soglia di 1000 mq per le ristrutturazioni importanti di edifici esistenti; l'attestato deve essere rilasciato per ogni intervento mirato a migliorare l'efficienza dell'edificio, come modifica dell'involucro edilizio o dei sistemi tecnici;
- Affinché ci sia una sensibilità maggiore sugli sprechi di energia e le loro emissioni, gli edifici pubblici e con una elevata affluenza di persone sono obbligati ad esporre l'attestato di prestazione energetica;
- Gli edifici di nuova costruzione devono essere a energia quasi zero (NZEB) entro il 31 dicembre 2020. La fornitura di energia di questi ultimi deve provenire esclusivamente da fonti rinnovabili. La normativa è più stringente per gli edifici pubblici di nuova costruzione, i quali devono essere NZEB entro il 31 dicembre 2018.

Si evince che la direttiva si focalizza per lo più sugli edifici di nuova costruzione, imponendo delle soglie di intervento; gli edifici esenti dalla normativa sono i medesimi della precedente con qualche modifica sugli edifici residenziali non usati tutto l'anno, i quali se raggiungono un consumo superiore al 25% rispetto al consumo stimato all'anno sono obbligati ad attuare la codesta normativa.

La **Direttiva 2018/844/UE** del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea del 30 maggio 2018 modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione

energetica nell'edilizia [9]. Nella nuova edizione della normativa sono stati aggiunti degli articoli e modificati altri e sono:

- Aggiunto Art. 2bis: obbliga ad ogni Stato membro di stabilire una strategia a lungo termine per sostenere la decarbonizzazione dell'intero parco residenziale; una rassegna del parco immobiliare, su campionamenti statistici e sulla prevista ristrutturazione degli edifici nel 2020.
- Sostituzione Art. 6: venga effettuata un'analisi della fattibilità tecnica, ambientale ed economica di sistemi ad alta efficienza per edifici di nuova costruzione prima dell'inizio dei lavori.

Il cambiamento sostanziale della normativa consiste nel utilizzare sistemi di controllo automatizzato per la corretta regolazione degli impianti tecnici e monitorare il loro funzionamento.

Le nuove soluzioni tecnologiche rendono le direttive e i requisiti minimi imposti obsoleti; infatti è presente un testo approvato dal Parlamento europeo sulla prestazione energetica nell'edilizia che andrà a modificare la direttiva 2018/844/UE.

L'evoluzione delle direttive europee sulla prestazione energetica nell'edilizia rappresenta un passo significativo verso un futuro più sostenibile. La Direttiva 2002/91/CE ha posto le basi per il miglioramento del rendimento energetico degli edifici, introducendo requisiti minimi e la certificazione energetica. La successiva Direttiva 2010/31/CE ha rafforzato queste disposizioni e ampliato la portata dell'efficienza energetica degli edifici, con l'obiettivo di ridurre ulteriormente le emissioni di CO<sub>2</sub>. La Direttiva 2018/844/UE rappresenta un passo ulteriore, con l'introduzione di nuove disposizioni mirate alla decarbonizzazione del parco residenziale e all'adozione di tecnologie avanzate di controllo automatizzato degli impianti tecnici. Queste direttive riflettono l'impegno dell'Unione Europea nella lotta ai cambiamenti climatici e nella promozione di un'edilizia sostenibile. Tuttavia, le sfide rimangono considerevoli, e la realizzazione di edifici a emissioni zero richiederà ulteriori sforzi e investimenti. È essenziale promuovere l'adozione diffusa di tecnologie avanzate e sensibilizzare i cittadini e le industrie sull'importanza dell'efficienza energetica.

In conclusione, le direttive europee sulla prestazione energetica nell'edilizia rappresentano un passo cruciale verso un futuro più sostenibile, ma il percorso verso edifici a emissioni zero è ancora lungo e richiederà un impegno continuo da parte di tutti gli attori coinvolti.



# **Capitolo 2**

## **Condizione del parco edilizio italiano e normative per l'efficientamento**

Nel secondo capitolo, ci concentreremo sull'analisi dello stato attuale del patrimonio edilizio italiano, considerando attentamente l'anno di costruzione e la correlata classificazione energetica. Approfondiremo le leggi e i decreti governativi che riguardano il restauro e il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici storici e tutelati. Inoltre, metteremo in luce le lacune esistenti nelle normative vigenti e esploreremo le opportunità di colmare tali vuoti normativi.

### **2.1 Censimento del parco edilizio italiano**

In Italia, attualmente ci sono circa 14,5 milioni di edifici, di cui 12,2 milioni sono adibiti a scopi residenziali [10]. Sebbene questi dati siano basati su informazioni relativamente datate, essi riflettono in larga misura la situazione attuale, con alcune lievi variazioni.

REGIONI	Edifici	Complessi di edifici	Totale	Edifici e complessi di edifici utilizzati per tipo d'uso							% di edifici non utilizzati	
				Residenziale (a)	Produttivo	Commerciale	Direzionale /terziario	Turistico /ricettivo	Servizi	Altro tipo d'uso		Totale
Piemonte	1.130.742	4.467	1.135.209	944.690	26.833	19.546	4.384	3.973	17.092	66.572	1.083.090	4,6
V. d'Aosta/ V. d'Aoste	58.751	227	58.978	43.220	1.301	885	324	771	858	3.993	51.352	12,9
Liguria	312.781	1.475	314.256	263.468	3.593	4.998	1.056	2.033	3.967	18.552	297.667	5,3
Lombardia	1.761.815	13.131	1.774.946	1.488.640	64.350	36.764	9.357	5.357	27.275	81.338	1.713.081	3,5
Trentino-Alto Adige/Südtirol	236.313	917	237.230	210.936	3.266	2.745	1.009	2.792	3.424	6.837	231.009	2,6
Bozano/Bozen	91.187	154	91.341	85.644	702	896	284	949	766	1.669	90.910	0,5
Trento	145.126	763	145.889	125.292	2.564	1.849	725	1.843	2.658	5.168	140.099	4,0
Veneto	1.222.447	5.043	1.227.490	1.057.276	34.718	22.180	5.282	4.808	15.037	42.790	1.182.091	3,7
Friuli-Venezia Giulia	351.598	1.522	353.120	306.363	7.592	6.095	1.632	1.414	4.496	12.806	340.398	3,6
Emilia-Romagna	975.359	4.932	980.291	817.809	29.399	18.777	4.639	6.746	15.579	54.851	947.800	3,3
Toscana	886.113	4.144	890.257	733.499	23.033	16.755	4.159	6.541	12.885	67.919	864.791	2,9
Umbria	237.796	1.187	238.983	199.939	4.244	3.800	898	1.474	3.142	14.434	227.931	4,6
Marche	367.633	1.170	368.803	311.624	8.739	5.849	1.559	2.372	5.320	15.708	351.171	4,8
Lazio	949.101	5.578	954.679	801.210	15.108	19.566	4.653	3.400	13.320	54.420	911.677	4,5
Abruzzo	432.223	2.044	434.267	348.493	5.894	6.621	2.032	2.393	6.061	22.145	393.639	9,4
Molise	129.865	753	130.618	107.314	1.137	1.730	564	594	2.099	5.568	119.006	8,9
Campania	1.049.459	3.734	1.053.193	892.308	16.138	20.922	3.695	4.493	13.780	38.999	990.335	6,0
Puglia	1.091.133	3.889	1.095.022	947.298	16.054	18.074	4.156	3.521	11.668	39.450	1.040.221	5,0
Basilicata	186.818	436	187.254	160.035	1.886	2.143	914	505	2.023	8.436	175.942	6,0
Calabria	748.270	2.252	750.522	609.847	9.212	11.442	2.649	4.156	9.501	33.917	680.724	9,3
Sicilia	1.722.072	4.371	1.726.443	1.431.419	22.054	21.695	6.466	4.637	17.123	91.213	1.594.607	7,6
Sardegna	602.391	1.843	604.234	512.310	7.820	11.837	2.743	2.544	8.677	21.394	567.325	6,1
<b>Nord-ovest</b>	<b>3.264.089</b>	<b>19.300</b>	<b>3.283.389</b>	<b>2.740.018</b>	<b>96.077</b>	<b>62.193</b>	<b>15.121</b>	<b>12.134</b>	<b>49.192</b>	<b>170.455</b>	<b>3.145.190</b>	<b>4,2</b>
<b>Nord-est</b>	<b>2.785.717</b>	<b>12.414</b>	<b>2.798.131</b>	<b>2.392.384</b>	<b>74.975</b>	<b>49.797</b>	<b>12.562</b>	<b>15.760</b>	<b>38.536</b>	<b>117.284</b>	<b>2.701.298</b>	<b>3,5</b>
<b>Centro</b>	<b>2.440.643</b>	<b>12.079</b>	<b>2.452.722</b>	<b>2.046.272</b>	<b>51.124</b>	<b>45.970</b>	<b>11.269</b>	<b>13.787</b>	<b>34.667</b>	<b>152.481</b>	<b>2.355.570</b>	<b>4,0</b>
<b>Sud</b>	<b>3.637.768</b>	<b>13.108</b>	<b>3.650.876</b>	<b>3.065.295</b>	<b>50.321</b>	<b>60.932</b>	<b>14.010</b>	<b>15.662</b>	<b>45.132</b>	<b>148.515</b>	<b>3.399.867</b>	<b>6,9</b>
<b>Isole</b>	<b>2.324.463</b>	<b>6.214</b>	<b>2.330.677</b>	<b>1.943.729</b>	<b>29.874</b>	<b>33.532</b>	<b>9.209</b>	<b>7.181</b>	<b>25.800</b>	<b>112.607</b>	<b>2.161.932</b>	<b>7,2</b>
<b>ITALIA</b>	<b>14.452.680</b>	<b>63.115</b>	<b>14.515.795</b>	<b>12.187.698</b>	<b>302.371</b>	<b>252.424</b>	<b>62.171</b>	<b>64.524</b>	<b>193.327</b>	<b>701.342</b>	<b>13.763.857</b>	<b>5,2</b>

Tabella 1 - Edifici e complessi di edifici, utilizzati e non utilizzati, per tipo d'uso e regione [10]

Gli edifici non residenziali sono categorizzati in diverse sottocategorie in base al decreto del Presidente della Repubblica n. 412/93, come illustrato nella Tabella 1. I dati raccolti in questa analisi saranno confrontati con il numero di Attestati di Prestazione Energetica (APE) emessi, al fine di valutare la quota rimanente e stimare i consumi energetici degli edifici non certificati.

Gli edifici rappresentano una parte significativa, pari al 40%, dei consumi finali totali di energia, con il sottosettore residenziale che contribuisce per circa il 70% di questo totale. Tale consumo è ampiamente giustificato dall'età del patrimonio edilizio, poiché ben due terzi degli edifici sono stati costruiti prima del 1976, anno in cui è stata emanata la prima legge sull'efficienza energetica.

La certificazione APE, resa obbligatoria secondo le normative descritte nel capitolo precedente, copre solamente il 30% degli edifici esistenti. Questo numero limitato di attestati è in gran parte attribuibile a lacune normative; l'attestazione di prestazione energetica è obbligatoria per i nuovi edifici, le modifiche dell'involucro edilizio, le transazioni di compravendita e per la locazione degli edifici. Stimare la classe energetica degli edifici privi di APE risulta complesso, e l'unico metodo per ottenere risultati vicini alla realtà è basare l'analisi sull'anno di costruzione.

Attualmente, gli edifici muniti di APE sono stimati essere circa 4,6 milioni, di cui l'86,8% rientra nella categoria residenziale e il restante 13,2% in quella non residenziale [11]. Come evidenziato nella Figura 9, il 55% degli edifici certificati è stato costruito prima del 1973.



Figura 9 - Attestati di prestazione energetica in base all'anno di costruzione, la destinazione d'uso e le motivazioni [11]

Un dato di notevole rilevanza che emerge chiaramente dalla Figura 9 è la ragione alla base della valutazione delle prestazioni energetiche. La stragrande maggioranza degli attestati di prestazione energetica è stata emessa in occasione di atti di compravendita (corrispondenti al 57,3% del totale) e per la locazione (pari al 24,9%). Da questa informazione, si può ipotizzare che gli edifici compresi in questa categoria potrebbero non essere particolarmente efficienti dal punto di vista energetico, poiché non sono obbligati, in base alle normative vigenti, a possedere una classe energetica specifica prima di tali transazioni.

Il grafico a destra (Figura 10) ci offre una visione ancor più chiara della situazione critica in termini di consumo energetico degli edifici in Italia.

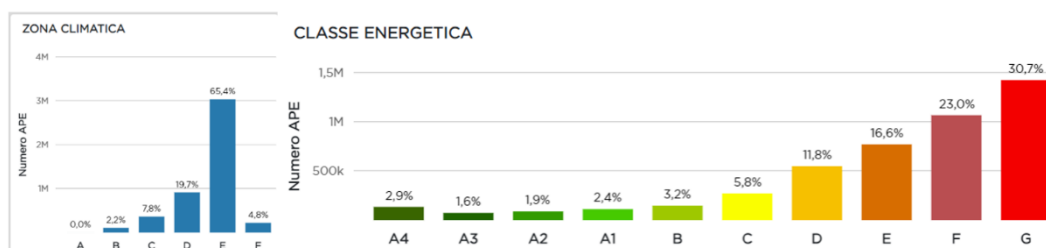
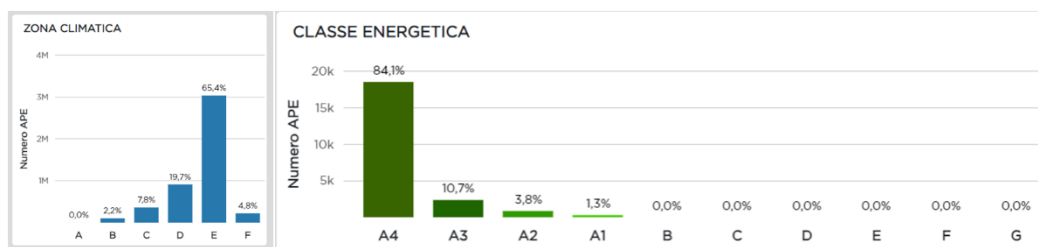


Figura 10 - Attestati di prestazione energetica in base alla zona climatica di appartenenza e alla classe energetica [11]

La classe energetica G comprende il 30,7% degli edifici, i quali registrano un consumo di energia primaria non rinnovabile ( $EP_{gl,nren}$ ) superiore a 160 kWh/m<sup>2</sup>. Questi dati forniscono una spiegazione plausibile per i consumi medi osservati negli edifici italiani certificati APE, i quali presentano una media di consumo pari a 209,9 kWh/m<sup>2</sup>.

Un punto importante da sottolineare riguarda gli edifici di nuova costruzione, che, per essere approvati, devono essere conformi alla direttiva 2018/844/UE, obbligatoriamente a zero emissioni nette di carbonio (NZEB). È interessante notare che nel parco edilizio italiano, come evidenziato nella Figura 11, sono presenti edifici NZEB, i quali costituiscono una parte significativa del panorama edilizio delle nuove costruzioni.



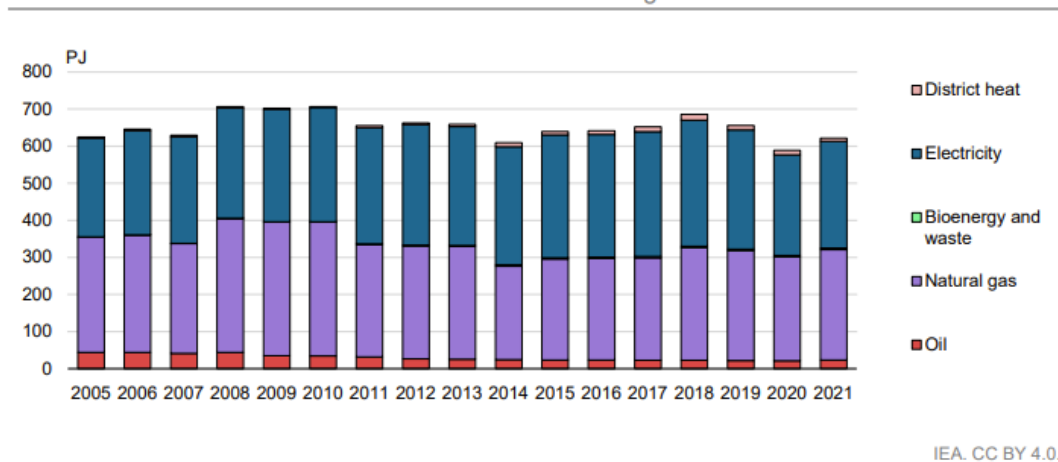
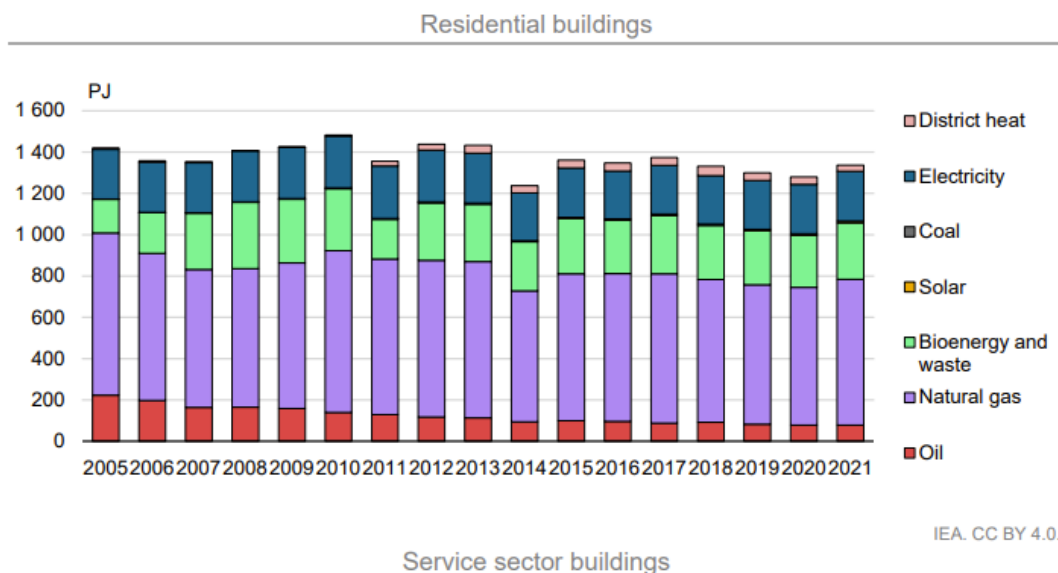
**Figura 11 - Attestati di prestazione energetica in base alla zona climatica di appartenenza e alla classe energetica di edifici NZEB [11]**

Il numero di attestati emessi, pari a circa 22.000, appare insignificante quando confrontato con l'intero panorama edilizio italiano. Questa situazione è allarmante, specialmente alla luce degli obiettivi delle politiche energetiche europee, che mirano a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> nel settore delle costruzioni a zero. Inoltre, esistono circa 410.000 edifici classificati nelle categorie energetiche da A1 ad A4, ma che non possono essere considerati NZEB, poiché non soddisfano i requisiti minimi, principalmente a causa dell'uso di fonti non rinnovabili.

È importante notare che i dati relativi alle certificazioni APE forniscono solo una visione parziale del parco edilizio italiano, coprendo meno del 30% del totale. Un'analisi completa, che considera tutti gli edifici in Italia, è stata condotta dall'IEA nel rapporto "Energy Policy Review Italy 2023".

Come precedentemente menzionato, il settore edilizio rappresenta il 40% dei consumi finali di energia in Italia, di cui il 68% è attribuibile all'uso residenziale e il restante 32% ai servizi. I grafici presenti nella Figura 12 illustrano i consumi di energia finale in base alla destinazione d'uso degli edifici e alla fonte energetica utilizzata. È evidente il ruolo significativo del gas naturale nel mix energetico, soprattutto per gli edifici residenziali. Inoltre, è interessante notare l'utilizzo di bioenergie nel settore residenziale, principalmente biomassa, per il riscaldamento degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria. Al contrario, gli edifici non residenziali fanno scarso uso di biomassa, preferendo l'elettricità.

Da un'analisi temporale, si può notare che dal 2011 il teleriscaldamento ha guadagnato terreno nel settore residenziale, soprattutto nel nord Italia, dove è concentrata la maggior parte delle centrali termoelettriche che operano in cogenerazione.



**Figura 12 - Consumi finali di energia per fonte energetica per gli edifici residenziali e per gli edifici adibiti ai servizi [2]**

Approfondendo l'analisi nel settore residenziale, è possibile estrarre ulteriori dettagli dal grafico rappresentato nella Figura 13. Emergono chiaramente tre componenti principali del consumo energetico: in primo luogo, troviamo il riscaldamento degli ambienti, che costituisce la quota più significativa; successivamente, segue la produzione di acqua calda sanitaria; infine, osserviamo il consumo di energia dedicato all'alimentazione degli elettrodomestici. Questi fattori delineano le principali sfide e opportunità per migliorare l'efficienza energetica nel settore residenziale.

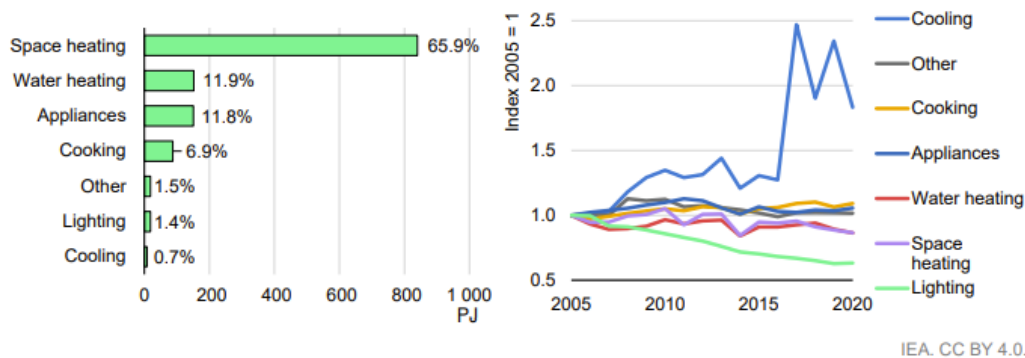


Figura 13 - Consumo di energia negli edifici residenziali secondo l'uso finale in Italia

Esaminando l'andamento dei consumi energetici dal 2005 a oggi, emerge un trend interessante, con differenze significative tra diverse categorie di consumo, in particolare per quanto riguarda il condizionamento e l'illuminazione. Nel caso dell'illuminazione, si osserva una marcata riduzione dei consumi nel corso degli anni, il che è principalmente attribuibile alla progressiva sostituzione delle tradizionali lampade a incandescenza con tecnologie più avanzate ad alta efficienza, come le lampade a LED. Questa transizione ha portato a notevoli risparmi energetici.

D'altra parte, i consumi legati al condizionamento presentano un trend opposto, con un aumento significativo nel settore residenziale. Questo aumento è in gran parte dovuto all'installazione sempre più diffusa di sistemi di condizionamento nelle abitazioni. Tale fenomeno è stato innescato dall'incremento delle temperature medie globali, che ha reso gli ambienti domestici spesso intollerabilmente caldi, rendendo necessaria l'adozione di tali dispositivi per garantire il comfort termico.

Questi cambiamenti nei consumi evidenziano l'importanza di promuovere ulteriori soluzioni di efficienza energetica e di adattarsi ai mutamenti climatici per mitigare gli impatti sul settore residenziale.

## 2.2 Normativa per l'efficientamento degli edifici storici

In questo paragrafo sarà descritta la normativa vigente per la riqualificazione e la salvaguardia dell'edilizia storica. Saranno esposti i punti salienti della normativa UNI EN 16883:2017 "Conservazione dei beni culturali – Linee guida per migliorare la prestazione energetica degli edifici" [12].

Il parco edilizio europeo, come detto in precedenza, ha una rilevanza storica, architettonica e culturale importante. Le nuove disposizioni sul risparmio energetico nel settore edile risaltano l'importanza di ridurre i consumi di energia e di conseguenza le emissioni di CO<sub>2</sub>, anche se per gli edifici storici non sono applicabili le direttive vigenti. La normativa cerca di indicare delle linee guida per effettuare una riqualificazione mirata al risparmio energetico e alla salvaguardia dell'edificio storico.

La procedura suggerita dalla normativa segue le seguenti fasi di analisi e progettazione:

- 1) Indagine sullo stato di fatto dell'edificio. La prima considerazione da fare è che ogni edificio storico è difficilmente assimilabile ad altri, sia per la

formazione dell'edificio sia per la destinazione d'uso. Di conseguenza, l'analisi delle sue condizioni e delle migliorie attuabili saranno valutate caso per caso. Ovviamente, come detto in precedenza, la riqualificazione non deve alterare l'aspetto dell'edificio; gli interventi da eseguire possono fare riferimento alle normative UNI per migliorare la prestazione energetica degli edifici non tutelati. Un altro dato fondamentale è la destinazione d'uso dell'edificio, il quale implementato in un modello dinamico porterebbe a risultati più realistici;

- 2) Dopo aver effettuato la raccolta dati dell'edificio, si effettua una valutazione sulla sostenibilità della miglioria della prestazione energetica, se l'esito è positivo si ipotizzano gli interventi da effettuare, i quali possono intervenire su tre categorie: modifica dell'involucro edilizio, riqualificazione dell'impianto tecnico e strategie sul controllo occupazionale. Ovviamente, gli interventi devono essere approvati non solo a livello funzionale, ma anche da un funzionario del ministero dei beni culturali che valuterà la fattibilità architettonica del progetto;
- 3) L'avanzamento dei lavori deve essere seguito sempre da un funzionario del ministero, il quale potrebbe mettere in pausa i lavori richiedendone una modifica.

A fine lavori è consigliabile informare l'utenza sulle opzioni di gestione per effettuare un risparmio di energia a livello di occupante, i quali dovranno essere istruiti. Un altro aspetto importante nel lungo termine è la manutenzione degli impianti tecnici, che se ben tenuti, rispetteranno il valore di efficienza nel loro ciclo di vita.

# Capitolo 3

## Strategie di ottimizzazione energetica con tecniche non invasive

Nel terzo capitolo, verranno esaminate approfonditamente le metodologie non invasive per la riduzione dei consumi energetici, utilizzando casi di studio concreti presenti nella letteratura. Queste metodologie non invasive rivestono una notevole importanza nella diminuzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas a effetto serra, presentando inoltre il vantaggio di essere economicamente vantaggiose e richiedere solo lievi modifiche sui sistemi impiantistici tradizionali. Saranno prese in considerazione e analizzate le seguenti tecniche che influiscono sulla gestione energetica degli edifici: l'impatto delle abitudini degli occupanti, la regolazione dei sistemi di raffrescamento e riscaldamento, la limitazione dell'apporto solare e l'utilizzo dei sistemi *free-cooling*.

### 3.1 Ruolo dell'occupante

Il comportamento dell'occupante negli edifici ha un ruolo fondamentale nella gestione e nella riduzione dei consumi, anche per gli edifici di nuova costruzione. Quest'ultimi, essendo molto innovativi e mirati alla riduzione della domanda di energia, sono molto sensibili alle azioni degli occupanti, i quali, con comportamenti negativi dal punto di vista energetico, potrebbero peggiorare le prestazioni dichiarate dell'edificio. Questi comportamenti possono essere evitati sia automatizzando tutto l'edificio e non concedere potere decisionale agli utenti sia istruendo gli occupanti al risparmio di energia e rendendoli consapevoli delle conseguenze delle loro azioni. Dal punto di vista economico, è molto più dispendioso automatizzare tutto l'edificio che istruire l'occupante. Un fattore importante negli edifici automatizzati, consiste nel fatto che, se viene negata la possibilità all'utente di modificare determinati parametri, la probabilità che sia insoddisfatto è alta. Questa probabilità si riduce se la modellazione e l'esecuzione del progetto è ottimale, implementando nel progetto le esigenze dell'utente. Il problema principale consiste nell'implementare nel *software* di modellazione dinamica il comportamento dell'utente, il quale non è determinato da una legge fisica ma è stocastico. D'altro canto, la soddisfazione dell'occupante dipende dalle proprie esigenze personali, le quali sono sconosciute nella fase di progettazione. Una soluzione ottimale è avere un edificio semi-automatizzato in modo tale da poter far decidere alcune operazioni all'utente e istruirlo sulla gestione ottimale degli impianti.



Un'altra azione fondamentale è la manutenzione degli impianti. Un'ottima manutenzione consente all'edificio di lavorare ad un'efficienza molto simile alle prestazioni dichiarate durante la progettazione. Molte volte, la tenuta dell'impianto e le sue funzionalità ottimali dipendono dalle accortezze che il manutentore applica. Nel caso degli edifici residenziali, la figura del manutentore è sostituita parzialmente dall'utente il quale gestisce l'impianto. Si può evincere che, se l'occupante non fosse istruito sulla gestione degli impianti, i consumi stimati da progetto potrebbero essere differenti dai consumi reali. Una delle soluzioni che si può applicare, è dare all'utente delle informazioni tecniche personalizzate in modo tale che una persona senza alcuna conoscenza nel settore impiantistico riuscirebbe a capire come gestire l'impianto al meglio.

Gli studi attuali, mediante delle interviste e studiando il comportamento degli occupanti, hanno permesso di creare dei modelli di aggiustamento da implementare nella modellizzazione degli edifici, sia di nuova costruzione sia esistenti.

Lo studio di He et al. [13] enuncia che il possibile risparmio di energia considerando esclusivamente i comportamenti degli occupanti può variare dal 9.5% a 21.0%. Questa stima è stata effettuata su dei grandi edifici a Singapore e i comportamenti modellizzati sono stati: occupazione, regolazione dei tendaggi, regolazione dell'illuminazione, uso dell'apparecchiature elettriche, comfort termico, uso dell'HVAC e apertura delle finestre. Come si può notare, i comportamenti analizzati sono molto comuni nella vita quotidiana e una buona gestione ed informazione di questi comportamenti porterebbe ad un notevole risparmio sulla domanda di energia e sulla produzione della CO<sub>2</sub>, senza intervenire fisicamente sulla struttura dell'edificio.

Un altro studio molto importante sulla regolazione dei tendaggi in degli edifici adibiti ad uffici singoli è stato sviluppato da Chen et al. [14]. Lo studio mostra che l'energia risparmiata inserendo un sistema automatico motorizzato sulle schermature permette un risparmio del 7.26%. Il modello di regolazione si basa sull'occupazione reale di questi uffici che, essendo occupati da persone che hanno un orario di lavoro flessibile, è molto stocastica. Questo implica una difficile gestione della presenza dell'occupante, costringendo ad una regolazione semiautomatica in cui l'occupante può decidere in che modo intervenire sui tendaggi. Se l'ufficio è vuoto, la regolazione risulta essere completamente automatica, incentrata nel risparmio di energia termica a discapito del comfort visivo.

## **3.2 Regolazione dei sistemi di climatizzazione**

Il consumo di energia nel settore edilizio ammonta al 36% nel mondo, il 35% è dovuto al condizionamento [15]. I sistemi HVAC coprono il 10% dei consumi di energia finale e la relativa emissione di CO<sub>2</sub> [16]. La regolazione degli impianti di condizionamento mediante l'ausilio di un modello predittivo risulta di particolare importanza per il risparmio di energia primaria. Il controllo predittivo utilizza un algoritmo multi-obiettivo che consente di minimizzare l'energia consumata dall'edificio, mantenendo costante il comfort termico. Alcuni studi moderni mostrano il potenziale di questa tecnologia per l'impianti HVAC, riducendo l'energia richiesta dal 10% al 50% rispetto al modello base con condizioni di comfort identiche [16]. Lo studio sviluppato da Ascione et al. [16] per un edificio nZEB localizzato a Benevento, utilizza un modello che fornisce i valori ottimali delle temperature di set-point su un orizzonte di pianificazione del giorno prima per

minimizzare i costi energetici e il discomfort termico, sulla base delle previsioni meteorologiche. Secondo la teoria sul comfort di Fanger, l'edificio appartiene alla categoria II. Applicando il modello predittivo precedentemente citato, il costo del condizionamento si riduce del 28% rispetto alla *baseline*, non variando il livello di comfort. Mentre, se si massimizza il comfort, sempre secondo la teoria di Fanger, la riduzione dei costi sul condizionamento sono dell'8%.

Lo studio di Sampaio et al. [17] analizza l'utilizzo di un modello di controllo predittivo con l'ausilio di un modello matematico *grey-box* per predire i carichi termici dell'edificio e la sua temperatura interna. Il modello è stato ottimizzato mediante una funzione multi-obiettivo *black-box*, per ridurre il tempo di computerizzazione. Il modello calibrato è stato usato per strategie di ottimizzazione riguardanti la climatizzazione, con l'obiettivo di ridurre l'energia consumata il giorno successivo mantenendo invariate le condizioni climatiche interne. Secondo i ricercatori, durante la stagione invernale si è ottenuto un risparmio del 11,7%, mentre per quella estiva del 8,6%. L'errore di predizione risulta essere dell'8%.

Analizzando questi studi, si può notare come i modelli di controllo predittivo, nonostante sia un intervento non invasivo, permette un modesto risparmio energetico ed economico.

### 3.3 Riduzione degli apporti solari

La riduzione degli apporti solari è un tema di rilevante importanza negli edifici con molta superficie vetrata. Le potenze dissipate per trasmissione sono molto elevate nella stagione invernale, le quali influenzano la domanda di energia per riscaldamento. Queste potenze sono riequilibrate dagli apporti solari, che forniscono energia all'ambiente interno, creando un effetto positivo ma se eccessivo potrebbero creare un surriscaldamento dell'ambiente. Per quanto riguarda la stagione estiva, gli apporti solari incidono negativamente sulla richiesta di energia, aumentandone la richiesta per il condizionamento. Al giorno d'oggi ci sono molteplici soluzioni che riducono la domanda di energia derivante dalle dispersioni degli elementi vetrati, tra queste troviamo la possibilità di sostituire i serramenti. La sostituzione dei serramenti negli edifici storici o tutelati è possibile solo se l'aspetto del nuovo serramento è identico a quello precedente. Ciò comporta un costo maggiore rispetto alla sostituzione standard degli elementi vetrati, la quale, di per sé, è già molto onerosa. Un'altra tecnologia non utilizzabile, ma molto utile nella riduzione degli apporti solari, è l'applicazione di tendaggi esterni. È deducibile che l'applicazione di questa tecnologia comporta una modifica nell'architettura dell'edificio, non consentendone l'applicazione.

Una soluzione economica e applicabile a livello di legge negli edifici tutelati, è l'applicazione di una pellicola basso emissiva che non muta il colore dei vetri e la forma del serramento. L'ultima soluzione consentita per la riduzione degli apporti solari è l'utilizzo di tendaggi interni; quest'ultimi sono molto importanti perché si ha la possibilità di regolazione in base alla stagione, consentendo una riduzione degli apporti solari nei mesi estivi, mentre, nei mesi invernali, è possibile utilizzare gli apporti gratuiti per il riscaldamento dell'ambiente.

Lo scopo della ricerca condotta da Yin et al. [18] è la valutazione dei vantaggi energetici ottenibili tramite l'applicazione di pellicole solari su finestre di un edificio commerciale con ampie facciate vetrate a Shanghai, in Cina. Dai risultati delle simulazioni è emerso che due fattori hanno un impatto significativo sull'efficacia delle pellicole per finestre. Questi fattori comprendono la posizione in cui la pellicola viene applicata e la stratigrafia del pacchetto vetrato. L'efficacia

delle pellicole varia notevolmente a seconda del tipo di pellicola e del suo posizionamento: applicate all'esterno o all'interno delle finestre esistenti, possono ridurre rispettivamente del 44% e del 22% il coefficiente di schermatura e il coefficiente di guadagno di calore solare. Inoltre, nel caso di un sistema a doppio vetro a bassa emissività, il carico di condizionamento dell'edificio attraverso le finestre durante una giornata di progettazione si riduce del 27,5% per le pellicole esterne e del 2,2% per quelle interne.

Il lavoro condotto da Pereira et al. [19] concentra la sua attenzione sull'analisi dell'applicazione di vari tipi di pellicole per il controllo solare (SCFs) su elementi vetrati già installati, nonché sulla valutazione della sostituzione dell'intero pacchetto vetrato. L'obiettivo di questa ricerca consiste nell'esaminare le variazioni in termini di impatto energetico, ambientale ed economico tra tre diverse opzioni di SCF per il miglioramento delle superfici vetrate di un edificio preesistente ubicato a Lisbona. I risultati di questa indagine indicano che diverse strategie di miglioramento consentono di diminuire il consumo complessivo della domanda di energia. Allo stesso tempo, queste soluzioni mantengono elevati livelli di comfort termico e visivo, conformandosi agli standard per l'ambiente di lavoro.

Lo studio condotto da Nicoletti et al. [20] mette in evidenza l'efficacia degli strumenti di controllo solare, tra cui le veneziane, nella regolazione dell'ingresso di calore e luce negli edifici. L'obiettivo centrale di questa ricerca è l'implementazione di una rete neurale artificiale per automatizzare la gestione delle veneziane, con l'intento di trovare un equilibrio tra l'ottimizzazione dei consumi energetici e il mantenimento del comfort visivo.

L'efficacia del metodo di controllo delle veneziane viene valutata attraverso l'analisi del suo impatto sul consumo energetico e il comfort visivo. Per quantificare i benefici ottenibili, vengono condotte simulazioni energetiche per tre diverse città, ovvero Roma, Marrakech e Friburgo. Nel contesto specifico di Roma, il consumo medio annuo di energia per il riscaldamento per unità di superficie è di circa 18 kWh/m<sup>2</sup>, mentre per il raffreddamento si attesta a 11 kWh/m<sup>2</sup>. Inoltre, il consumo medio annuo di energia per l'illuminazione ammonta a circa 10 kWh/m<sup>2</sup>. Il sistema di controllo funziona in modo soddisfacente, portando a una riduzione del consumo per riscaldamento del 22,5% e del consumo di raffreddamento del 24,1% rispetto alla media dei consumi attuali. Le condizioni di comfort visivo migliorano del 12,6%, con un lieve aumento del consumo di elettricità per l'illuminazione.

### 3.4 Sistema *free-cooling*

Il *free-cooling* è un metodo per accumulare energia dall'aria esterna durante la notte, al fine di fornire il raffreddamento interno durante le ore più calde nei giorni d'estate. In linea di principio, il *free-cooling* è utilizzato per mantenere la temperatura interna nell'intervallo di comfort nei mesi estivi, se le proprietà termofisiche dei materiali dell'involucro edilizio sono studiate per accumulare calore.

Lo studio di Dovrtel et al. [21] analizza l'ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi di *free-cooling* negli edifici mediante l'utilizzo di una funzione ad obiettivi multipli. L'ottimizzazione è stata articolata in due fasi: innanzitutto, è stato stimato il consumo energetico e il potenziale di raffreddamento gratuito disponibile utilizzando le previsioni meteorologiche; in secondo luogo, è stato ottimizzato il regime di funzionamento del sistema di *free-cooling* per soddisfare il consumo energetico richiesto con l'ausilio della rete di distribuzione dell'aria. Sulla base dei risultati della ricerca, emerge che il controllo del sistema di raffreddamento gratuito

influisce in modo significativo sulla domanda di energia per il raffreddamento degli edifici. Inoltre, il *free-cooling* influenza il criterio di progettazione dell'edificio, per questo motivo è necessaria una pianificazione attenta dei criteri decisionali da prendere in considerazione.

La sfida principale del raffreddamento notturno risiede nella capacità di accumulo, che non può essere realizzata mediante i metodi convenzionali, a causa della bassa entalpia dell'aria. Negli ultimi anni, una soluzione che ha guadagnato popolarità è l'impiego di materiali a cambiamento di fase (PCM), i quali accumulano il calore durante le ore diurne e lo rilasciano durante la notte.

Lo studio di Kamali [22] esamina le indagini condotte da vari ricercatori in questo campo. Si sono analizzati brevemente i PCM, la loro idoneità climatica, l'analisi di fattibilità e i fattori che influenzano la carica e la scarica di tali materiali. Il costo iniziale di un sistema *free-cooling* basato su PCM viene stimato essere circa il 10% superiore rispetto a un'unità di condizionamento d'aria convenzionale di uguale capacità. In questo contesto, la selezione del materiale è guidata da requisiti specifici di temperatura di transizione di fase. Quando si prevede l'impiego in apparecchi di raffreddamento tipicamente utilizzati in ambito residenziale, il materiale dovrebbe avere una temperatura di transizione di fase compresa tra 5°C e 8°C, consentendo così il suo caricamento e scarico da parte di comuni *chiller* residenziali. D'altra parte, quando il PCM è integrato nell'involucro edilizio, è fondamentale allineare la scelta del materiale con le condizioni termiche interne desiderate. Di conseguenza, il PCM selezionato dovrebbe presentare una temperatura di transizione di fase situata nell'intervallo compreso tra 20°C e 28°C. Questo garantisce il mantenimento di un comfort abitativo ottimale all'interno dell'edificio. È importante notare che l'utilizzo dei PCM comporta una riduzione del consumo di elettricità, portando così a una diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> di quasi il 9% rispetto a un sistema di ventilazione ordinario.

In conclusione, l'ottimizzazione dei consumi energetici negli edifici è una sfida fondamentale per affrontare le crescenti preoccupazioni legate al cambiamento climatico e alla sostenibilità ambientale. Nel corso di questo capitolo, abbiamo esaminato diverse metodologie non invasive che possono contribuire in modo significativo a ridurre i consumi energetici degli edifici, riducendo al contempo le emissioni di gas a effetto serra. Queste metodologie offrono il vantaggio di essere economicamente convenienti e richiedono solo modifiche lievi o addirittura nessuna modifica strutturale ai sistemi esistenti.

Abbiamo iniziato esplorando il ruolo cruciale degli occupanti degli edifici nel determinare i consumi energetici. Gli studi hanno dimostrato che istruire gli occupanti e coinvolgerli attivamente nella gestione dei consumi può portare a risparmi significativi di energia, spaziando dal 9,5% al 21%. L'educazione degli occupanti e la loro sensibilizzazione ai comportamenti energetici responsabili possono quindi svolgere un ruolo cruciale nella riduzione dei consumi.

Successivamente, abbiamo esaminato la regolazione avanzata dei sistemi di raffreddamento e riscaldamento attraverso l'uso di algoritmi di controllo predittivo. Questa tecnologia si è dimostrata altamente efficace nel ridurre i consumi energetici degli edifici, consentendo risparmi che possono variare dal 10% al 50%, mantenendo al contempo un adeguato comfort termico. Questi risultati dimostrano l'importanza di adottare approcci innovativi nella gestione degli impianti termici degli edifici.

Un'altra strategia chiave per la riduzione dei consumi energetici negli edifici riguarda la gestione degli apporti solari. Attraverso l'utilizzo di pellicole solari,

tendaggi esterni ed interni, e altre soluzioni, è possibile limitare il surriscaldamento estivo e le dispersioni di calore invernali attraverso le superfici vetrate. Queste soluzioni possono contribuire a una significativa riduzione della domanda di energia per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici.

Infine, abbiamo esaminato il concetto di *free-cooling*, che sfrutta l'accumulo di energia dall'aria esterna durante la notte per raffreddare gli edifici durante le giornate calde estive. Questa tecnica, unita all'uso di materiali a cambiamento di fase, può ridurre la richiesta energetica per il raffreddamento e contribuire a una maggiore sostenibilità degli edifici.

In sintesi, l'ottimizzazione dei consumi energetici negli edifici richiede una combinazione di approcci innovativi, inclusi comportamenti degli occupanti responsabili, regolazione avanzata degli impianti, gestione degli apporti solari e l'uso di tecniche come il *free-cooling*. Queste strategie non invasive offrono un notevole potenziale per ridurre l'impatto ambientale degli edifici e migliorare la loro efficienza energetica, contribuendo così alla creazione di ambienti edificati più sostenibili e rispettosi dell'ambiente.

# Capitolo 4

## Simulazione dinamica del caso studio: Centro Polifunzionale Lingotto

Nel quarto capitolo, ci concentreremo sulla fase cruciale di acquisizione dei dati effettivi dell'edificio, esaminando le sfide e le complessità incontrate in questo processo. Successivamente, sfrutteremo questi dati per sviluppare un modello completo dell'edificio, comprendente sia l'aspetto geometrico che quello energetico. Approfondiremo la procedura adottata per la creazione di questo modello e forniremo una panoramica sintetica del funzionamento del *software IES VE 2022 vers.118*, sviluppato dalla società *Integrated Environmental Solutions Ltd, Glasgow, UK*. Infine, metteremo in atto una fase cruciale: la calibrazione del modello dinamico, utilizzando i consumi effettivi registrati nel corso degli anni 2021 e 2022. Questo processo consentirà di raffinare ulteriormente il modello e renderlo più simile alla realtà.

### 4.1 Sintesi storica dell'edificio

Il Lingotto, progettato dall'ingegnere Giacomo Matté Trucco per la Fiat, rappresenta un notevole esempio di architettura moderna in Italia. La sua struttura in cemento armato, con pilastri disposti su una griglia di 6x6 metri, rampe a spirale sulle estremità dell'edificio e una pista di prova per automobili sul tetto, è stata un punto di riferimento nella storia dell'architettura.



Figura 14 - Stabilimento industriale Fiat ubicato a Torino [26]

La progettazione del Lingotto ha avuto inizio nel 1915, con la costruzione dell'Officina di Smistamento nella parte sud dell'area. Successivamente sono state realizzate le Nuove Officine, un edificio principale su cinque piani con ampi spazi interni illuminati da grandi vetrate. Nel 1919, è stata costruita la celebre pista di prova, lunga circa un chilometro e mezzo, progettata per testare contemporaneamente 50 automobili. Le vetture raggiungevano la pista attraverso una rampa a spirale settentrionale, completata nel 1926. Successivamente, è stata aggiunta una rampa meridionale, integrata nell'edificio che collega le Nuove Officine all'Officina di Smistamento.



Figura 15 - Bombardamenti avvenuti durante la Seconda guerra mondiale [25]

Durante la Seconda Guerra Mondiale, lo stabilimento fu bombardato ripetutamente, ma continuò a funzionare. Dopo la guerra, divenne un centro di attività antifasciste e partigiane. Nel 1982, la Fiat decise di chiudere lo stabilimento, che venne successivamente riconvertito in un complesso polifunzionale, ospitando un centro commerciale, un cinema, uno spazio espositivo e altro, mentre la Palazzina degli Uffici è tornata a essere la sede direzionale della Fiat, dopo essere stata restaurata dall'architetto Renzo Piano.



Figura 16 - La ricostruzione dello stabilimento e l'obiettivo raggiunto tramite tale processo [25][26]

## 4.2 Costruzione del modello

Il *software* utilizzato per la modellazione del Lingotto è *IES VE 2022 vers.118*, sviluppato dalla società *Integrated Environmental Solutions Ltd, Glasgow, UK*; il *software* è un potente insieme di strumenti informatici specificamente sviluppati per l'analisi energetica avanzata degli edifici. Questi strumenti forniscono agli ingegneri e agli esperti del settore una vasta gamma di moduli e funzionalità progettati per eseguire analisi dettagliate e simulazioni dinamiche complesse volte

a migliorare l'efficienza energetica, la sostenibilità e le prestazioni termiche degli edifici.

Tra le funzionalità principali di *IES VE* vi sono:

1. **Analisi Energetiche:** Il *software* consente di condurre approfondite analisi energetiche degli edifici, calcolando il consumo energetico previsto per il riscaldamento, il raffreddamento, l'illuminazione e altri sistemi. Ciò permette di valutare il grado di efficienza energetica di un edificio e di identificare opportunità per il risparmio energetico;
2. **Simulazioni dinamiche:** *IES VE* offre la possibilità di effettuare simulazioni termiche dettagliate per valutare come la temperatura all'interno di un edificio varia nel corso delle stagioni e in risposta a diverse condizioni meteorologiche. Queste simulazioni sono fondamentali per progettare sistemi HVAC efficaci;
3. **Qualità dell'Aria Interna:** il *software* consente di valutare la qualità dell'aria interna di un edificio, tenendo conto di parametri come la ventilazione, l'umidità e la presenza di inquinanti. Queste analisi sono importanti per garantire ambienti interni sani e confortevoli;
4. **Illuminazione:** *IES VE* permette di simulare e ottimizzare l'illuminazione degli spazi interni ed esterni degli edifici. Ciò contribuisce a ridurre il consumo energetico e a migliorare il comfort visivo;
5. **Sostenibilità:** il *software* supporta la valutazione della sostenibilità degli edifici, tenendo conto di aspetti come la certificazione LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e il rispetto degli standard di sostenibilità;
6. **Normative:** *IES VE* è in grado di verificare la conformità di un progetto alle normative energetiche locali e nazionali, aiutando gli ingegneri a garantire che gli edifici siano in linea con le leggi vigenti.

In sintesi, il *software IES VE* rappresenta uno strumento fondamentale per gli ingegneri e i professionisti del settore, poiché consente loro di effettuare analisi approfondite e simulazioni dettagliate per progettare edifici più efficienti dal punto di vista energetico, sostenibili e conformi alle normative vigenti.

La costruzione del modello è stata effettuata utilizzando la seguente scaletta:

1. **Raccolta dati:** la raccolta dei dati rappresenta un'operazione di fondamentale importanza per l'analisi dello stato attuale dell'edificio. Tuttavia, per quanto riguarda lo specifico edificio in questione, è stato impossibile acquisire tutti i dati direttamente sul campo. Questa limitazione è dovuta al fatto che, in osservanza alle norme di riservatezza, non ci è stato concesso l'accesso ai locali tecnici di proprietà altrui. Di fronte a questa impossibilità di ottenere dati diretti, si è eseguita una procedura alternativa. Inizialmente, si sono esaminati i progetti originali relativi alla prima ristrutturazione dell'edificio. In seguito, si è valutato se vi sono stati lavori di restauro eseguiti negli ultimi anni che potrebbero aver influito sull'impiantistica. Qualora non fosse disponibile alcuna informazione da tali fonti, ci siamo basati su dati provenienti da zone simili con destinazione d'uso analoga all'interno della struttura. I dati in questione (portate d'aria, potenze dei terminali) sono stati normalizzati in base al volume.



Questo approccio ci ha consentito di avanzare delle ipotesi ragionevoli in assenza di dati diretti, garantendo comunque un'analisi accurata dello stato dell'edificio in conformità con le restrizioni di accesso imposte dalla riservatezza;

2. **Modello geometrico:** il modello geometrico è stato sviluppato utilizzando le planimetrie presenti nei progetti dell'edificio. Considerando le dimensioni considerevoli dell'edificio, abbiamo scelto di non includere i divisori interni nel modello, poiché essi non hanno rilevanza per la modellazione energetica, dato che appartengono alla stessa zona termica. Pertanto, sin dalla creazione del modello geometrico, abbiamo stabilito i confini delle stanze in base alle condizioni termiche delle diverse aree, ai terminali e alla destinazione d'uso;
3. **Elaborazione delle schedules:** le schedules sono state elaborate in base alle possibili occupazioni degli spazi. Come precedentemente accennato, a causa dell'accordo di riservatezza, non siamo stati in grado di ottenere dati certi. Tuttavia, abbiamo utilizzato le normative come punto di partenza per ottenere delle stime approssimative, le quali saranno ulteriormente affinate attraverso il processo di calibrazione;
4. **Analisi dei risultati:** I risultati della simulazione sono stati suddivisi in base ai consumi effettivi dei contatori, al fine di condurre una calibrazione sia a livello di zona che complessivo.

In sintesi, seguendo questa metodologia, abbiamo affrontato con successo le sfide legate alla raccolta dati e alle restrizioni di accesso. Il modello geometrico è stato ottimizzato per la modellazione energetica, escludendo i divisori interni non rilevanti dal punto di vista termico. Le schedules sono state stimate secondo le normative e saranno ulteriormente perfezionate tramite calibrazione. Grazie all'analisi dei consumi effettivi dei contatori, siamo stati in grado di condurre una calibrazione precisa, permettendoci di valutare accuratamente lo stato energetico complessivo dell'edificio.

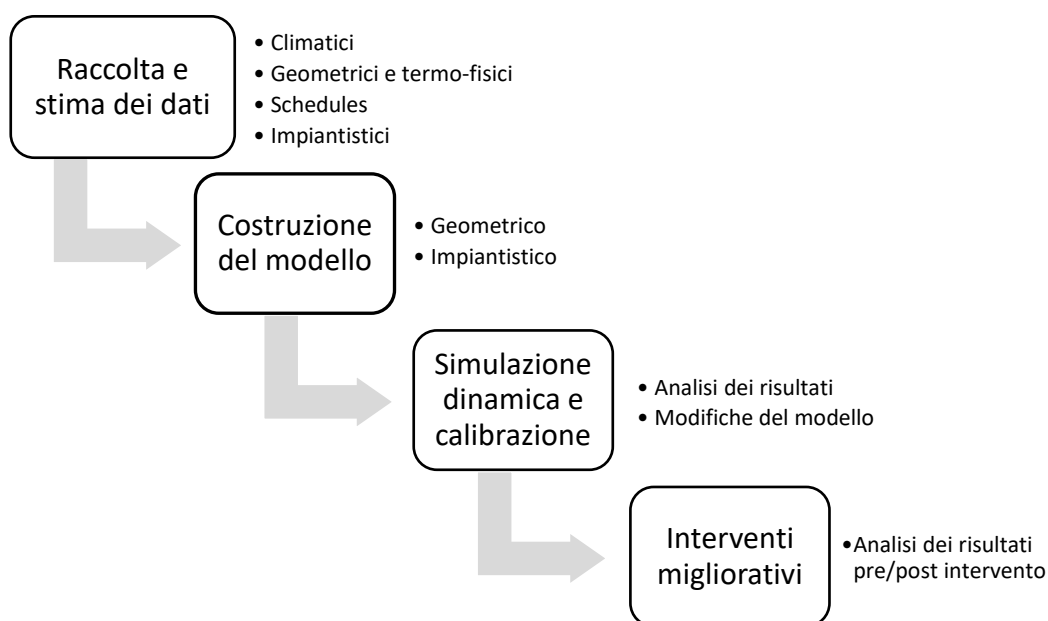


Figura 17 - Schema di avanzamento per la costruzione del modello energetico

Nei paragrafi a seguire, ci immergeremo in ciascun aspetto delineato nello schema illustrato nella Figura 17, mettendo in evidenza le sfide e i problemi che abbiamo incontrato e presentando le soluzioni corrispondenti. Questo approccio ci consentirà di esaminare in modo dettagliato ciascun elemento della modellazione energetica.

## 4.3 Raccolta e stima dei dati

In questa sezione, procederemo a una disamina approfondita delle fasi coinvolte nella raccolta dati, esponendo con precisione il processo di acquisizione di informazioni da rilievo sul campo, la consultazione dei documenti di progetto e le strategie impiegate per stimare i dati mancanti. La nostra attenzione si concentrerà anche sulle metodologie adottate per affrontare le sfide relative alla mancanza di dati certi, fornendo così una visione esaustiva delle soluzioni applicate per colmare queste lacune informative.

### 4.3.1 Dati climatici di Torino

Il centro polifunzionale Lingotto è localizzato nella parte meridionale di Torino, nel quartiere Lingotto. Di seguito, verranno elencati i dati climatici di riferimento per la città:

- Zona climatica: E;
- Gradi Giorno (GG): 2617;
- Temperatura invernale esterna di progetto: -8°C;
- Periodo di riscaldamento: 15 ottobre – 15 aprile per 14 ore [32].

I dati utilizzati si basano sulle normative UNI 10349 [28][29][30] e UNI 5364 [31]. Queste informazioni sono state integrate nel *software* di modellazione *Edilclima*, che ci ha consentito di calcolare i carichi termici ideali per l'edificio.



Figura 18 - Vista aerea dell'edificio del caso studio [33]

Nel *software* di simulazione dinamica, sarà utilizzato il file climatico proveniente dalla stazione meteorologica situata presso l'aeroporto di Caselle (TO). Per rendere più accurata la simulazione, abbiamo scelto di utilizzare le letture effettive di temperatura esterna e umidità relativa rilevate tramite le sonde poste all'esterno dell'edificio. Per la fase di calibrazione del modello, mediante il l'uso del *tool APLocate*, ci baseremo su dati climatici reali raccolti nel corso del 2022.

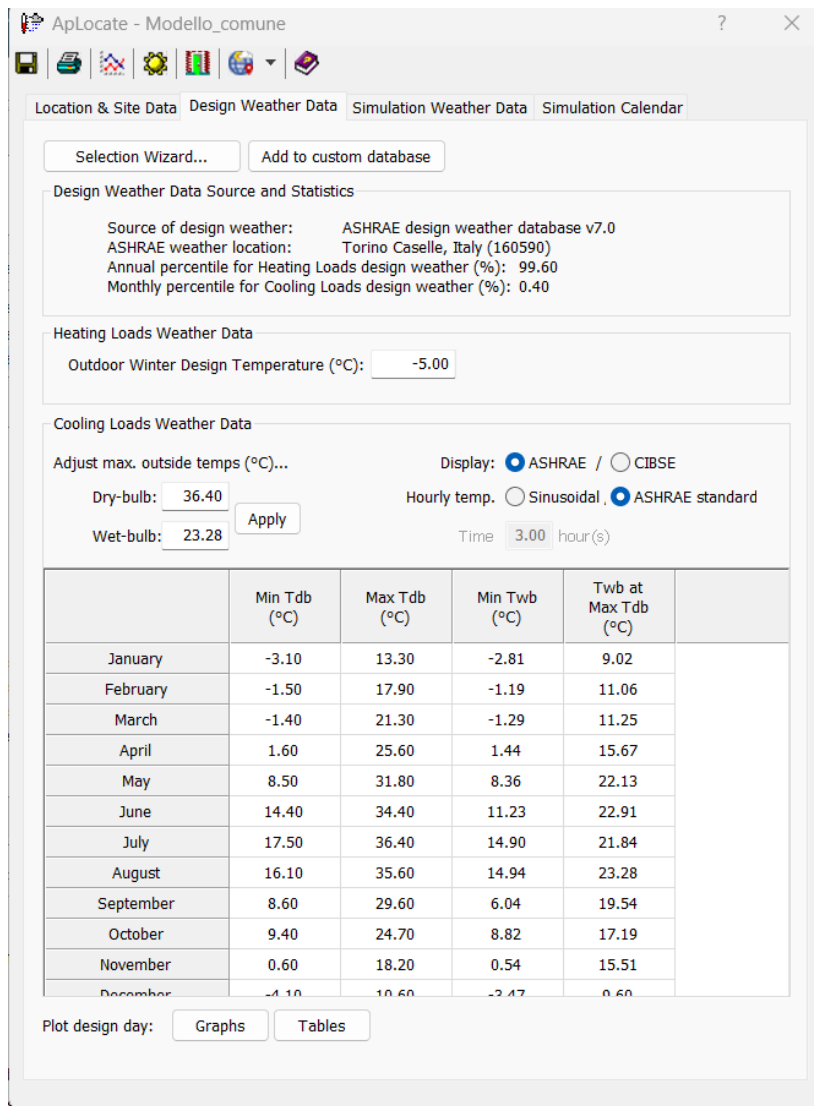


Figura 19 - Tool per l'acquisizione delle temperature esterne effettive nel 2022, ApLocate

Una volta completata la calibrazione, il modello verrà simulato con dati climatici relativi al 2021. Questo passaggio ci permetterà di convalidare l'accuratezza del modello in termini di previsione rispetto a quanto effettivamente avvenuto durante l'anno di riferimento.

Anno	2021				2022			
	T <sub>db_max</sub> [°C]	T <sub>db_min</sub> [°C]	T <sub>wb_min</sub> [°C]	T <sub>wb_max</sub> [°C]	T <sub>db_max</sub> [°C]	T <sub>db_min</sub> [°C]	T <sub>wb_min</sub> [°C]	T <sub>wb_max</sub> [°C]
Gennaio	13.60	-5.20	-4.02	9.22	13.30	-3.10	-2.81	9.02
Febbraio	20.00	-4.10	-3.44	12.60	17.90	-1.50	-1.19	11.06
Marzo	23.90	0.70	0.65	15.34	21.30	-1.40	-1.29	11.25
Aprile	25.30	0.10	0.07	15.94	25.60	1.60	1.44	15.67
Maggio	26.20	6.90	5.66	18.39	31.80	8.50	8.36	22.13
Giugno	33.40	12.40	11.31	21.84	34.40	14.40	11.23	22.91
Luglio	33.40	14.50	12.72	21.44	36.40	17.50	14.90	21.84
Agosto	34.20	14.00	14.14	26.06	35.60	16.10	14.94	23.28
Settembre	29.70	11.40	10.64	20.31	29.60	8.60	6.04	19.54
Ottobre	21.60	5.70	5.42	17.50	24.70	9.40	8.82	17.19
Novembre	15.60	-2.10	-0.89	14.23	18.20	0.60	0.54	15.51
Dicembre	10.20	-2.60	-2.43	8.94	10.60	-4.10	-3.47	9.60

Tabella 2 - Temperature di bulbo secco ed umido misurate dalla sonda di temperatura esterna all'edificio

Questo approccio, basato su dati climatici reali, ci consentirà di ottenere una simulazione il più possibile fedele alla realtà, contribuendo così alla validità e all'affidabilità delle nostre analisi.

### 4.3.2 Dati e modellazione geometrica

Nella costruzione del modello abbiamo impiegato un applicativo, noto come *ModelIT*, che ci ha permesso di creare il modello geometrico direttamente all'interno del *software IES VE*. Questo applicativo ci ha offerto la possibilità di realizzare il disegno su un piano bidimensionale, consentendoci di specificare l'altezza netta dell'edificio ogni qualvolta che veniva creata uno *space*.

Nel processo di costruzione del modello, abbiamo scelto di limitare le semplificazioni al minimo indispensabile. Questa scelta è stata influenzata dalla natura strutturale dell'edificio, che, nonostante la sua datazione, presenta una geometria prevalentemente ortogonale. Questo aspetto è intrinseco alla sua origine come stabilimento industriale, il quale, a differenza degli edifici adibiti a scopi terziari, non ha seguito gli stessi canoni architettonici in termini di design e conformazione.

La struttura è organizzata in quattro cortili e tre torri (Sud, Centrale e Nord), ma può anche essere suddivisa in base alla fase di ricostruzione dopo il cambiamento di destinazione d'uso, che definisce le zone come Fase 1, Fase 2 e Fase 3. Il piano interrato è utilizzato per scopi tecnici e per le operazioni di carico e scarico merci. Il numero di piani varia a seconda della divisione per fasi ed è il seguente:

- Fase 1: due piani fuori terra;
- Fase 2: cinque piani fuori terra;
- Fase 3: sei piani fuori terra.

Un elemento significativo da notare è il considerevole dislivello dell'edificio, che si estende per oltre 800 metri da sud a nord, con una variazione di circa 2 metri in altezza. Questa differenza di livello è compensata dalla riduzione dell'altezza netta del piano terra, che passa da 8,05 metri a 6,05 metri. Per risolvere questa sfida a livello *software*, abbiamo adottato una soluzione nella zona di fase 3, dove si verifica questo significativo dislivello. Qui, abbiamo inserito un piano di 2 metri di altezza, partendo da quota 0 metri. A questo piano, abbiamo assegnato delle caratteristiche termofisiche molto dense e massicce, in modo che il *software* lo trattasse come una sorta di strato terrestre.

In considerazione dell'elevata ridondanza strutturale dell'edificio, abbiamo deliberato di semplificare la presentazione utilizzando una sola planimetria, precisamente la Figura 20, che ritrae la configurazione del secondo piano a quota +13,05 metri. Questa scelta è stata motivata dalla similarità della struttura a livelli superiori e dalla volontà di fornire un'immagine rappresentativa e focalizzata delle caratteristiche architettoniche.

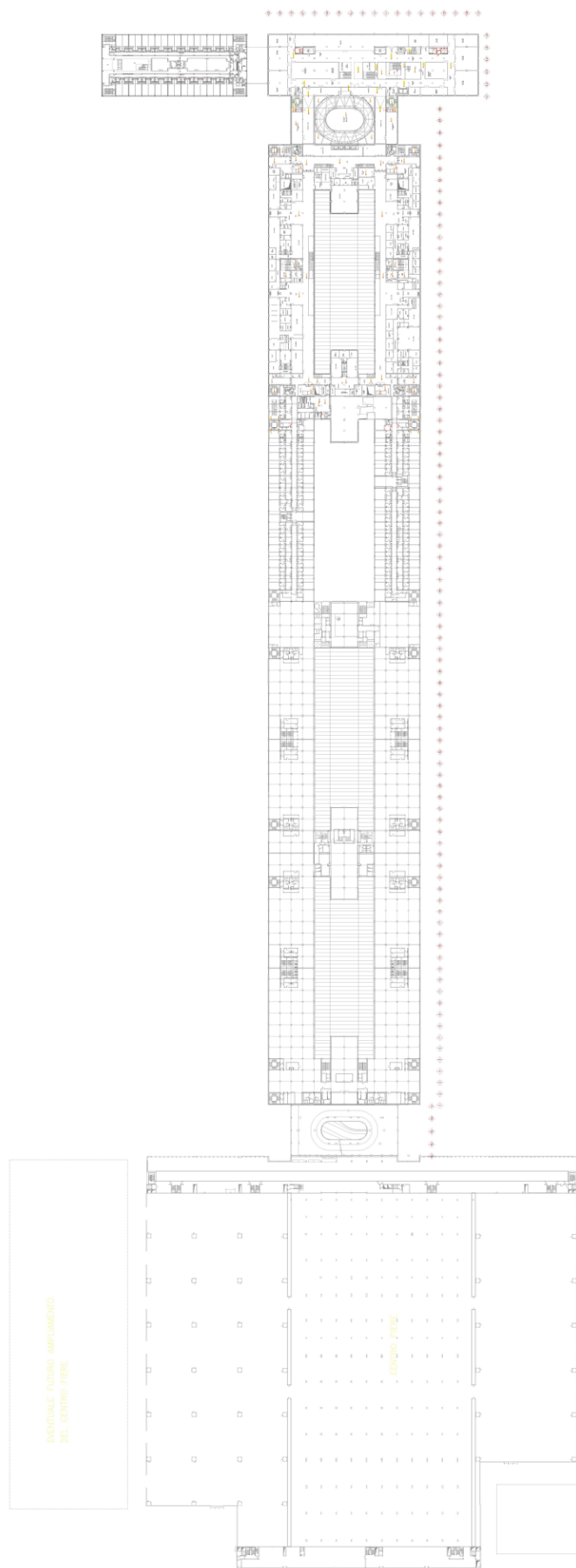


Figura 20 - Planimetria a quota +13.05 dell'edificio analizzato

Tuttavia, per offrire una visione completa delle dimensioni e dell'impiego degli spazi, proseguiamo con la presentazione di due tabelle dettagliate. La prima (Tab.3) riassume le dimensioni totali dell'edificio, mentre la seconda (Tab.4) elenca le destinazioni d'uso specifiche per ciascun piano.

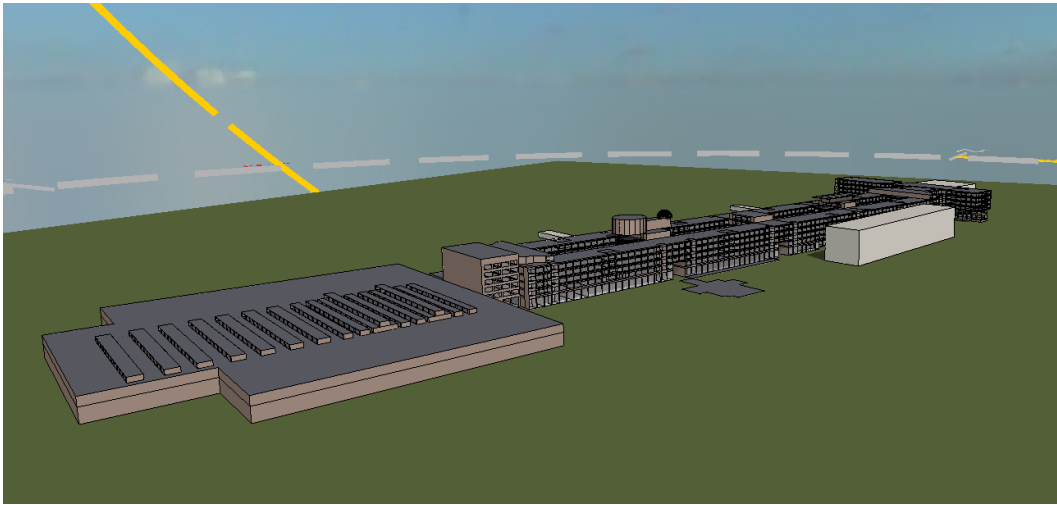
Volume totale [m <sup>3</sup> ]	2158254.797
Superficie totale calpestabile [m <sup>2</sup> ]	337338.994
Superficie totale disperdente [m <sup>2</sup> ]	106259.076
Superficie totale vetrata [m <sup>2</sup> ]	55529.021
Fattore di forma totale S/V [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.156

Tabella 3 - Volumi e superficie totali del modello costruito

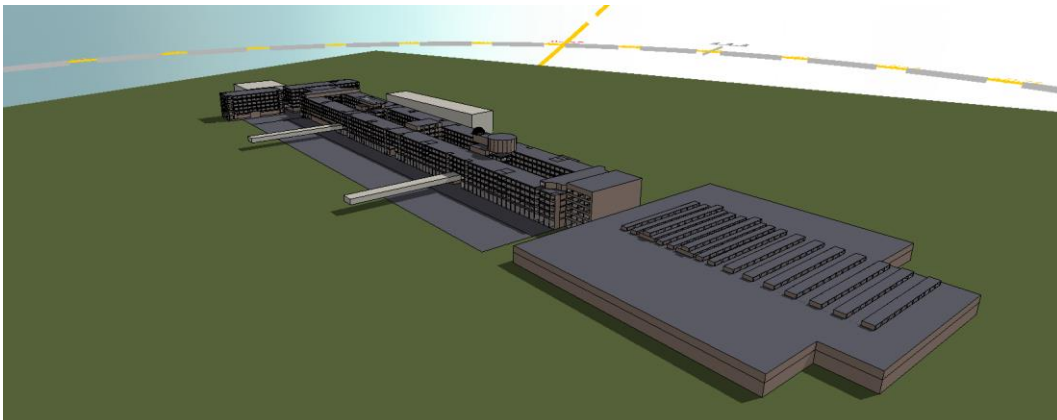
Destinazione d'uso	Volume [m <sup>3</sup> ]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Superficie disperdente [m <sup>2</sup> ]	Superficie vetrata [m <sup>2</sup> ]	Fattore di forma S/V [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
P0-Centro congressi	68932.22	9847.46	2706.20	1408.91	0.143
P0-Centro fieristico	614427.48	45077.19	19862.19	7677.50	0.073
P0-Cinema	56189.77	8027.11	2775.50	312.78	0.143
P0-Galleria	108154.31	16550.16	4084.90	4084.90	0.153
P0-Struttura alberghiera 1	14591.05	2084.44	1565.90	1121.04	0.143
P0-Struttura alberghiera 2	17156.32	2369.47	1834.10	1278.76	0.138
P0-Uffici	15495.06	2213.58	1455.30	1121.04	0.143
P0-Università	4260.55	730.43	712.30	456.23	0.171
P1-Galleria	167438.89	38272.97	6845.16	11596.56	0.229
P1-Università	4283.96	1019.99	391.44	220.48	0.238
P2-Clinica	34190.32	8547.58	2364.00	1614.08	0.250
P2-Galleria d'arte	2075.88	518.97	155.60	110.08	0.250
P2-Struttura alberghiera 1	19255.70	4813.93	1559.20	1107.84	0.250
P2-Struttura alberghiera 2	9064.68	2266.17	652.80	449.28	0.250
P2-Torre CENTRALE	5037.14	1259.29	294.40	173.12	0.250
P2-Torre SUD	4171.20	1042.80	393.60	243.20	0.250
P2-Uffici	48663.54	12165.89	3590.40	2493.76	0.250
P2-Università	12541.68	3135.42	875.60	604.80	0.250
P3-Clinica	34190.32	8547.58	2364.00	1614.08	0.250
P3-Galleria d'arte	2075.88	518.97	155.60	110.08	0.250
P3-Struttura alberghiera 1	19255.70	4813.93	1559.20	1107.84	0.250
P3-Struttura alberghiera 2	9064.68	2266.17	652.80	449.28	0.250
P3-Torre CENTRALE	5037.14	1259.29	294.40	173.12	0.250
P3-Torre SUD	4171.20	1042.80	393.60	243.20	0.250
P3-Uffici	48662.34	12165.59	3590.40	2459.20	0.250
P3-Università	12541.68	3135.42	875.60	604.80	0.250
P4-Galleria d'arte	4685.08	1064.79	281.16	179.20	0.227
P4-Struttura alberghiera 1	14630.40	3325.09	1112.76	715.84	0.227
P4-Struttura alberghiera 2	9971.15	2266.17	718.08	449.28	0.227
P4-Struttura alberghiera 3	36879.74	8381.76	2600.40	1614.08	0.227
P4-Torre CENTRALE	8071.23	1834.37	429.88	241.28	0.227
P4-Torre SUD	4588.32	1042.80	432.96	243.20	0.227
P4-Uffici	50999.52	11590.80	3843.40	2425.60	0.227
P4-Università	13795.85	3135.42	963.16	604.80	0.227
P5-Copertura NR	17840.25	3568.05	1665.99	276.48	0.200
P5-Eliporto	3872.00	774.40	562.00	46.08	0.200
P5-Galleria d'arte	2941.50	588.30	503.00	128.00	0.200
P5-Ristorante	3843.95	768.79	560.00	128.00	0.200
P5-Struttura alberghiera 2	9064.68	2266.17	652.80	449.28	0.250
P5-Uffici f3	12541.68	3135.42	919.60	604.80	0.250
P6-Eliporto	1750.44	218.81	559.27	0.00	0.125
P6-Galleria d'arte	1948.54	389.71	472.80	0.00	0.200
P6-Sala riunioni	491.19	119.99	91.81	234.80	0.244
PS	480935.81	92860.32	15029.70	0.00	0.193
PS - Auditorium	14126.70	2018.10	1618.40	0.00	0.143
Rampa NORD	20596.86	810.90	0.00	0.00	0.039
Rampa SUD	55946.44	1536.99	3533.76	840.67	0.027
Scale	47804.81	1949.30	7703.94	3511.66	0.041

Tabella 4 – Volumi e superfici suddivise per piano e per destinazione d'uso

Queste tabelle sintetizzano le dimensioni complessive dell'edificio e forniscono una panoramica dettagliata delle destinazioni d'uso e delle caratteristiche di ciascun piano. Ciò ci aiuterà a comprendere meglio la struttura e le sue specifiche caratteristiche in termini di volumi, superfici calpestabili, superfici disperdenti verso l'esterno e superfici vetrate.



**Figura 21 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista SUD**



**Figura 22 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista OVEST**



**Figura 23 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista EST**



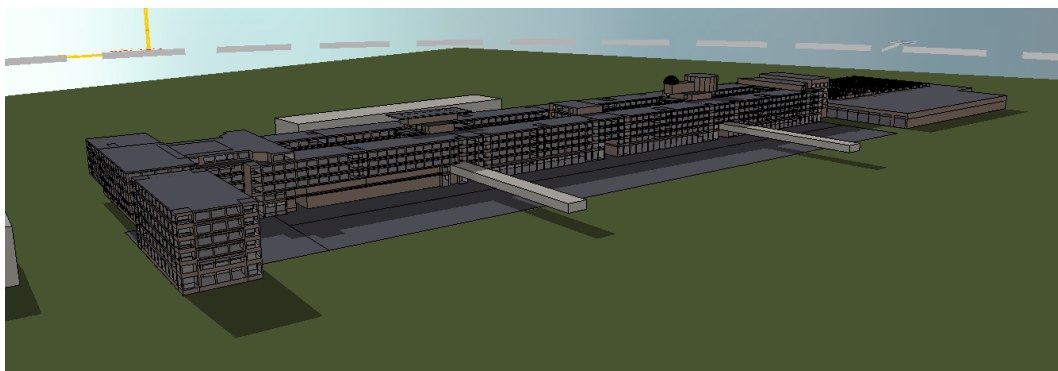


Figura 24 - Modello geometrico dell'edificio analizzato, vista NORD

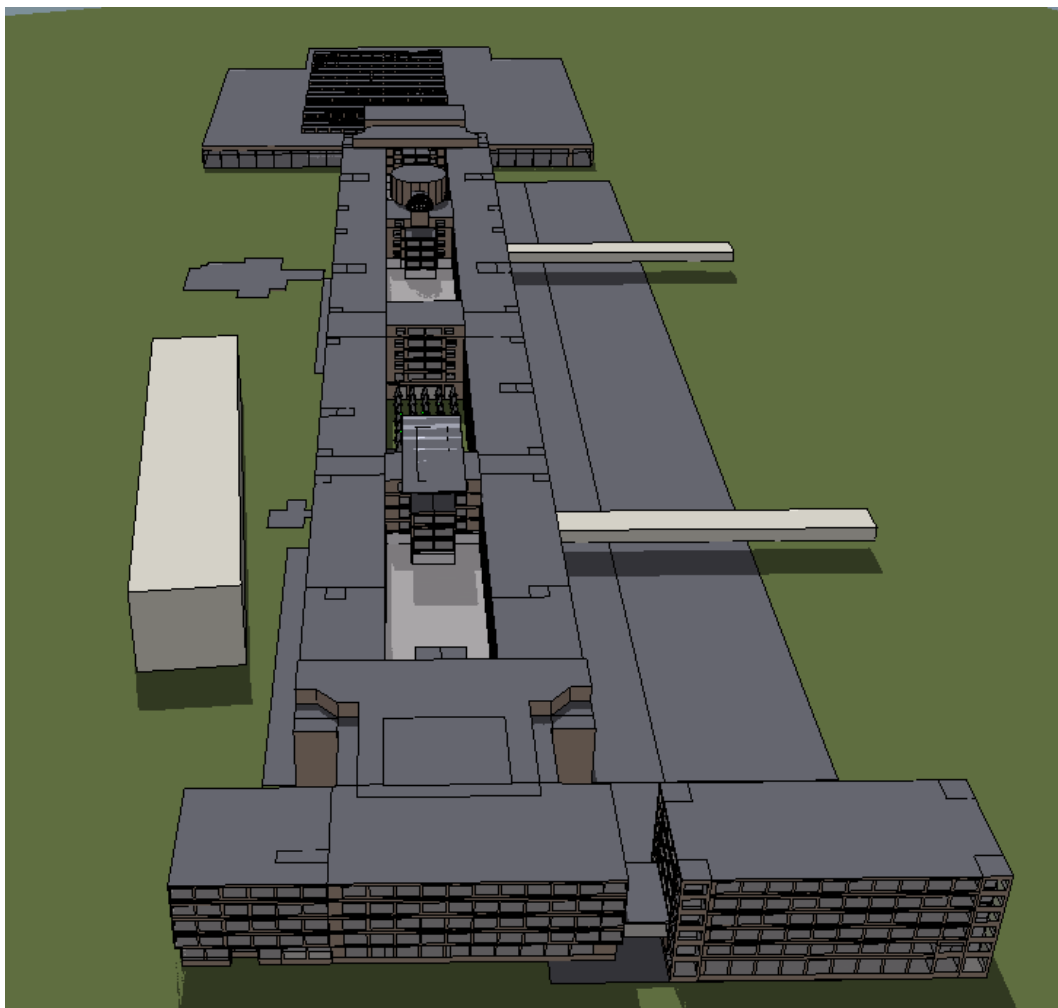


Figura 25 - Modello geometrico dell'edificio analizzato

In sintesi, nel processo di costruzione del modello, abbiamo utilizzato l'applicativo *ModelIT* all'interno del software *IES VE* per creare una rappresentazione dettagliata dell'edificio. Nonostante la sua datazione, l'edificio è caratterizzato da una disposizione prevalentemente ortogonale a causa della sua origine come stabilimento industriale. L'edificio è suddiviso in quattro cortili e tre torri, con variazioni di altezza significative affrontate tramite l'aggiunta di uno strato in una delle fasi di ricostruzione. Abbiamo semplificato la presentazione utilizzando una singola planimetria del secondo piano, ma fornendo tabelle dettagliate per le dimensioni totali dell'edificio e le destinazioni d'uso per ciascun piano, al fine di

analizzare in modo approfondito le caratteristiche termiche ed energetiche. Il risultato dello sviluppo del modello geometrico è mostrato nelle figure da 21 a 25.

### 4.3.3 Dati termo-fisici dell'involucro opaco e trasparente

Dal punto di vista termo-fisico, l'edificio appare estremamente omogeneo. La sua struttura è di tipo intelaiato, con pilastri in cemento armato posizionati ogni sei metri sia in lunghezza che in larghezza. I muri di tamponamento sono realizzati utilizzando blocchi in laterizio pieno, senza l'aggiunta di isolamento termico o intercapedine d'aria. Per quanto riguarda la soletta di copertura, dell'interpiano e il pavimento a contatto con il terreno, non è stato possibile reperire i dati di progettazione specifici. Di conseguenza, la scelta della stratigrafia è stata basata esclusivamente sull'analisi dei metodi di costruzione utilizzati all'epoca. In generale, nonostante le sue dimensioni imponenti, l'edificio non presenta particolari complessità dal punto di vista termo-fisico. Le pareti interne hanno uno spessore totale di 10 centimetri e sono molto semplici; infatti, sono costituite da uno strato di intonaco, mattone forato e intonato.

Nel caso studio in esame, abbiamo una varietà di pacchetti vetrati con diverse dimensioni e caratteristiche. Dai dati riportati nella Tabella 3, emergono alcune informazioni significative riguardo alla superficie vetrata, che risulta essere estremamente ampia, pari a circa 55.500 metri quadrati. Inoltre, il rapporto tra la superficie vetrata e la superficie opaca disperdente è di 0,523. Questo valore è notevolmente superiore al rapporto minimo richiesto secondo le normative igienico-sanitarie, fissato a 0,125. Questo dato evidenzia che le perdite energetiche attraverso le superfici vetrate avranno un impatto significativo sul bilancio energetico complessivo del sistema. Nei paragrafi successivi, esamineremo dettagliatamente come queste dispersioni attraverso le superfici vetrate influenzino il comportamento energetico complessivo dell'edificio.

Per quanto riguarda i pacchetti vetrati stessi, è importante notare che la maggior parte di essi è costituita da vetri doppi con un'intercapedine d'aria tra di essi, ad eccezione del piano terra, dove sono stati utilizzati vetri antisfondamento a vetro singolo. Va anche menzionato che la stessa tipologia di vetri è stata adottata per le porte esterne, che, essendo anch'esse vetrate, sono state trattate e modellate come finestre nel contesto dell'analisi energetica.

Dal punto di vista del *software*, le informazioni relative alle stratigrafie dell'involucro opaco e trasparente vengono immesse tramite l'utilizzo dell'applicativo denominato *components*, all'interno della sezione dedicata alle *constructions*. Questa sezione è organizzata in base al tipo specifico di componente che si desidera creare, come ad esempio pareti esterne e interne, coperture, pavimenti, interpiani e altre categorie che risultano fondamentali per definire le caratteristiche dell'involucro, sia opaco che trasparente.

Come detto in precedenza le stratigrafie per il caso studio non sono molte essendo abbastanza omogeneo; infatti, le stratigrafie per modellare l'involucro opaco sono:

- Pavimento verso terra ( $U=0,654 \text{ W/m}^2\text{K}$ );
- Soletta interpiano ( $U=0,720 \text{ W/m}^2\text{K}$ );
- Copertura ( $U=0,675 \text{ W/m}^2\text{K}$ );
- Partizioni interne ( $U=0,825 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Per quanto riguarda i serramenti, sono state utilizzate le seguenti:

- Window 1 – P1, P2, P3, P4, P5 ( $U_w=1,958 \text{ W/m}^2\text{K}$ );
- Window 2 – PT ( $U_w=6 \text{ W/m}^2\text{K}$ );
- Window 4 – Lucernaio cortile 1 e 4 ( $U_w=2,645 \text{ W/m}^2\text{K}$ );
- Window 5 – Lucernaio cortile 3 ( $U_w=1,958 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Project Construction (Opaque: Ground/Exposed Floor)

Description: Pavimento verso terra ID: CEIL1 External Internal

Performance: ASHRAE

U-value: 0.8356  $\text{W/m}^2\text{K}$  Thickness: 383.300 mm Thermal mass Cm: 0.2112  $\text{kJ/(m}^2\text{K)}$

Total R-value: 1.0048  $\text{m}^2\text{K/W}$  Mass: 810.6930  $\text{kg/m}^2$  Very lightweight

Surfaces Functional Settings Regulations RadianceIES

Outside Emissivity: 0.900 Resistance ( $\text{m}^2\text{K/W}$ ): 0.0299  Default Solar Absorptance: 0.550

Inside Emissivity: 0.900 Resistance ( $\text{m}^2\text{K/W}$ ): 0.1620  Default Solar Absorptance: 0.550

Construction Layers (Outside To Inside)

Thickness mm	Conductivity $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	Density $\text{kg/m}^3$	Specific Heat Capacity $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$	Resistance $\text{m}^2\text{K/W}$	Vapour Resistivity $\text{GN}\cdot\text{s/(kg}\cdot\text{m)}$	Category
1.5	0.050000	1.000000	2.100000	0.0300	200.000	Carpets
30.0	0.040000	10.000000	1.450000	0.7500	60.000	Insulating Materials
1.5	0.050000	1.000000	2.100000	0.0300	200.000	Brick & Blockwork
0.3	0.260000	1300.000000	1.000000	0.0012	188000.000	Brick & Blockwork
150.0	1.490000	2200.000000	0.880000	0.1007	70.000	Brick & Blockwork
200.0	2.150000	2400.000000	0.880000	0.0930	100.000	Concretes

Copy Paste Cavity Insert Add Delete Flip

Condensation Analysis... Derived Parameters... OK Cancel

Figura 26 - Esempio di stratigrafia orizzontale, pavimento verso terra

Project Construction (Opaque: External Wall)

Description: Parete esterna ID: WALL External Internal

Performance: ASHRAE

U-value: 1.0029  $\text{W/m}^2\text{K}$  Thickness: 420.000 mm Thermal mass Cm: 134.0000  $\text{kJ/(m}^2\text{K)}$

Total R-value: 0.8474  $\text{m}^2\text{K/W}$  Mass: 594.0000  $\text{kg/m}^2$  Lightweight

Surfaces Functional Settings Regulations RadianceIES

Outside Emissivity: 0.900 Resistance ( $\text{m}^2\text{K/W}$ ): 0.0299  Default Solar Absorptance: 0.700

Inside Emissivity: 0.900 Resistance ( $\text{m}^2\text{K/W}$ ): 0.1198  Default Solar Absorptance: 0.550

Construction Layers (Outside To Inside)

Thickness mm	Conductivity $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	Density $\text{kg/m}^3$	Specific Heat Capacity $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$	Resistance $\text{m}^2\text{K/W}$	Vapour Resistivity $\text{GN}\cdot\text{s/(kg}\cdot\text{m)}$	Category
30.0	0.720000	1800.000000	0.840000	0.0417	9.000	Brick & Blockwork
360.0	0.500000	1400.000000	1000.000000	0.7200	35.000	Concretes
30.0	0.350000	1200.000000	1000.000000	0.0857	0.000	Gravels, Beddings, etc.

Copy Paste Cavity Insert Add Delete Flip

Condensation Analysis... Derived Parameters... OK Cancel

Figura 27 - Esempio di stratigrafia verticale, parete esterna

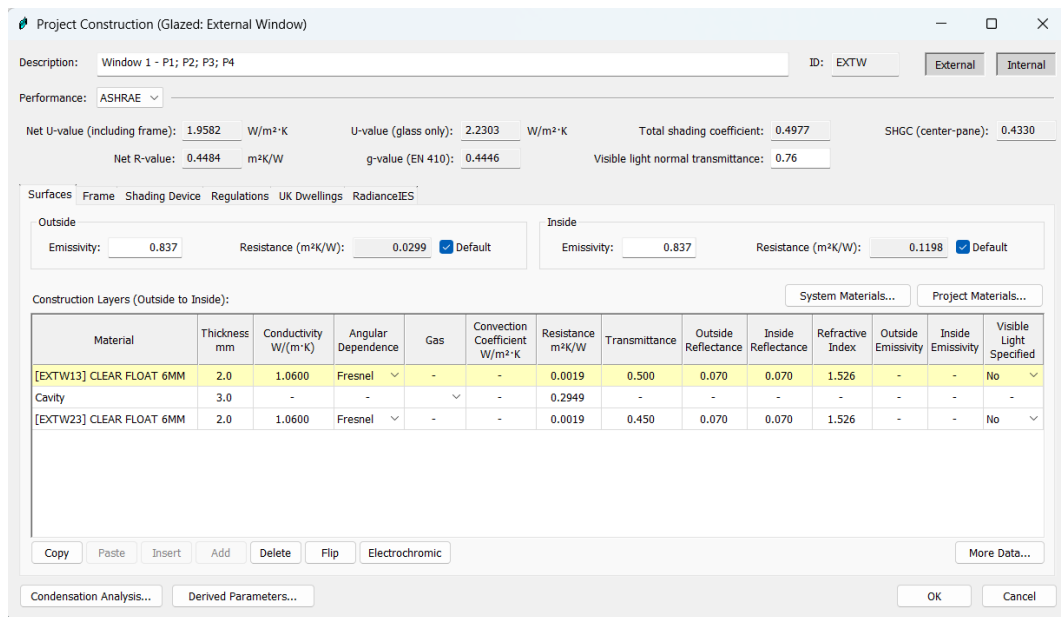


Figura 28 - Esempio di serramento vetrato, Window 1

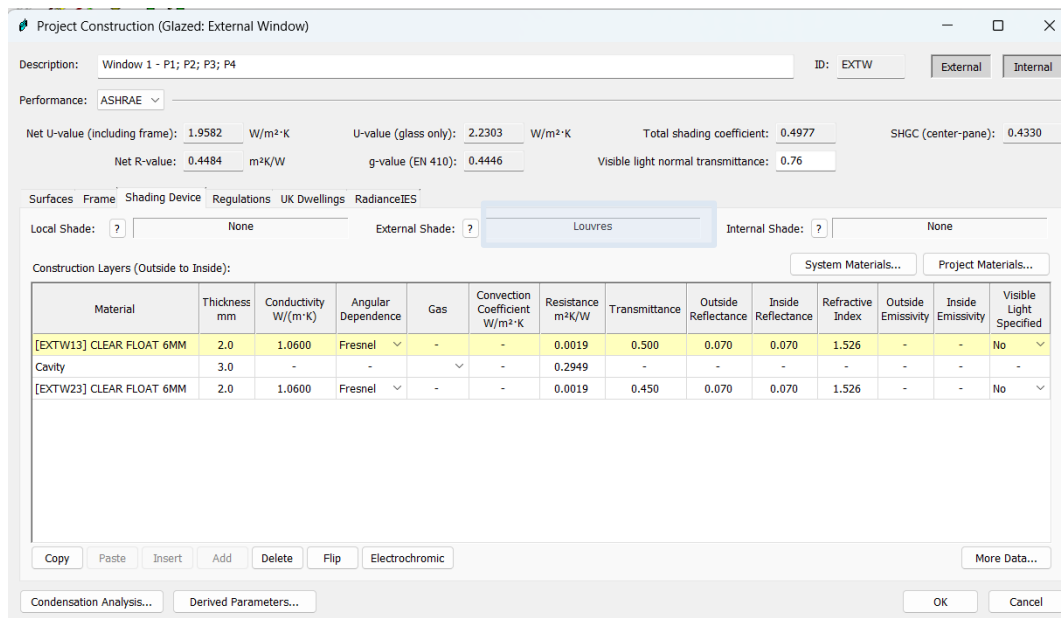


Figura 29 - Esempio di applicazione di tendaggi esterni, riquadro evidenziato

Nel processo di modellazione dei serramenti su *IES VE*, non è stata seguita la struttura reale dell'infisso, ma è stata invece inserita solo la percentuale di telaio utilizzato. Allo stesso modo, per quanto riguarda le dimensioni dei pacchetti vetrati, queste sono state aggiunte durante la fase di creazione del modello geometrico utilizzando l'applicativo *modellIT*.

Dopo aver creato le stratigrafie necessarie per rappresentare tutto l'edificio, è stata eseguita l'assegnazione di queste stratigrafie. Tale operazione è stata eseguita attraverso l'uso di *modellIT*, e suddividendo il modello in base ai piani, è stato più semplice applicare le stratigrafie precedentemente definite all'interno dei *template*. Questo metodo ci ha permesso di risparmiare molto tempo nell'assegnazione dei dati termo-fisici al modello geometrico; un piccolo problema si è verificato per il

piano 1, il quale ha due tipi diversi di serramenti per i pozzi luce; quindi, si è optato per l'assegnazione manuale.

## 4.4 Apporti termici interni

Gli apporti interni sono delle quantità di calore all'interno di un ambiente o di un edificio che provengono da fonti interne, cioè da attività umane, apparecchiature o processi all'interno di quell'ambiente. Questi apporti influenzano significativamente la temperatura e l'umidità all'interno degli spazi, e sono importanti da considerare nella progettazione degli edifici. Gli apporti interni considerati nel nostro edificio derivano dall'occupazione, illuminazione e apparecchiature elettriche.

Nel nostro caso specifico, la maggior parte degli apporti interni è stata valutata attraverso l'uso della normativa UNI/TS 11300-1 [35], in quanto molti dei dati non potevano essere raccolti, siccome non ci è stato concesso accedere ai locali. Questo fattore non influenza la calibrazione perché i consumi elettrici degli apparecchi non sono stati considerati in quanto non siamo a conoscenza dei consumi reali dei privati presenti nella struttura.

Nei prossimi sottoparagrafi prenderemo in esame solo la zona termica UFFICI, in quanto risulterebbe ripetitivo effettuare la descrizione dettagliata della modellazione sul *software* di tutte le zone termiche. A fine paragrafo inseriremo tre tabelle riassuntive per rappresentare tutti i profili di illuminazione, occupazione e delle apparecchiature elettriche.

### 4.4.1 Illuminazione artificiale

L'apporto interno dovuto all'illuminazione artificiale si riferisce al calore generato dalle sorgenti luminose artificiali utilizzate in un ambiente. Nel nostro caso, i consumi elettrici dovuti all'illuminazione non sono stati considerati, tranne per la zona termica GALLERIA, dovuto alla mancanza dei consumi reali delle altre zone termiche. La potenza specifica impostata per l'illuminazione è di  $12 \text{ W/m}^2$ , per tutto l'edificio. È stata inserita questa potenza in modo tale da considerare gli apporti termici dovuti all'illuminazione in tutto l'edificio.

Internal Gains

Type	Gain Reference	Maximum Sensible Gain	Maximum Latent Gain	Occupancy	Max Power Consumption	Radiant Fraction	Meter	Variation Profile	Dimming Profile	Add To Template
General Lighting	[REDACTED]	12.000 W/m <sup>2</sup>	-	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.45	Electricity: ...	Annual_Lighti...	on continuously	
General Lighting	[REDACTED]	12.000 W/m <sup>2</sup>	-	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.45	Electricity: ...	Annual_Lighti...	on continuously	
General Lighting	[REDACTED]	12.000 W/m <sup>2</sup>	-	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.45	Electricity: ...	Annual_Lighti...	on continuously	
General Lighting	Ristoranti	12.000 W/m <sup>2</sup>	-	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.45	Electricity: ...	Annual_Lighti...	on continuously	
General Lighting	IR	12.000 W/m <sup>2</sup>	-	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.45	Electricity: ...	Annual_Lighti...	on continuously	
General Lighting	Uffici	12.000 W/m <sup>2</sup>	-	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.45	Electricity: ...	Annual_Lighti...	on continuously	T
People	Centro congressi	90.000 W/person	60.000 W/person	5.000 m <sup>2</sup> /...	-	-	-	Annual_Occup...	-	

**Type:** General Lighting  
**Units:** W/m<sup>2</sup>  
 Minimum Illuminance (lux): 0.00  
 Maximum Illuminance (lux): 0.00  
 Installed Power Density / 100 lux: 3.750 W/m<sup>2</sup>/(100 lux)  
**Maximum Sensible Gain (W/m<sup>2</sup>):** 12.000  
**Maximum Power Consumption (W/m<sup>2</sup>):** 0.000  
**Diversity Factor:** 1

**Reference:** Uffici  
**Radiant Fraction:** 0.45  
**Meter:** Electricity: Meter 1  
**Variation Profile:** Annual\_Lighting\_Uffici  
**Dimming Profile:** on continuously  
**Ballast/driver fraction:** 0  
 % of convective gain to RA plenum: 0.00 %  
 Allow profile to saturate for loads analysis?  
 Is non-regulated load?

Figura 30 - Modellazione dell'illuminazione artificiale negli UFFICI

Come si può notare dalla figura 30, il consumo di elettricità è posto a 0 (*Maximum Power Consumption*) per il motivo descritto in precedenza. A questo apporto interno è stato associato il profilo di illuminazione degli uffici creato in precedenza e che ora mostreremo.

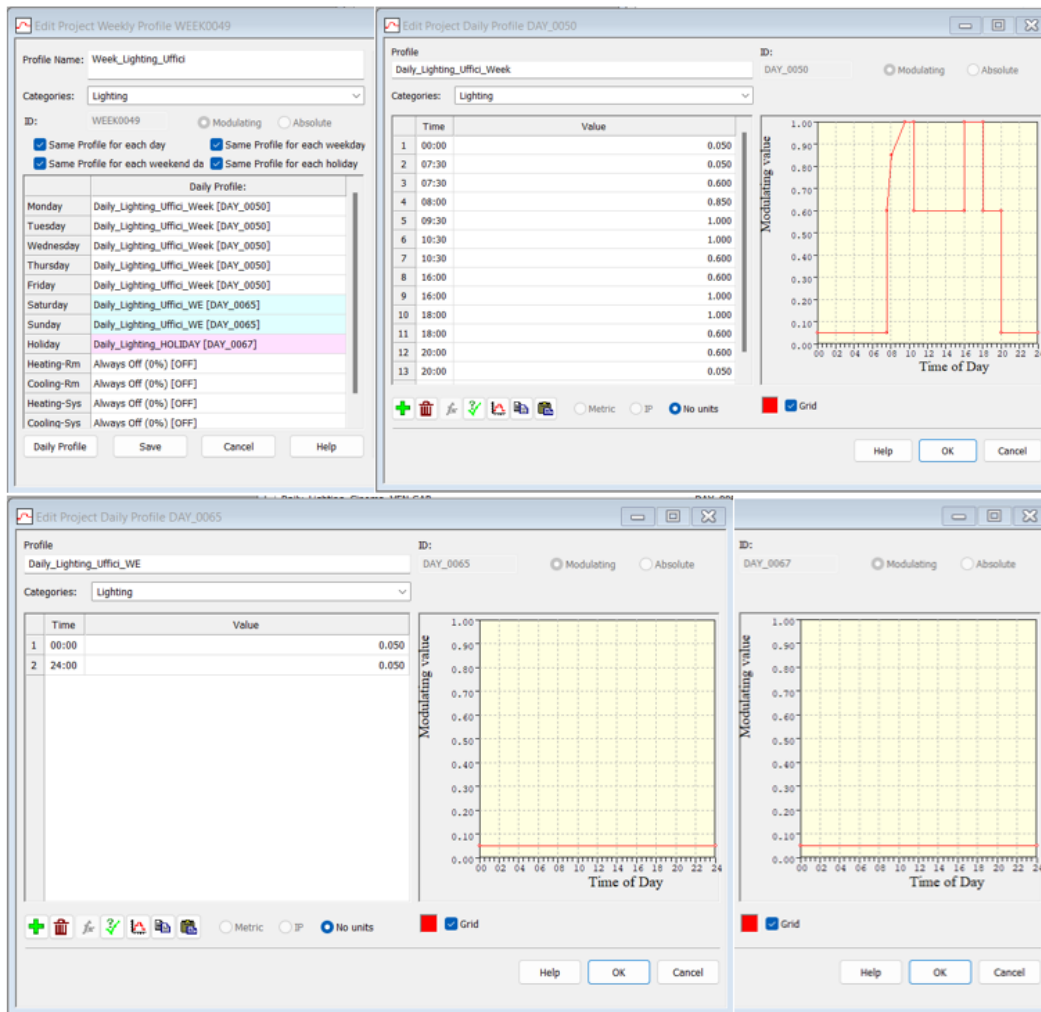


Figura 31 - Modellazione del profilo di utilizzazione degli apparecchi illuminati

La Figura 31 mostra tre diversi profili di illuminazione: in alto a destra abbiamo il profilo nei giorni feriali, in basso al centro abbiamo il profilo nel weekend, in fine, in basso a destra il profilo per le vacanze. Questi profili sono associati ad un profilo settimanale, in alto a sinistra, il quale viene associato alla modellazione dell'illuminazione artificiale.

Il profilo delle vacanze e quello dei weekend ha un valore di illuminazione molto basso, perché in questo modo si garantisce un livello di visibilità minima per ragioni di sicurezza, anche se l'ambiente non è occupato.

### 4.4.3 Occupazione

Gli apporti interni dovuti all'occupazione si riferiscono all'influenza sulla temperatura, l'umidità e la qualità dell'aria delle persone all'interno di un edificio. Questi apporti possono avere un impatto significativo sul comfort termico e sulla qualità dell'aria all'interno degli spazi ed è importante considerarli nella progettazione e nella gestione degli impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria.

Nella creazione dell'apporto interno dovuto all'occupazione, i dati inseriti sono stati *Occupancy Density* di  $10 \text{ m}^2/\text{persona}$  e il calore sensibile e latente che una persona può emettere. La densità di occupazione deriva dalla normativa [35].

Internal Gains

Type	Gain Reference	Maximum Sensible Gain	Maximum Latent Gain	Occupancy	Max Power Consumption	Radiant Fraction	Meter	Variation Profile	Dimming Profile	Add To Template
People		90.000 W/person	60.000 W/person	13.000 m...	-	-	-	Annual_Occup...	-	
People		90.000 W/person	60.000 W/person	16.000 m...	-	-	-	Annual_Occup...	-	
People		90.000 W/person	60.000 W/person	5.020 m²/...	-	-	-	Annual_Occup...	-	
People	Ristoranti	90.000 W/person	60.000 W/person	6.600 m²/...	-	-	-	Annual_Occup...	-	
People	Uffici	90.000 W/person	60.000 W/person	10.000 m...	-	-	-	Annual_Occup...	-	T
Miscellaneous	Centro congressi	3.000 W/m²	0.000 W/m²	-	0.000 W/m²	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_C...	-	
Miscellaneous	Cinema	3.000 W/m²	0.000 W/m²	-	0.000 W/m²	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_Ci...	-	

Type:  Reference:

Occupancy units:

Variation Profile:

Maximum Sensible Gain (W/P):

Maximum Latent Gain (W/P):

Occupancy Density (m²/person):

Diversity Factor:

% of convective gain to RA plenum:  %

Allow profile to saturate for loads analysis?

Figura 32 - Modellazione dell'occupazione negli UFFICI

Come nel caso precedente, non ci è stato concesso di sapere la quantità di persone che occupano gli ambienti, tranne per il centro congressi e il cinema. Come per l'illuminazione, sono stati creati dei profili modulari (Figura 33), in modo tale da associarli ai livelli di potenza.



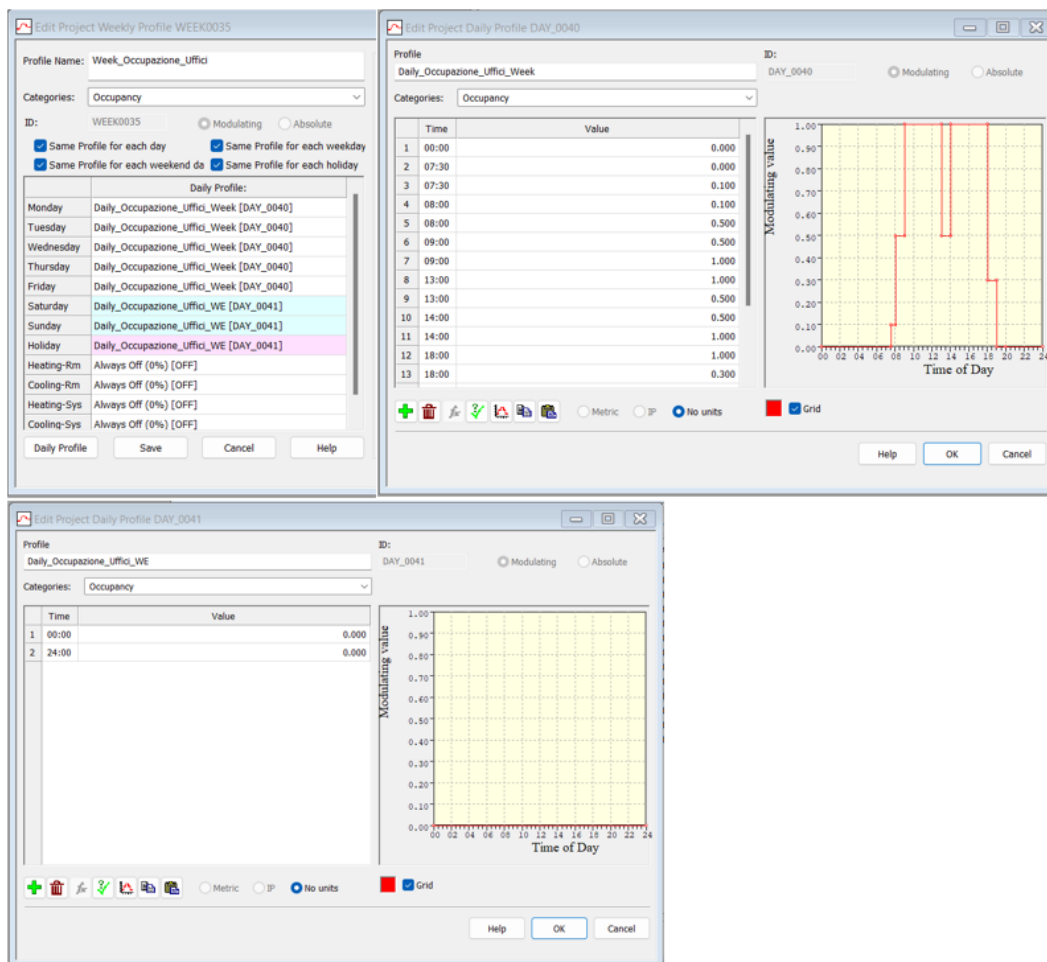


Figura 33 - Modellazione del profilo di occupazione

Dalla Figura 33, si nota che il valore di occupazione è pressoché pari ad 1 nelle ore diurne dei giorni feriali, tranne per la pausa pranzo, dalle 13:00 alle 14:00, in cui il valore si dimezza. Sia nei weekend che nei giorni di festa nazionale, il valore dell'occupazione è impostato a 0. Anche in questo caso, abbiamo creato il profilo settimanale, il quale è stato associato alla scheda degli apporti interni (Figura 32).

#### 4.4.3 Apparecchiature elettriche

Gli apporti interni dovuti alle apparecchiature elettriche si riferiscono al calore generato da dispositivi elettrici all'interno di un edificio. Questo calore è un sottoprodotto del funzionamento delle apparecchiature elettroniche e può influenzare significativamente la temperatura interna degli spazi.

Anche in questo caso, i consumi elettrici considerati nella calibrazione sono quelli associati alla zona termica GALLERIA, per il motivo descritto in precedenza. La potenza termica sensibile emessa dalle apparecchiature elettriche è stata impostata a 3 W/m<sup>2</sup>, mentre l'assorbimento di energia elettrica è posto a 0 (Figura 34).

Internal Gains

Type	Gain Reference	Maximum Sensible Gain	Maximum Latent Gain	Occupancy	Max Power Consumption	Radiant Fraction	Meter	Variation Profile	Dimming Profile	Add To Template
Miscellaneous	[REDACTED]	3.000 W/m <sup>2</sup>	0.000 W/m <sup>2</sup>	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_H...	-	
Miscellaneous	[REDACTED]	3.000 W/m <sup>2</sup>	0.000 W/m <sup>2</sup>	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_H...	-	
Miscellaneous	[REDACTED]	3.000 W/m <sup>2</sup>	0.000 W/m <sup>2</sup>	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.22	Electricity: Il...	Annual_EE_Lo...	-	
Miscellaneous	[REDACTED]	3.000 W/m <sup>2</sup>	0.000 W/m <sup>2</sup>	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_Pi...	-	
Miscellaneous	[REDACTED]	3.000 W/m <sup>2</sup>	0.000 W/m <sup>2</sup>	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_Po...	-	
Miscellaneous	Ristoranti	3.000 W/m <sup>2</sup>	0.000 W/m <sup>2</sup>	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_Ri...	-	
Miscellaneous	Uffici	3.000 W/m <sup>2</sup>	0.000 W/m <sup>2</sup>	-	0.000 W/m <sup>2</sup>	0.22	Electricity: ...	Annual_EE_Uf...	-	T

+ Add Internal Gain   - Remove Internal Gain   Select All   Deselect All

Type: Miscellaneous   Reference: Uffici

Units: W/m<sup>2</sup>   Radiant Fraction: 0.22

Meter: Electricity: Meter 1

Variation Profile: Annual\_EE\_Uffici

Maximum Sensible Gain (W/m<sup>2</sup>): 3.000

Maximum Latent Gain (W/m<sup>2</sup>): 0.000

Maximum Power Consumption (W/m<sup>2</sup>): 0.000

Diversity Factor: 1

% of convective gain to RA plenum: 0.00 %

Allow profile to saturate for loads analysis?

OK   Cancel

Figura 34 - Modellazione delle apparecchiature elettriche negli UFFICI

Con la medesima procedura utilizzata per gli altri apporti interni, è possibile associare un profilo temporale e modulare all'apporto considerato.

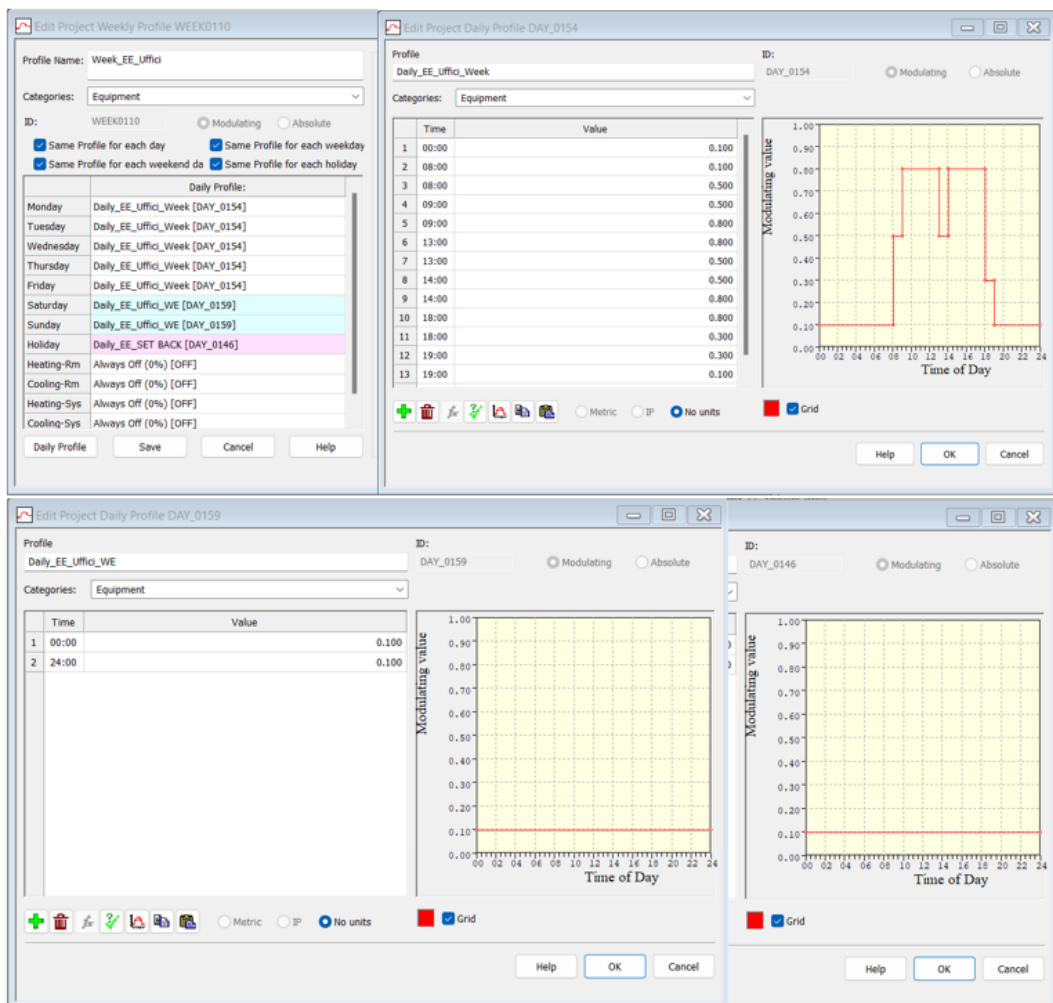


Figura 35 - Modellazione del profilo delle apparecchiature elettriche

Il profilo, in questo caso, è molto simile a quello di occupazione. Il motivo principale è che gli apparecchi elettrici sono utilizzati dalle persone che occupano gli uffici. Infatti, come per il profilo occupazionale, abbiamo una riduzione evidente durante la pausa pranzo. L'unica differenza sta nel fatto che nelle ore notturne, quando non c'è occupazione, i consumi non sono 0, ma hanno un valore percentuale del 10%, siccome molte apparecchiature sono messe in *standby* e non spente.

La medesima cosa succede per i giorni di vacanza e nel weekend, in cui i consumi sono il 10% della potenza termica nominale. Questi tre profili modulari giornalieri sono inseriti nel profilo settimanale (Figura 35), il quale è associato alla scheda degli apporti interni.

#### 4.4.4 Tabelle riassuntive dei profili temporali

ORE	GALLERIA		UFFICI		S. ALBERGHIERA	UNIVERSITA'		CLINICA		CINEMA		RISTORANTE	C. CONGRESSI	C. FIERE	G. D'ARTE
	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEK	WEEK	WEEK
01:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.3	1	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.1	1	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00	0.1	0.1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00	0.3	0.6	0.5	0	0.3	0.5	0	1	0	0	0	0	0	0.4	0.4
09:00	0.3	0.6	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	0	0	0.4	0.4
10:00	0.5	0.6	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	0.2	1	1	0.7
11:00	0.5	0.6	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	0.2	1	1	0.7
12:00	0.6	0.5	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0.7
13:00	0.6	0.5	0.5	0	0.1	1	0	1	0	0	0	1	0.2	0.2	0.7
14:00	0.5	1	1	0	0.1	1	0	1	0	0.3	0.4	1	0.9	0.9	0.3
15:00	0.5	1	1	0	0.1	1	0	1	0	0.3	0.5	0.2	0.9	0.9	1
16:00	0.5	1	1	0	0.3	1	0	1	0	0.4	0.5	0.1	0.9	0.9	1
17:00	0.5	1	1	0	0.3	1	0	1	0	0.4	0.7	0.1	0.9	0.9	1
18:00	0.6	1	0	0	0.6	0.3	0	0	0	0.4	0.8	0.1	0.9	0.9	0.6
19:00	0.2	1	0	0	0.6	0.1	0	0	0	0.7	0.8	0.2	0.2	0.2	0.6
20:00	0.1	0.2	0	0	0.9	0	0	0	0	0.7	1	1	0	0	0
21:00	0.1	0.2	0	0	0.9	0	0	0	0	0.7	1	1	0	0	0
22:00	0.1	0.2	0	0	0.9	0	0	0	0	0.7	1	1	0	0	0
23:00	0.1	0.1	0	0	0.9	0	0	0	0	0.3	1	1	0	0	0
00:00	0	0.1	0	0	0.9	0	0	0	0	0.3	1	0.1	0	0	0

Tabella 5 - Profili temporali di illuminazione

ORE	GALLERIA		UFFICI		S. ALBERGHIERA	UNIVERSITA'		CLINICA		CINEMA		RISTORANTE	C. CONGRESSI	C. FIERE	G. D'ARTE
	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEK	WEEK	WEEK
01:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.3	1	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.1	1	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00	0.1	0.1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00	0.3	0.6	0.5	0	0.3	0.5	0	1	0	0	0	0	0	0.4	0.4
09:00	0.3	0.6	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	0	0	0.4	0.4
10:00	0.5	0.6	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	0.2	1	1	0.7
11:00	0.5	0.6	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	0.2	1	1	0.7
12:00	0.6	0.5	1	0	0.1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0.7
13:00	0.6	0.5	0.5	0	0.1	1	0	1	0	0	0	1	0.2	0.2	0.7
14:00	0.5	1	1	0	0.1	1	0	1	0	0.3	0.4	1	0.9	0.9	0.3
15:00	0.5	1	1	0	0.1	1	0	1	0	0.3	0.5	0.2	0.9	0.9	1
16:00	0.5	1	1	0	0.3	1	0	1	0	0.4	0.5	0.1	0.9	0.9	1
17:00	0.5	1	1	0	0.3	1	0	1	0	0.4	0.7	0.1	0.9	0.9	1
18:00	0.6	1	0	0	0.6	0.3	0	0	0	0.4	0.8	0.1	0.9	0.9	0.6
19:00	0.2	1	0	0	0.6	0.1	0	0	0	0.7	0.8	0.2	0.2	0.2	0.6
20:00	0.1	0.2	0	0	0.9	0	0	0	0	0.7	1	1	0	0	0
21:00	0.1	0.2	0	0	0.9	0	0	0	0	0.7	1	1	0	0	0
22:00	0.1	0.2	0	0	0.9	0	0	0	0	0.7	1	1	0	0	0
23:00	0.1	0.1	0	0	0.9	0	0	0	0	0.3	1	1	0	0	0
00:00	0	0.1	0	0	0.9	0	0	0	0	0.3	1	0.1	0	0	0

Tabella 6 - Profili temporali di occupazione

ORE	GALLERIA		UFFICI		S. ALBERGHIERA		UNIVERSITA'		CLINICA		CINEMA		RISTORANTE	C. CONGRESSI	C. FIERE	G. D'ARTE
	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEKEND	WEEK	WEEK	WEEK	WEEK	WEEK
01:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1
02:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1
03:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
04:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
05:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
06:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
07:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
08:00	0.8	0.1	0.5	0.1	0.3	0.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.1
09:00	0.8	0.1	0.8	0.1	0.3	0.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.1
10:00	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.8
11:00	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.8	0.8	0.8
12:00	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.8	0.8	0.8
13:00	0.8	0.8	0.5	0.1	0.1	0.8	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.2	0.2	0.8
14:00	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.8	0.1	0.5	0.5	0.5	0.9	0.8	0.8	0.8
15:00	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.8	0.8	0.8	0.8
16:00	0.8	0.8	0.8	0.1	0.3	0.8	0.1	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.8	0.8	0.8	0.8
17:00	0.8	0.8	0.8	0.1	0.3	0.8	0.1	0.8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.8
18:00	0.8	0.8	0.3	0.1	0.7	0.8	0.1	0.8	0.1	0.8	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8
19:00	0.8	0.8	0.1	0.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.8
20:00	0.5	0.5	0.1	0.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1
21:00	0.5	0.5	0.1	0.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1
22:00	0.5	0.5	0.1	0.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1
23:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
00:00	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabella 7 - Profili temporali delle apparecchiature elettriche

## 4.5 Zone termiche

La UNI/TS 11300-1 definisce la zona termica nel seguente modo [35]: “Parte dell’ambiente climatizzato mantenuto a temperatura (ed eventualmente umidità) uniforme attraverso lo stesso impianto di climatizzazione. In linea generale ogni porzione di edificio, climatizzata ad una determinata temperatura con identiche modalità di regolazione, costituisce una zona termica.

Nel caso di prescrizione legislativa è possibile la suddivisione in funzione della destinazione d’uso e per unità immobiliare.

La zonizzazione non è richiesta se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- Le temperature interne di regolazione per il riscaldamento differiscono di non oltre 4 K;
- Gli ambienti non sono raffrescati o comunque le temperature interne di regolazione per il raffrescamento differiscono di non oltre 4 K;
- Gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di climatizzazione;
- Se vi è un impianto di ventilazione meccanica, almeno l’80% dell’area climatizzata è servita dallo stesso impianto di ventilazione con tassi di ventilazione nei diversi ambienti che non differiscono di un fattore maggiore di 4;
- Se vi è il controllo dell’umidità, le umidità relative interne di regolazione differiscono di non oltre 20 punti percentuali.

È possibile che la zonizzazione relativa al riscaldamento differisca da quella relativa al raffrescamento”.

Nel nostro caso in esame, le temperature interne nelle ore diurne hanno un set-point uguale, mentre nelle ore notturne hanno un valore differente in base alla destinazione d’uso. Per questo motivo la zonizzazione è stata effettuata in base alla destinazione d’uso, in quanto le caratteristiche ad esse associate rendono differenti le zone per il tipo di regolazione e per le ore di utilizzo. Di seguito, troviamo la tabella con le differenti zone termiche.

LUOGO	n° DI CIRCUITI	T_SET-POINT (ATT.) [°C]		PROFILI ASSOCIATI E APPORTI INTERNI					
		INVERNALE	ESTIVA	OCCUPAZIONE	m <sup>2</sup> /persona	ILLUMINAZIONE	W/m <sup>2</sup>	APP. ELETTRICHE	W/m <sup>2</sup>
AUDITORIUM	1	19(10)	26(35)	CENTRO CONGRESSI	5	CENTRO CONGRESSI	12	CENTRO CONGRESSI	3
CENTRO CONGRESSI	1	19(10)	26(35)	CENTRO CONGRESSI	5	CENTRO CONGRESSI	12	CENTRO CONGRESSI	3
CENTRO FIERE	1	19(10)	26(35)	CENTRO FIERE	5	CENTRO FIERE	12	CENTRO FIERE	3
CINEMA	1	19(16)	26(30)	CINEMA	3	CINEMA	12	CINEMA	3
CLINICA	2	19(16)	26(30)	CLINICA	7	CLINICA	12	CLINICA	3
GALLERIA	23	19(16)	26(30)	GALLERIA	11	GALLERIA	12	GALLERIA	3
GALLERIA D'ARTE	1	19	26	GALLERIA D'ARTE	16	GALLERIA D'ARTE	12	GALLERIA D'ARTE	3
RISTORANTE	1	19(16)	26(30)	RISTORANTE	7	RISTORANTE	12	RISTORANTE	3
STRUTTURA ALBERGHIERA 1	3	19	26	STRUTTURA ALBERGHIERA	16	STRUTTURA ALBERGHIERA	12	STRUTTURA ALBERGHIERA	3
STRUTTURA ALBERGHIERA 2	2	19	26	STRUTTURA ALBERGHIERA	16	STRUTTURA ALBERGHIERA	12	STRUTTURA ALBERGHIERA	3
STRUTTURA ALBERGHIERA 3	2	19	26	STRUTTURA ALBERGHIERA	16	STRUTTURA ALBERGHIERA	12	STRUTTURA ALBERGHIERA	3
TORRE CENTRALE	1	19(16)	26(30)	UFFICI	10	UFFICI	12	UFFICI	3
TORRE SUD	2	19(16)	26(30)	UFFICI	10	UFFICI	12	UFFICI	3
UFFICI	2	19(16)	26(30)	UFFICI	10	UFFICI	12	UFFICI	3
UFFICI F3	1	19(16)	26(30)	UFFICI	10	UFFICI	12	UFFICI	3
UFFICI PT	1	19(16)	26(30)	UFFICI	10	UFFICI	12	UFFICI	3
UNIVERSITA'	2	19(16)	26(30)	UNIVERSITA'	5	UNIVERSITA'	12	UNIVERSITA'	3

**Tabella 8 - Zone termiche dell'edificio con la relativa associazione dei profili temporali e gli apporti interni, tra parentesi il valore di attenuazione**

## 4.6 Presentazione degli impianti installati

In questo paragrafo saranno espone le soluzioni impiantistiche adottate nel caso studio. Si effettuerà una analisi dettagliata sul sistema reale di produzione, mentre, sul sistema di emissione, verranno effettuate delle ipotesi in carenza di dati reali.

### 4.6.1 Sistema di produzione dell'acqua tecnica

Nella struttura, la produzione dell'acqua tecnica è un processo che ha luogo all'interno delle centrali termiche situate nel piano interrato. Questo complesso comprende quattro centrali destinate alla generazione del fluido termovettore caldo, ciascuna identificata come centrale termica di fase 1, fase 2, fase 3 e struttura alberghiera 2. Allo stesso tempo, sono presenti due centrali dedicate alla produzione del fluido termovettore freddo, denominate centrale frigorifera di fase 2 e centrale frigorifera di fase 3.

Nella centrale frigorifera di fase 2, troviamo quattro gruppi frigoriferi centrifughi, ognuno dei quali dispone di una potenza termica pari a 3 MW, producendo acqua refrigerata a 7°C. La gestione del carico termico, nelle condizioni di funzionamento normali, è affidata principalmente ai gruppi frigo GF1, GF2 e GF3. Il gruppo frigorifero GF4, invece, viene attivato soltanto in circostanze eccezionali, ovvero quando il carico termico supera i parametri standard o in caso di guasto a uno dei gruppi frigo.

Le torri evaporative rappresentano un elemento chiave del sistema di raffreddamento della centrale frigorifera, comprendendo quattro torri, ciascuna con una capacità di dissipazione del calore pari a 6,54 MW. Va notato che la potenza nominale dei gruppi evaporativi è notevolmente superiore a quella dei gruppi frigoriferi. Questa differenza è dovuta al fatto che i gruppi frigoriferi sono stati sostituiti nel corso del tempo, mentre le torri evaporative erano state originariamente progettate per supportare gruppi frigoriferi ad assorbimento, secondo il progetto del 1992.

Nome	Funzione	Modello	Potenza termica [kW]
GF1	Gruppo frigo	YORK YKGBFBH65CSE	3000
GF2	Gruppo frigo	TRANE CVHH090	3000
GF3	Gruppo frigo	TRANE CVHH095	3000
GF4	Gruppo frigo	TRANE CVHH090	3000
TR1	Torre evaporativa	BAC VXT 1050	6540
TR2	Torre evaporativa	BAC VXT 1050	6540
TR3	Torre evaporativa	BAC VXT 1050	6540
TR4	Torre evaporativa	BAC VXT 1050	6540

Tabella 9 - Caratteristiche dei gruppi frigoriferi e delle torri evaporative di fase 2

La struttura operativa della centrale è caratterizzata da un collegamento in parallelo di tutti i gruppi frigo mediante l'ausilio dei collettori, semplificando così il funzionamento complessivo del sistema. Per ogni gruppo frigo, sono presenti due pompe, una per l'evaporatore, prevalenza di 37,4 metri e portata di 535,3 m<sup>3</sup>/h ed una per il condensatore, prevalenza di 15 metri e portata di 504 m<sup>3</sup>/h. L'acqua tecnica in uscita dal condensatore viene convogliata in un collettore, a valle del gruppo di pompaggio utenze. Lo scopo del gruppo di pompaggio è aumentare la prevalenza affinché vengano superate le perdite di pressione dovute alle dissipazioni attraverso i canali. Sono presenti cinque pompe del tipo centrifugo con prevalenza 40 metri e con una portata volumetrica di 480 m<sup>3</sup>/h. Siccome sono collegate in parallelo, la prevalenza risultante rimane identica, mentre, la portata risulta essere 2400 m<sup>3</sup>/h. La potenza elettrica nominale dell'intero gruppo di pompaggio è di 275 kW. Dato che le quantità di acqua sono considerevoli, a valle del gruppo di pompaggio sono stati inseriti due vasi d'espansione con capacità volumetrica di 500 litri ognuno. L'acqua tecnica in uscita dal gruppo di pompaggio viene immessa nella dorsale, la quale è posizionata in un cavedio lungo tutto l'edificio. Gli stacchi vengono fatti direttamente sulla dorsale, portando l'acqua tecnica ai piani superiori.

Nome	Scopo	Modello	Prevalenza [m]	Portata [m <sup>3</sup> /h]
P1	Evaporatore	Grundfos NB200-400/344 AF1AB	37.4	535.3
P2	Condensatore	Grundfos 225M-4 60	15	504
P3	Evaporatore	Grundfos NB200-400/344 AF1AB	37.4	535.3
P4	Condensatore	Grundfos 225M-4 60	15	504
P5	Evaporatore	Grundfos NB200-400/344 AF1AB	37.4	535.3
P6	Condensatore	Grundfos 225M-4 60	15	504
P7	Evaporatore	Grundfos NB200-400/344 AF1AB	37.4	535.3
P8	Condensatore	Grundfos 225M-4 60	15	504
P21	Utenze	Audioli&Bertola NPV200/315	30	480
P22	Utenze	Audioli&Bertola NPV200/315	30	480
P23	Utenze	Audioli&Bertola NPV200/315	30	480
P24	Utenze	Audioli&Bertola NPV200/315	30	480
P25	Utenze	Audioli&Bertola NPV200/315	30	480

Tabella 10 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale frigorifera di fase 2

Nella centrale frigorifera di fase 3, troviamo tre gruppi frigoriferi centrifughi, ognuno dei quali dispone di una potenza termica pari a 3 MW, producendo acqua refrigerata a 7°C. La gestione del carico termico, nelle condizioni di funzionamento normali, è affidata principalmente ai gruppi frigo GF2 e GF3. Il gruppo frigorifero GF1, invece, viene attivato soltanto in circostanze eccezionali, ovvero quando il carico termico supera i parametri standard o in caso di guasto a uno dei gruppi frigo. Le torri evaporative sono tre, ciascuna con una capacità di dissipazione del calore pari a 3,6 MW. A differenza della centrale frigorifera di fase 2, la potenza nominale delle torri evaporative è ben dimensionata in quanto, già dalla fase progettuale, i gruppi frigo considerati sono quelli in uso.

Nome	Funzione	Modello	Potenza termica [kW]
GF1	Gruppo frigo	MCQUAY WSC126	3000
GF2	Gruppo frigo	TRANE CVGF1000	3000
GF3	Gruppo frigo	TRANE RTHF780	3000
TR1	Torre evaporativa	BAC VXT S640	3622
TR2	Torre evaporativa	BAC VXT S640	3622
TR3	Torre evaporativa	BAC VXT S640	3622

**Tabella 11 - Caratteristiche dei gruppi frigoriferi e delle torri evaporative di fase 3**

La struttura operativa della centrale è caratterizzata da un collegamento in parallelo di tutti i gruppi frigo mediante l'ausilio dei collettori, semplificando così il funzionamento complessivo del sistema. Per ogni gruppo frigo, sono presenti quattro pompe, due in parallelo per l'evaporatore, ognuna con prevalenza di 25 metri e portata di 620 m<sup>3</sup>/h e due per il condensatore, ognuna con prevalenza di 20 metri e portata di 500 m<sup>3</sup>/h. L'acqua tecnica in uscita dal condensatore viene convogliata in un collettore, a valle del gruppo di pompaggio utenze. Lo scopo del gruppo di pompaggio è aumentare la prevalenza affinché vengano superate le perdite di pressione dovute alle dissipazioni attraverso i canali. Sono presenti quattro pompe del tipo centrifugo con prevalenza 25 metri e con una portata volumetrica di 620 m<sup>3</sup>/h. Siccome sono collegate in parallelo, la prevalenza risultante rimane identica, mentre, la portata risulta essere 2480 m<sup>3</sup>/h. La potenza elettrica nominale dell'intero gruppo di pompaggio è di 300 kW. Dato che le quantità di acqua sono considerevoli, a valle del gruppo di pompaggio è stato inserito un vaso d'espansione con capacità volumetrica di 1000 litri. L'acqua tecnica in uscita dal gruppo di pompaggio viene immessa nella dorsale, la quale è posizionata in un cavedio lungo tutto l'edificio. Gli stacchi vengono fatti direttamente sulla dorsale, portando l'acqua tecnica ai piani superiori.

Nome	Scopo	Modello	Prevalenza [m]	Portata [m <sup>3</sup> /h]
P1	Evaporatore	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P2	Evaporatore	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P3	Evaporatore	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P4	Evaporatore	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P5	Evaporatore	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P6	Evaporatore	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P7	Condensatore	BIRAGHI N200.400 OT	20	500
P8	Condensatore	BIRAGHI N200.400 OT	20	500
P9	Condensatore	BIRAGHI N200.400 OT	20	500
P10	Condensatore	BIRAGHI N200.400 OT	20	500
P11	Condensatore	BIRAGHI N200.400 OT	20	500
P12	Condensatore	BIRAGHI N200.400 OT	20	500
P13	Utenze	BIRAGHI N200.400 OT	30	480
P14	Utenze	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P15	Utenze	BIRAGHI N200.400 OT	25	620
P16	Utenze	BIRAGHI N200.400 OT	25	620

**Tabella 12 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale frigorifera di fase 3**

L'acqua tecnica prodotta dalle centrali frigorifere di fase 2 e fase 3 alimentano la stessa dorsale, così facendo si riesce a modulare le potenze in maniera ottimale e ridurre il consumo energetico.

La centrale termica di fase 1 produce il fluido termovettore caldo ad 80°C mediante l'utilizzo di tre scambiatori di calore allacciati al teleriscaldamento, ognuno di essi ha una potenza nominale pari a 3,75 MW. Lo scambiatore è di tipo a piastre con fluidi in controcorrente. Sul lato del teleriscaldamento abbiamo una temperatura di 120°C in ingresso e 90 °C in uscita, mentre, sul lato utenza abbiamo un salto termico di 20 K. L'efficienza dello scambio è molto alta, dovuta allo strato di isolante termico che ricopre lo scambiatore di calore.

Nome	Funzione	Modello	Potenza termica [kW]
SC1	SCAMBIATORE DI CALORE	\	3750
SC2	SCAMBIATORE DI CALORE	\	3750
SC3	SCAMBIATORE DI CALORE	\	3750

**Tabella 13 - Caratteristiche degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 1**

Gli scambiatori di calore sono collegati tra di loro mediante dei collettori; a differenza delle centrali frigorifere, le centrali termiche hanno un solo gruppo di pompaggio ed è sul lato utenza. La presenza di un gruppo di pompaggio sul lato del teleriscaldamento risulterebbe inutile perché il fluido è in sovrappressione per evitare la formazione di vapore. Le pompe centrifughe sul lato utenza sono quattro e sono collegate in parallelo, fornendo una prevalenza di 57 metri e una portata totale di 860 m<sup>3</sup>/h. La potenza elettrica totale assorbita dal gruppo di pompaggio è pari a 220 kW. Al collettore di mandata sono collegati sei vasi di espansione collegati tra loro con una capacità volumetrica totale pari a 2250 litri.



Nome	Scopo	Modello	Prevalenza [m]	Portata [m <sup>3</sup> /h]
P1	Utenze	KBS ITALIA	57	215
P2	Utenze	KBS ITALIA	57	215
P3	Utenze	KBS ITALIA	57	215
P4	Utenze	KBS ITALIA	57	215

**Tabella 14 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale di fase 1**

La centrale termica di fase 2 produce il fluido termovettore caldo ad 80°C mediante l'utilizzo di tre scambiatori di calore allacciati al teleriscaldamento, ognuno di essi ha una potenza nominale pari a 6,1 MW. Lo scambiatore è di tipo a piastre con fluidi in controcorrente. Sul lato del teleriscaldamento abbiamo una temperatura di 120°C in ingresso e 90 °C in uscita, mentre, sul lato utenza abbiamo un salto termico di 20 K. L'efficienza dello scambio è molto alta, dovuta allo strato di isolante termico che ricopre lo scambiatore di calore.

Nome	Funzione	Modello	Potenza termica [kW]
SC1	SCAMBIATORE DI CALORE	ALFA LAVAL M20 MFG	6100
SC2	SCAMBIATORE DI CALORE	ALFA LAVAL M20 MFG	6100
SC3	SCAMBIATORE DI CALORE	ALFA LAVAL M20 MFG	6100

**Tabella 15 - Caratteristiche degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 2**

Gli scambiatori di calore sono collegati tra di loro mediante dei collettori; in questa centrale sono presenti due gruppi pompe distinti. Il primo è formato da quattro pompe centrifughe collegate in parallelo, fornendo una prevalenza di 40 metri e una portata totale di 1300 m<sup>3</sup>/h. La potenza elettrica totale assorbita da questo gruppo di pompaggio è pari a 225 kW. Il secondo, è costituito da due pompe centrifughe collegate in parallelo, fornendo una prevalenza di 20 metri e una portata totale di 360 m<sup>3</sup>/h. La potenza elettrica assorbita da questo gruppo pompe è di 30 kW. Al collettore di mandata sono collegati tre vasi di espansione collegati tra loro con una capacità volumetrica totale pari a 1500 litri.

Nome	Scopo	Modello	Prevalenza [m]	Portata [m <sup>3</sup> /h]
P25	Utenze	GRUNDFOS 225M-4 60	40	260
P26	Utenze	GRUNDFOS 225M-4 61	40	260
P27	Utenze	GRUNDFOS 225M-4 62	40	260
P27A	Utenze	GRUNDFOS 225M-4 63	40	260
P27B	Utenze	GRUNDFOS 225M-4 64	40	260
P28	Utenze	LEROY SOMER LS-150L	20	180
P29	Utenze	LEROY SOMER LS-150L	20	180

**Tabella 16 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale termica di fase 2**

La centrale termica di fase 3 produce il fluido termovettore caldo ad 80°C mediante l'utilizzo di quattro scambiatori di calore allacciati al teleriscaldamento, ognuno di essi ha una potenza nominale pari a 3 MW. Lo scambiatore è di tipo a piastre con fluidi in controcorrente. Sul lato del teleriscaldamento abbiamo una temperatura di 120°C in ingresso e 90 °C in uscita, mentre, sul lato utenza abbiamo un salto termico di 20 K. L'efficienza dello scambio è molto alta, dovuta allo strato di isolante termico che ricopre lo scambiatore di calore.

Nome	Funzione	Modello	Potenza termica [kW]
SC1	SCAMBIATORE DI CALORE	CIPRIANI S/650B/067/6/5/A	3000
SC2	SCAMBIATORE DI CALORE	CIPRIANI S/650B/067/6/5/A	3000
SC3	SCAMBIATORE DI CALORE	CIPRIANI S/650B/067/6/5/A	3000
SC4	SCAMBIATORE DI CALORE	CIPRIANI S/650B/067/6/5/A	3000

**Tabella 17 - Caratteristiche degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 3**

Gli scambiatori di calore sono collegati tra di loro mediante dei collettori; in questa centrale si ha un solo gruppo pompe; è formato da cinque pompe centrifughe collegate in parallelo, fornendo una prevalenza di 30 metri e una portata totale di 1300 m<sup>3</sup>/h. La potenza elettrica totale assorbita da questo gruppo di pompaggio è pari a 185 kW. Al collettore di mandata sono collegati due vasi di espansione collegati tra loro, ognuno con una capacità volumetrica pari a 500 litri.

Nome	Scopo	Modello	Prevalenza [m]	Portata [m <sup>3</sup> /h]
P17	Utenze	BIRAGHI N150.315 0T	30	260
P18	Utenze	BIRAGHI N150.315 0T	30	260
P19	Utenze	BIRAGHI N150.315 0T	30	260
P20	Utenze	BIRAGHI N150.315 0T	30	260
P21	Utenze	BIRAGHI N150.315 0T	30	260

**Tabella 18 - Caratteristiche delle pompe centrifughe della centrale termica di fase 3**

Come per il fluido termovettore freddo, anche le centrali termiche di fase 2 e fase 3 condividono la stessa dorsale, per il medesimo motivo prima discusso.

Per quanto riguarda la centrale termica della struttura alberghiera 2, non abbiamo la possibilità di reperire i dati, siccome non ci era consentito accedere alla centrale termica per questioni di riservatezza. Questa mancanza di dati non influenza il modello perché questa centrale alimenta esclusivamente la struttura alberghiera, la quale è stata rimossa per la calibrazione dei consumi del teleriscaldamento.

#### 4.6.2 Unità di trattamento aria

L'edificio è dotato di unità di trattamento dell'aria (UTA) distribuite al suo interno, ciascuna svolgendo diverse funzioni. Alcune di queste UTA forniscono solo aria primaria (VP), mentre altre sono utilizzate per il sistema di condizionamento a tutt'aria (AC). La maggior parte di queste UTA risale alla ristrutturazione del 1992.

Le batterie di preriscaldamento, raffreddamento e post-riscaldamento all'interno delle UTA vengono alimentate con fluidi termovettori prodotti nelle centrali termiche descritte in precedenza e la loro regolazione avviene attraverso la parzializzazione delle elettrovalvole posizionate all'ingresso delle batterie. La regolazione della portata d'acqua nelle batterie di scambio termico delle UTA è effettuata utilizzando una logica di controllo Proporzionale-Derivata (PD). Le variabili controllate sono la temperatura all'interno dell'ambiente e la portata dell'acqua in ingresso nelle batterie. Per quanto riguarda la ventilazione, sia l'aria di estrazione che quella di mandata sono gestite da ventilatori con portata e velocità

fisse e regolazione ON-OFF. Questo approccio, tuttavia, comporta un consumo energetico elevato, poiché le potenze elettriche assorbite sono quelle nominali.

All'interno della struttura, sono presenti numerose UTA, e i dati relativi ad esse provengono in gran parte da documenti di progetto e da rilievi sul campo. Tuttavia, in alcuni casi, è stato necessario fare delle ipotesi per completare le informazioni. Nelle tabelle seguenti, verranno dettagliate le UTA presenti nell'edificio, con le relative caratteristiche e la provenienza dei dati associati ad esse.

CTA	LUOGO	MANDATA [m <sup>3</sup> /h]	ESTRAZIONE [m <sup>3</sup> /h]	BATTERIE [kW]				NOTE
				PRE	RAFFR	POST	REC	
UTA A AC	GALLERIA	10000	4760	75	70	\	13	RC
UTA A VP	GALLERIA	3120	3120	38	35	\	5	RC
UTA B AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	13	RC
UTA B VP	GALLERIA	3120	3120	38	35	\	5	RC
UTA C AC	GALLERIA	22400	4760	177	120	\	\	RC
UTA C AC	GALLERIA	18500	4760	150	110	\	\	RC
UTA D AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	\	RC
UTA D AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	\	RC
UTA E AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	\	RC
UTA E VP	GALLERIA	3040	3040	38	35	\	\	RC
UTA F AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	\	RC
UTA F VP	GALLERIA	2650	2650	38	35	\	\	RC
UTA G AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	\	RC
UTA H AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	\	RC
UTA I AC	GALLERIA	14500	4760	100	93	\	\	RC
UTA I AC	GALLERIA	9900	3690	75	70	\	\	RC
UTA L AC	GALLERIA	9900	3690	75	70	\	\	RC
UTA L AC	GALLERIA	14500	4760	100	93	\	\	RC
UTA M AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	13	RC
UTA N AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	13	RC
UTA O AC	GALLERIA	13500	1340	83	80	\	4	RC
UTA P AC	GALLERIA	13500	3690	83	80	\	5	RC
UTA P VP	GALLERIA	3130	3130	38	35	\	5	RC
UTA Q AC	GALLERIA	13500	1340	83	80	\	5	RC
UTA Q VP	GALLERIA	3690	3690	38	35	\	4	RC
UTA R AC	GALLERIA	13500	1340	83	80	\	5	RC
UTA S AC	GALLERIA	15500	13510	100	93	\	20	RC
UTA S VP	GALLERIA	4860	4860	55	55	\	13	RC
UTA T AC	GALLERIA	15500	13510	100	93	\	20	RC
UTA T VP	GALLERIA	4860	4860	55	55	\	13	RC
UTA U AC	GALLERIA	15500	1600	100	93	\	4	RC
UTA V AC	GALLERIA	15500	1600	100	93	\	4	RC
UTA W AC	GALLERIA	15500	1600	100	93	\	4	RC
UTA X AC	GALLERIA	15500	1600	100	93	\	4	RC
UTA Y1 AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	13	RC
UTA Y2 VP	GALLERIA	5180	5180	55	55	\	13	RC
UTA Z1 AC	GALLERIA	15500	4760	100	93	\	13	RC
UTA Z2 VP	GALLERIA	5180	4630	55	55	\	13	RC

Tabella 19 - Caratteristiche delle UTA presenti nell'edificio. AC: tutt'aria. VP: aria primaria. RC: rilevati sul campo. RP: rilevati da progetto. IP: ipotizzati

CTA	LUOGO	MANDATA [m <sup>3</sup> /h]	ESTRAZIONE [m <sup>3</sup> /h]	BATTERIE [kW]				NOTE
				PRE	RAFFR	POST	REC	
UTA A1 AC	GALLERIA	13960	3130	83	80	\	5	RC
UTA A1 VP	GALLERIA	1800	1800	25	20	\	4	RC
UTA B1 AC	GALLERIA	7000	1800	60	60	\	4	RC
UTA B1 VP	GALLERIA	1800	1800	25	20	\	4	RC
UTA C1 AC	GALLERIA	7000	1800	60	60	\	4	RC
UTA C1 VP	GALLERIA	1800	1800	25	20	\	4	RC
UTA N1 VP	GALLERIA	14500	15500	\	\	\	\	RC
UTA N2 VP	GALLERIA	14500	15500	\	\	\	\	RC
UTA G2 AC	GALLERIA	26000	21000	120	200	101		RC
UTA G1 AC	GALLERIA	26000	21000	120	200	101		RC
UTA 1 VP	UFFICI	43250	31500	263	246	\	173	RP
UTA 2 VP	UFFICI	33750	24700	204	198	\	135	RP
UTA 3 VP	UFFICI	48000	35000	291	280	\	188	RP
UTA 4 VP	UFFICI	34555	24700	204	198	\	135	RP
UTA 5 VP	UFFICI	43250	31500	263	246	\	173	RP
UTA 1 AC	AUDITORIUM	38200	36150	490	490	164	225	RP
UTA 1 VP	TORRE SUD	15000	10000	182	181	61.5	50	RP
UTA 1 AC	CENTRO CONGRESSI	23100	22000	168	255	123	115	RP
UTA 2 AC	CENTRO CONGRESSI	23100	22000	168	255	123	115	RP
UTA 3 AC	CENTRO CONGRESSI	11000	11000	83.3	129	61.6	58	RP
UTA 4 AC	CENTRO CONGRESSI	11000	11000	83.3	129	61.6	58	RP
UTA 5 AC	CENTRO CONGRESSI	16000	16000	123	187	90	84	RP
UTA 6 AC	CENTRO CONGRESSI	25000	25000	192	293	139	131	RP
UTA 7 AC	CENTRO CONGRESSI	20000	14500	427	394	137	\	RP
UTA 8 AC	CENTRO CONGRESSI	20000	14500	427	394	137	\	RP
UTA 9 AC	CENTRO CONGRESSI	1200		5.5	3.8	\	\	RP
UTA 10 AC	CENTRO CONGRESSI	1200		\	1.4	\	\	RP
UTA 11 AC	CENTRO CONGRESSI	4000	4000	34	45	20	21	RP
UTA 12 AC	CENTRO CONGRESSI	5000	3500	14	31.5	\	\	RP
UTA 13 AC	CENTRO CONGRESSI	12000	8000	33.5	82	92	\	RP
UTA 14 AC	CENTRO CONGRESSI	20000	20000	167	251	\	105	RP
UTA 15 AC	CENTRO CONGRESSI	19000	19000	160	234	\	99.5	RP
UTA 16 AC	CENTRO CONGRESSI	14000	14600	29	105	\	29.3	RP
UTA 17 AC	CENTRO CONGRESSI	20000	22450	36	156	\	39	RP
UTA 18 AC	CENTRO CONGRESSI	31000	25200	104	256	189	78	RP
UTA 19 AC	CENTRO CONGRESSI	31000	25200	104	256	189	78	RP
UTA 1 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 1	28000	19000	340	319	108	111	RP
UTA 2 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 1	28000	20000	327	306	104	107	RP
UTA 3 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 1	2800	2484	33.6	33.3	10.4	12.3	RP
UTA 4 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 1	20000	15000	95	132	159	29.7	RP
UTA 5 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 1	38000	29000	201	280	290	53	RP

Tabella 20 - Caratteristiche delle UTA presenti nell'edificio. AC: tutt'aria. VP: aria primaria. RC: rilevati sul campo. RP: rilevati da progetto. IP: ipotizzati

CTA	LUOGO	MANDATA [m <sup>3</sup> /h]	ESTRAZIONE [m <sup>3</sup> /h]	BATTERIE [kW]				NOTE
				PRE	RAFFR	POST	REC	
UTA 1 AC	UFFICI PT	29600	25000	358	372	223	126	RP
UTA 2 AC	UFFICI PT	28300	24000	342	354	217	120	RP
UTA 1 VP	UNIVERSITA'	50500	43500	124	124	31	120	RP
UTA 2 VP	UNIVERSITA'	10000	1000	31	31	5	6	RP
UTA 3 VP	UNIVERSITA'	65200	62200	124	200	31	124	RP
UTA 4 VP	UNIVERSITA'	8000		19	31	5	\	RP
UTA 5 VP	UNIVERSITA'	16000	14000	12	49	19	\	RP
UTA 6 VP	UNIVERSITA'	7300		12	19	12	\	RP
UTA 7 VP	UNIVERSITA'	3000	2500	7.5	12	3	\	RP
UTA 1 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	8815	7675	60	60	31.6	\	IP
UTA 2 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	1010	875	12	15	\	\	IP
UTA 3 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	950	820	12	15	\	\	IP
UTA 4 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	8815	7675	60	60	31.6	\	IP
UTA 5 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	5500	4780	60	60	34.6	\	IP
UTA 6 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	3500	3000	50	50	\	\	IP
UTA 7 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	3500	3000	50	50	\	\	IP
UTA 8 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 3	5500	4780	60	60	34.6	\	IP
UTA 9 VP	CLINICA	15790	15300	100	100	\	\	RP
UTA 10 VP	CLINICA	16980	15490	100	100	\	\	RP
UTA 11 VP	CLINICA	15400	14050	100	100	24.5	\	RP
UTA 12 VP	CLINICA	1120	1250	12	15	\	\	RP
UTA 13 VP	CLINICA	3100	2815	30	30	\	\	RP
UTA 14 VP	CLINICA	13410	13660	90	90	24.5	\	RP
UTA 15 VP	CLINICA	18500	16870	120	120	\	\	RP
UTA 16 VP	CLINICA	16830	15355	100	100	\	\	RP
UTA 17 VP	CLINICA	14610	13320	85	90	22.2	\	RP
UTA 18 VP	CLINICA	10480	11280	70	70	22.2	\	RP
UTA 1 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 2	12150	14400	213.7	162.2	40.4	51.1	RP
UTA 2 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 2	13380	11640	256.4	174.3	44.4	51.7	RP
UTA 3 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 2	13380	11640	256.4	174.3	44.4	51.7	RP
UTA 4 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 2	4000	5000	55.8	47.4	\	\	RP
UTA 5 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 2	6000	4000	37.5	50.8	34.7	\	RP
UTA 6 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 2	2000	1600	36	24.4	10.5	\	RP
UTA 7 VP	STRUTTURA ALBERGHIERA 2	9000	8000	136.6	127.3	\	34.4	RP
UTA 1 AC	RISTORANTE	6000	6000	60	60	\	18	RP
UTA 1 AC	CINEMA	243200	227550	2145.1	2940.5	984.2	854.8	IP
UTA 1 VP	GALLERIA	7000	6500	60	60	\	18	IP
UTA 1 VP	TORRE CENTRALE	15000	10000	182	181	61.5	50	RP
UTA 2 VP	GALLERIA	7000	6500	60	60	\	18	IP
UTA 1 AC	GALLERIA D'ARTE	15000	10000	182	181	61.5	50	IP
UTA 1 AC	CENTRO FIERE	324000	306000	7011	5341	\	\	IP
UTA 1 VP	UFFICI F3	16000	14000	12	49	19	\	RP

**Tabella 21- Caratteristiche delle UTA presenti nell'edificio. AC: tutt'aria. VP: aria primaria. RC: rilevati sul campo. RP: rilevati da progetto. IP: ipotizzati**

Dalle portate riportate nelle Tabelle 15, 16 e 17 emerge chiaramente che la gestione delle portate di ventilazione è realizzata in modalità di sovrappressione, con l'obiettivo di minimizzare al massimo le infiltrazioni d'aria. Questo approccio è volto a limitare le portate d'aria sia attraverso la struttura opaca dell'edificio che attraverso gli infissi.

Le UTA in funzione all'edificio hanno le seguenti configurazioni:

- Ricircolo;
- Recupero a flussi incrociati;
- Recupero con batteria ad acqua glicolata;
- Configurazione base (no ricircolo, no recupero).

Le ipotesi fatte i per dati segnalati IP sono:

- STRUTTURA ALBERGHIERA 3: le portate d'aria sono note da progetto, ma non c'era alcun dato sulle potenze delle batterie delle UTA; la potenza è stata stimata in base alla portata in gioco e facendo riferimento alle potenze delle UTA della CLINICA, essendo dello stesso modello;
- CINEMA: normalizzazione delle portate d'aria e delle potenze in base ai m<sup>3</sup> del CENTRO CONGRESSI. I risultati sono stati moltiplicati per il volume occupato dal cinema. Si è pensata a questa soluzione perché il centro congressi e il cinema hanno gli indici di affollamento simili, sono collocati allo stesso piano e hanno la stessa esposizione;
- GALLERIA: anche in questo caso il dato deriva da una normalizzazione in base al volume occupato;
- GALLERIA D'ARTE e CENTRO FIERE: i dati derivano dalla normativa UNI 10339 per i ricambi d'aria. In entrambe le zone si è ipotizzato un impianto a tutt'aria [34].

Le potenze totali assorbite dalle UTA divise per zona sono elencate nella tabella seguente.

LUOGO	BATTERIE [kW]			
	PRE	RAFFR	POST	REC
GALLERIA	3870	3737	220	285
UFFICI	1225	1168	\	804
AUDITORIUM	490	490	164	225
CENTRO CONGRESSI	2358.6	3457.7	1362.2	1010.8
STRUTTURA ALBERGHIERA 1	996.6	1070.3	671.4	313
UFFICI PT	700	726	440	246
UNIVERSITA'	329.5	466	106	250
STRUTTURA ALBERGHIERA 3	364	370	370	\
CLINICA	807	815	93.4	\
STRUTTURA ALBERGHIERA 2	992.4	760.7	174.4	188.9
RISTORANTE	60	60	\	18
CINEMA	2145.1	2940.5	984.2	854.8
TORRE CENTRALE	182	181	61.5	50
GALLERIA D'ARTE	182	181	61.5	50
CENTRO FIERE	7011	5341	\	\
UFFICI F3	12	49	19	\
<b>TOTALE</b>	<b>21725</b>	<b>21813</b>	<b>4727.6</b>	<b>4295.5</b>

Tabella 22 - Potenze termiche delle batterie delle unità di trattamento aria divise per destinazione d'uso. PRE: Preriscaldamento. RAFFR: Raffrescamento. POST: postriscaldamento. REC: Recuperatore

### 4.6.3 Terminali idronici

Le zone che ricevono aria primaria sono dotate di terminali idronici che coprono la parte rimanente del carico termico. Le portate d'aria non sono sufficienti per soddisfare completamente il fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento. Di conseguenza, sono stati installati diversi tipi e dimensioni di terminali idronici, tra cui radiatori, pavimenti radianti e fan-coil.

Per quanto riguarda la raccolta dei dati, ci sono state alcune sfide importanti da affrontare. In primo luogo, l'accordo di riservatezza con gli affittuari ha reso impossibile condurre rilievi diretti sul campo. In secondo luogo, non è stato possibile recuperare le schede tecniche direttamente dai dispositivi, poiché erano posizionati sul soffitto o incassati. In questa situazione, è stato difficile verificare i dati di progetto risalenti al 1992. Per questo motivo, diversamente da quanto fatto per le portate d'aria, ci è stato impossibile utilizzare una normalizzazione basata sul volume. Per risolvere questa problematica, è stato impiegato il *software Edilclima*, utilizzato per diagnosi energetiche. Questo *software*, grazie ai calcoli normativi, ha permesso di verificare l'accuratezza dei dati di progetto. Nel complesso, i dati di progetto si sono dimostrati abbastanza precisi, con potenze che differivano solo di qualche punto percentuale. Pertanto, per le zone in cui mancavano dati dettagliati, sono state utilizzate le potenze calcolate da *Edilclima* come punto di riferimento.

LUOGO	RISCALDAMENTO [kW]	RAFFRESCAMENTO [kW]	NOTE
GALLERIA	1063	1214	IP
UFFICI	767	1900	RP
TORRE SUD	228	332.1	RP
STRUTTURA ALBERGHIERA 1	660.2	1187	RP
UNIVERSITA'	865.7	441	IP
STRUTTURA ALBERGHIERA 3	408.8	73.4	RP
CLINICA	560.2	1087	RP
STRUTTURA ALBERGHIERA 2	189	191	RP
TORRE CENTRALE	228	332.1	IP
UFFICI F3	393.2	254.2	RP
TOTALE	5363.1	7011.8	\

Tabella 23 - Potenze nominali dei terminali idronici installati nell'edificio. IP: ipotizzati. RP: Rilevati da progetto

### 4.6.4 Potenze termiche totali installate

In questo sottoparagrafo saranno analizzate le potenze totali installate per la produzione dei fluidi termovettori e le potenze dei terminali idronici e aeraulici installati.

IMPIANTO	RISCALDAMENTO	RAFFRESCAMENTO
EMISSIONE [kW]	27088.3	28825
PRODUZIONE [kW]	41550	21000
SCOSTAMENTO [%]	53.4	-27.1

Tabella 24 - Potenze totali installate dell'impianto di emissione e di produzione

Dalla tabella 24 emerge chiaramente che l'impianto di produzione per il riscaldamento risulta notevolmente sovradimensionato, con uno scostamento

percentuale che supera il 53,4%. Questo fenomeno è il risultato delle pratiche di progettazione impiantistica adottate nel 1992 e negli anni precedenti, quando gli impianti di produzione venivano deliberatamente sovradimensionati di circa il 40%. Questo valore rende la percentuale di sovradimensionamento da noi calcolata più che accettabile, tenuto conto delle regole empiriche dell'epoca.

Per quanto riguarda l'impianto di condizionamento, è evidente che l'impianto di produzione del fluido termovettore freddo è sottodimensionato del 27.1%. Questo risultato è plausibile, considerando che la centrale frigorifera di fase 1 è stata dismessa. Tuttavia, è importante sottolineare che questo scostamento potrebbe causare significativi problemi di disagio termico nell'edificio, soprattutto in situazioni in cui si verifichi una contemporaneità di richieste di raffreddamento elevato.

## **4.7 Modellazione degli impianti dell'edificio**

In questo paragrafo, verrà spiegato il metodo utilizzato per la modellazione degli impianti di produzione ed emissione all'interno del *software IES VE*. Il *software* offre la possibilità di utilizzare due applicativi per la modellazione degli impianti: *Apache System Standard* e *ApacheHVAC*. Il primo permette una modellazione semplificata, in cui è possibile inserire le variabili di controllo ma con una logica di controllo ideale basata sui profili. Il secondo applicativo, invece, consente di creare l'intero sistema impianto, comprese tutte le logiche di controllo e i relativi sensori presenti nell'impianto reale. La scelta tra *Apache System Standard* e *ApacheHVAC* dipende dalle esigenze specifiche del progetto e dalla complessità dell'impianto da modellare. Nel nostro caso, l'uso di *ApacheHVAC* è stato preferito per garantire una rappresentazione dettagliata e completa degli impianti in esame. L'utilizzo di *ApacheHVAC* ha consentito di creare una rappresentazione dettagliata e realistica degli impianti, tenendo conto di tutte le logiche di controllo e dei sensori coinvolti.

### **4.7.1 Modellazione delle centrali termiche**

Le centrali termiche, come detto in precedenza, sono quattro. Nonostante non è stato possibile rilevare i dati della centrale termica della struttura alberghiera 2, è stata creata comunque con valori alti in modo tale da compensare la richiesta termica della zona, senza che vada ad intaccare i consumi del modello da confrontare con i consumi reali.

Il *software IES VE* non include la *Energy Source* del teleriscaldamento nel suo *database* di *default*. Questa sorgente di energia è essenziale per il nostro caso studio; quindi, il primo passo da effettuare è crearla. Una volta creata, sarà possibile associare alla fonte energetica dei *meters*, i quali saranno associati ai consumi delle centrali termiche. La figura 36 mostra la fonte energetica creata con i rispettivi fattori di produzione di CO<sub>2</sub> e il rapporto tra la fonte e l'energia primaria utilizzata per la rete di teleriscaldamento di Torino.



Energy Sources and Meters						
No	Name	CO2 Emission Factor (kgCO2/kWh)	Source/Primary Energy Factor (kWh/kWh)	Meters		
<input type="checkbox"/>	0	Natural Gas	0.21600	1.220	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	1	LPG	0.24100	1.090	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	2	Biogas	0.09800	1.100	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	3	Oil	0.31900	1.100	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	4	Coal	0.34500	1.000	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	5	Biomass	0.03100	1.010	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	6	Electricity	0.48300	3.070	Meter 1, Pompe riscaldamento, Raffrescamento, Ventil...	▼
<input type="checkbox"/>	7	Waste Heat	0.05800	1.340	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	8	Anthracite	0.39400	1.000	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	9	Smokeless Fuel (inc Coke)	0.43300	1.210	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	10	Dual Fuel Appliances (Miner...	0.22600	1.020	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	11	Grid Displaced Electricity	0.51900	3.070	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	12	Grid Displaced Electricity PV	0.51900	3.070	Meter 1	▼
<input type="checkbox"/>	13	Misc. A	0.00000	1.100	Meter 1	▼
<input checked="" type="checkbox"/>	14	Teleriscaldamento	0.16200	1.100	Fase 1, Fase 2, Fase 3, Meter 1, Hotel	▼

Figura 36 - Fonti energetiche e meters nel software IES VE

Il *software* ci consente di creare diverse centrali all'interno della sezione *HotWaterLoops*, e per ciascuna di esse è stato creato uno scambiatore di calore in base alle specifiche descritte nel paragrafo precedente. Nella fase di creazione dello scambiatore, il *software* offre un aiuto prezioso attraverso la funzione *autosize*. Questo significa che, considerando la potenza nominale dello scambiatore, il salto di temperatura tra la mandata e il ritorno dell'utenza e l'efficienza dello scambiatore, il *software* è in grado di calcolare automaticamente le restanti informazioni necessarie per la modellazione del generatore di calore.

Hot water boiler ✕

Reference: SC 1 Fase 2

General

Energy source & primary: Teleriscaldamento: Fase 2 ▼

Operational model: Boiler model description

Performance curve

Hot water boiler curve selection: NonCondensingBoiler ▼

Boiler performance curve,  $f_{Ept}(p, T_{lbt})$ :  
 Non-condensing low temp gas-fired  $E_{rat}=0.8$  Edit

Parasitic power,  $W_p$ : 0.000 kW

Parasitic Electric Input Ratio,  $W_p/Q_{des}$ : 0.0000

Parasitic power: Electricity: Meter 1 ▼

Minimum hot-water flow fraction: 0.10

---

Design condition | Rated condition

Hot water supply temperature,  $T_{lbrat}$ : 80.00 °C

Hot water flow rate,  $V_{brat}$ : 72.93 l/s

Volume flow per unit capacity,  $V_{brat}/Q_{rat}$ : 0.01 l/s/kW

Delta-T at rated condition,  $\Delta T_{brat}$ : 20.00 K

Heating capacity,  $Q_{rat}$ : 6100.000 kW A

Boiler efficiency,  $E_{rat}$ : 1.00

OK Cancel

Figura 37 - Modello dello scambiatore di calore SC1 della centrale termica di fase 2

Come evidenziato nella Figura 37, i valori bianchi rappresentano quelli che possono essere modificati, come descritto in precedenza, mentre i valori grigi sono quelli generati automaticamente dalla funzione *autosize*. È importante notare che il *software* non dispone di scambiatori di calore nel suo *database*. Pertanto, lo

scambiatore di calore viene modellato come se fosse una caldaia tradizionale, ma sfruttando la sorgente termica primaria precedentemente creata. Un ulteriore aspetto rilevante da notare è che le potenze elettriche parassite sono impostate a 0 kW. Questa scelta è motivata dal fatto che gli scambiatori di calore collegati al teleriscaldamento non includono componenti elettriche interne, quindi non assorbono energia elettrica.

Gli scambiatori delle centrali di fase 1 e fase 3 sono stati modellati nel medesimo modo, cambiando esclusivamente il valore della potenza nominale, enunciati rispettivamente nelle Tabelle 13 e 17.

Il passo successivo consiste nell'aggiungere i suddetti scambiatori alle rispettive centrali. Il *software* ci consente di definire l'ordine di accensione dei generatori in base alla percentuale del carico termico assorbito dalle zone servite. A titolo di esempio, abbiamo inserito la Figura 38 per illustrare la modularità degli scambiatori di calore di fase 2.

		Part load range (up to %) and heating equipment/heating device activation										% HWL capacity	Heating capacity (kW)
Active sequence -->		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Heating equipment devices	Type	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100		
SC 1 Fase 2	HWB	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	33.33	6100.00
SC 2 Fase 2	HWB	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	33.33	6100.00
SC 3 Fase 2	HWB	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	33.33	6100.00

Figura 38 - Modularità ed ordine di accensione degli scambiatori di calore della centrale termica di fase 2

L'ultima azione da effettuare per concludere la modellizzazione delle centrali termiche è inserire i dati sul sistema di pompaggio e le caratteristiche del sistema di controllo. Il *software* ci permette di scegliere il sistema di pompaggio a livello di funzionamento, ma non ci permette di inserire il numero delle pompe presenti nel sistema. È possibile assegnare una singola pompa per ogni scambiatore di calore. La soluzione a questo problema è alquanto semplice; si è effettuata la somma delle potenze e delle portate, le quali sono state distribuite per gli scambiatori di calore presenti nella centrale. Gli altri dati importanti da inserire per il sistema di pompaggio sono il rendimento elettrico del motore asincrono trifase e il rendimento idraulico della pompa centrifuga. Durante la calibrazione agiremo su questi dati, in quanto i rendimenti rilevati sui dati di targa sono mutati, dovuto all'erosione che gli apparecchi elettrici hanno lungo il loro ciclo vita. Il *software*, come detto in precedenza, ci permette di decidere il tipo di controllo effettuato. Nel nostro caso studio, la temperatura sul lato utenza in uscita dallo scambiatore di calore è costante

ed è pari ad 80 °C, ma con portata variabile, effettuata mediante la laminazione delle elettrovalvole posizionate all'ingresso del generatore sul lato del teleriscaldamento.

Hot water loop configuration window showing the following parameters:

- Reference: Centrale termica Fase 2
- Hot water loop capacity: 18300.00 kW
- Oversizing factor for loop autosizing: 1.25
- Force loop capacity to suit only heating equipment that will operate in the max part-load range:
- Loop configuration: Primary only
- Distribution losses: 0.00 %
- Primary:
  - Design loop capacity: 18300.00 kW
  - Design loop flow rate: 218.78 l/s
  - Primary loop flow control: Variable flow
- Supply water temperature control:
  - Design hot water supply temperature, Tbt des: 80.00 °C
  - Supply temperature setpoint: Constant
  - Hot water demand-side load fraction high threshold: 0.60
  - Supply temperature at or above high threshold: 80.00 °C
  - Hot water demand-side load fraction low threshold: 0.30
  - Supply temperature at or below low threshold: 65.56 °C
  - Design hot water temperature difference, DeltaTbt des: 20.00 K
- Pumps:
  - Primary loop pump configuration: Dedicated heating equipment pumps
  - Number of pumps: 3
  - Specific pump power: 2452.32 W/(l/s)
  - Pump heat gain to loop (fraction): 0.90
  - Performance curve: (Edited) Constant speed pump riding
- Optional loads:
  - DHW branch: DHW Fase 2 - DHW branch - default
  - Scheduled load:
  - Design Load: 0.00 kW
  - Profile: constant 0
  - Delta-T: 20.00 K
  - Min leave temp: 60.00 °C
  - Location: Parallel

Figura 39 - Modellizzazione del sistema di pompaggio e di controllo della centrale termica di fase 2

Sulla linea guida utilizzata per la modellazione della centrale di fase 2, si sono modellate anche le centrali di fase 1 e fase 3. Di seguito saranno mostrati gli schemi impiantistici disegnati dal software IES VE per la rappresentazione grafica delle centrali. Negli schemi sono presenti le utenze che rappresentano i terminali, le batterie di preriscaldamento, le batterie di post-riscaldamento e il prelievo di acqua calda sanitaria.

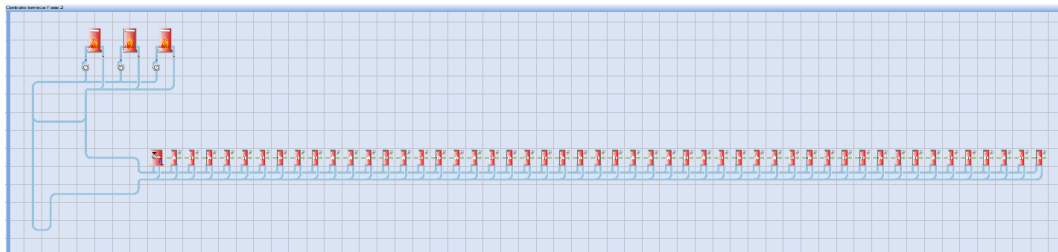


Figura 40 - Schema della centrale termica di fase 2

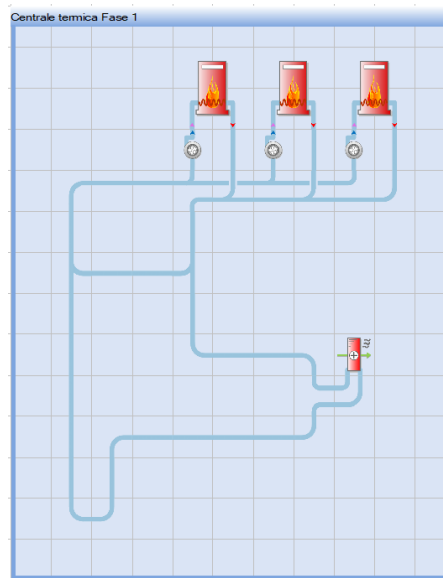


Figura 41 - Schema della centrale termica di fase 1



Figura 42 - Schema della centrale termica di fase 3

#### 4.7.2 Modellazione delle centrali frigorifere

Le centrali frigorifere nel nostro caso studio sono due: centrale di fase 2 e centrale di fase 3. Anche in questo caso, procederemo analizzando una sola centrale frigorifera, in quanto il procedimento è il medesimo per entrambe.

Il *software* ci consente di creare diverse centrali all'interno della sezione *ChilledWaterLoops*, e per ciascuna di esse è stato creato una macchina frigorifera in base alle specifiche descritte nel paragrafo precedente. Nella fase di creazione del gruppo frigo, il *software* offre un aiuto prezioso attraverso l'ausilio di alcune curve di carico di *default* che possono essere modificare per renderle il più possibile vicine alla realtà. In questo modo, gli unici dati da inserire per il *chiller* sono le temperature di ingresso e uscita del fluido termovettore destinato alle utenze e la potenza nominale termica della macchina, il *software* è in grado di calcolare automaticamente le restanti informazioni necessarie per la modellazione della macchina frigo, come la portata d'acqua del *chiller* e del condensatore.

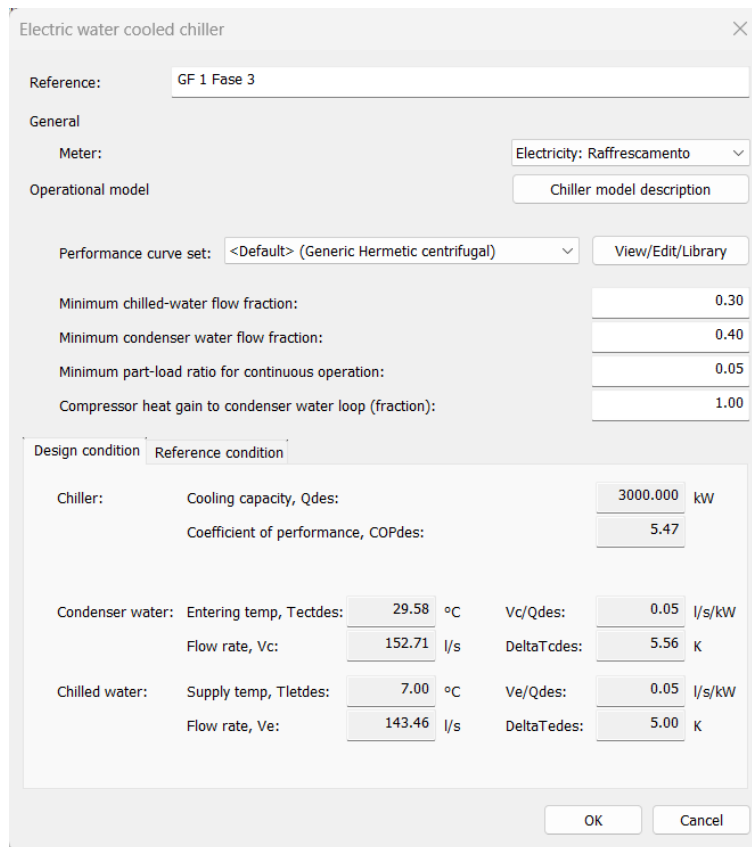


Figura 43 - Modellizzazione della macchina frigorifera GF1 della centrale frigorifera di fase 3

Come per le centrali termiche, il *software* ci fa scegliere l'ordine di accensione dei gruppi frigo, in modo tale da formare una modularità del carico.

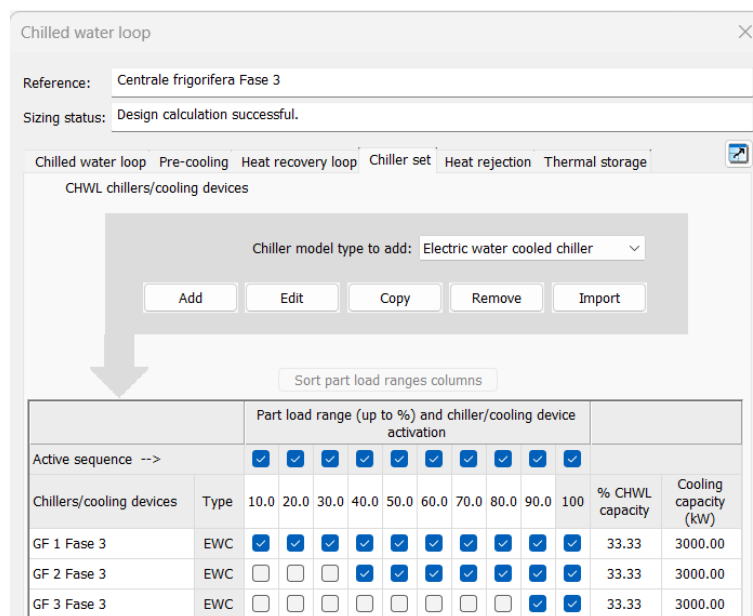


Figura 44 - Ordine di accensione dei gruppi frigo della centrale frigorifera di fase 3

I passi successivi della modellazione interessano i circuiti di reiezione della macchina frigorifera che sono: il circuito del condensatore (Figura 45) e il circuito delle torri evaporative (Figura 46).

Il *software* è in grado di modellare in maniera automatica il circuito del condensatore, in cui bisogna impostare esclusivamente l'efficienza del gruppo di pompaggi e le temperature di ingresso e di uscita del condensatore. La portata d'acqua addolcita che attraversa il componente e la potenza totale del circuito condensatore deriva da questi fattori. Anche i dati utili per il sistema di pompaggio sono gli stessi decritti nel sottoparagrafo precedente per gli scambiatori di calore.

Le torri evaporative delle centrali termiche sono a circuito chiuso; l'acqua in uscita dal condensatore viene pompata verso le torri che smaltiscono il calore accumulato, con l'aiuto di alcuni ventilatori. Anche in questo caso, i dati da fornire al sistema per la modellazione non sono molti; i dati considerati sono sempre le temperature di ingresso e uscita e la potenza massima che la torre riesce a dissipare. La potenza dei ventilatori è stimata, siccome non è stato possibile rilevarla. Attraverso la calibrazione si capirà di quanto incrementare o diminuire la potenza.

The screenshot shows a software window titled "Chilled water loop" with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into several sections:

- Reference:** Centrale frigorifera Fase 3
- Sizing status:** Design calculation successful.
- Navigation tabs:** Chilled water loop (selected), Pre-cooling, Heat recovery loop, Chiller set, Heat rejection, Thermal storage.
- Design parameters:**
  - Design outdoor dry-bulb temperature: 35.00 °C A
  - Design outdoor wet-bulb temperature: 25.56 °C A
  - Condenser water loop heat rejection device: Cooling tower (dropdown)
  - Waterside economizer
- Condenser water loop sub-section:**
  - Design condenser water loop heat rejection capacity: 11048.618 kW
  - Design condenser water loop supply temperature: 29.58 °C
  - Design temperature difference, DeltaTcdes: 5.56 K
  - Supply temp setpoint: Constant (dropdown), 21.11 °C
  - Condenser water loop supply temperature setpoint profile: None (dropdown)
  - Outdoor wet-bulb temperature high threshold: 23.89 °C
  - Supply temperature at/above high threshold: 29.44 °C
  - Outdoor wet-bulb temperature low threshold: 15.56 °C
  - Supply temperature at/below low threshold: 21.11 °C
  - Design condenser loop flow rate: 458.12 l/s
  - Condenser loop flow control: Staged (dropdown)
- Pumps section:**
  - Pump configuration: Dedicated EWC condenser pumps (dropdown), 3
  - Specific pump power:  Detailed inputs (checkbox), Edit button, 980.93 W/(l/s)
  - Pump meter: Electricity: Raffresc (dropdown)
  - Pump heat gain to condenser water loop (fraction): 0.90
  - Performance curve: Constant speed pump riding cur (dropdown), Edit button, Constant speed (dropdown)
  - Max pump flow fraction: 1.00
  - Min pump flow fraction: 0.05
- Buttons:** OK, Cancel

Figura 45 - Modellazione dei condensatori della centrale frigorifera di fase 3

Chilled water loop

Reference: Centrale frigorifera Fase 3

Sizing status: Design calculation successful.

Chilled water loop Pre-cooling Heat recovery loop Chiller set Heat rejection Thermal storage

Design outdoor dry-bulb temperature: 35.00 °C A

Design outdoor wet-bulb temperature: 25.56 °C A

Condenser water loop heat rejection device: Cooling tower

Waterside economizer

Condenser water loop Cooling tower Fluid cooler Waterside economizer

Design parameters

Cooling tower control: N+1 cooling towers per chiller Number of towers: 3

Cooling tower capacity:  % of CWL capacity: 33.33 Capacity: 3682.873 kW

Design leaving temperature: 29.58 °C

Approach: Variable design (ASHRAE-90.1 201) 4.02 K

Range: Constrain to 10F (ASHRAE-90.1 20) 5.56 K

Maximum flow fraction: 1.00 Minimum flow fraction: 0.04

Fan power, Wfan: 650.000 kW

Fan electric input ratio, Wfan/Qhrdes: 0.0588

Fan control: One-speed fan

Free convection airflow fraction: 0.100

Fan end use and meter: Heat Rejection Electricity: Raffresc

OK Cancel

Figura 46 – Modellazione delle torri evaporative della centrale frigorifera di fase 3

L'ultima operazione per concludere la modellizzazione è implementare il modello con i dati del sistema di controllo e i dati del sistema di pompaggio. A differenza dell'impianto termico, nei gruppi frigo ci sono due circuiti: primario e secondario. Le pompe da considerare nel circuito primario sono quelle che incanalano il fluido termovettore nell'ingresso dell'evaporatore. Mentre, il circuito secondario si occupa del pompaggio dell'acqua tecnica dal collettore verso le utenze.

Chilled water loop

Reference: Centrale frigorifera Fase 3

Sizing status: Design calculation successful.

Chilled water loop | Pre-cooling | Heat recovery loop | Chiller set | Heat rejection | Thermal storage

Design parameters

Chilled water loop capacity: 9000.00 kW A

Chilled water loop flow rate: 430.39 l/s A

Force loop capacity to suit only chillers that operate in max part-load range

Oversizing factor for loop autosizing: 1.15

Distribution losses: 0.00 %

Scheduled load Location: Secondary parall Profile: constant 0 kW

Loop configuration: Primary-Secondary

Primary loop flow control: Variable flow

Primary circuit | Secondary circuit

Chilled water temperatures

Chilled water supply temperature reset type: No reset

Chilled water supply temperature: 7.00 °C

Outdoor dry-bulb temperature high threshold: 26.67 °C

Supply temperature at/above high threshold: 7.00 °C

Outdoor dry-bulb temperature low threshold: 15.56 °C

Supply temperature at/below low threshold: 12.22 °C

Design chilled water loop temperature difference, DeltaTedes: 5.00 K

Chilled water pump

Primary circuit pump configuration: Dedicated chiller pumps

Number of primary circuit pumps: 3

Specific pump power at design flow:  Detailed inputs Edit 784.74 W/(l/s)

Pump heat gain to chilled water loop (fraction): 0.90

Performance curve: Constant speed pump riding curve Edit Constant speed

Pump meter: Electricity: Raffrescamento

OK Cancel

Figura 47 - Circuito primario della macchina frigorifera della centrale frigorifera di fase 3

La Figura 47 rappresenta i dati relativi al circuito primario, e come si può osservare, alcuni di questi dati non possono essere modificati (rappresentati nei riquadri grigi) in quanto dipendono dalla configurazione della macchina e dai bilanci di massa ed energia.

Le temperature in uscita dall'evaporatore sono state impostate a 7°C, mentre il salto termico è di 5 K, come precedentemente menzionato nel paragrafo in cui sono state descritte le caratteristiche degli impianti. La regolazione avviene a flusso variabile utilizzando le elettrovalvole di laminazione, mentre le pompe operano a velocità fissa. Nel caso specifico delle pompe, non è stato possibile specificare il numero esatto, quindi le caratteristiche delle sei pompe del circuito primario sono state sommate e divise per tre, in modo da ottenere un valore rappresentativo. I risultati ottenuti sono stati inseriti nel pulsante apposito *edit* che consente di modificare le caratteristiche delle pompe.



Chilled water loop

Reference: Centrale frigorifera Fase 3

Sizing status: Design calculation successful.

Chilled water loop | Pre-cooling | Heat recovery loop | Chiller set | Heat rejection | Thermal storage

Design parameters

Chilled water loop capacity: 9000.00 kW A

Chilled water loop flow rate: 430.39 l/s A

Force loop capacity to suit only chillers that operate in max part-load range

Oversizing factor for loop autosizing: 1.15

Distribution losses: 0.00 %

Scheduled load Location: Secondary parall Profile: constant 0 kW

Loop configuration: Primary-Secondary

Primary loop flow control: Variable flow

Primary circuit | Secondary circuit

Enable independent secondary loop supply water temperature control

Chilled water temperatures

Chilled water supply temperature reset type: No reset

Chilled water supply temperature: 6.67 °C

Outdoor dry-bulb temperature high threshold: 26.67 °C

Supply temperature at/above high threshold: 6.67 °C

Outdoor dry-bulb temperature low threshold: 15.56 °C

Supply temperature at/below low threshold: 12.22 °C

Design chilled water loop temperature difference, DeltaTedes: 6.67 K

Chilled water pump

Specific pump power at design flow:  Detailed inputs Edit 1177.11 W/(l/s)

Pump heat gain to chilled water loop (fraction): 0.90

Performance curve: Constant speed pump riding curve Edit Constant speed

Pump meter: Electricity: Raffrescamento

OK Cancel

Figura 48 - Circuito secondario della macchina frigorifera della centrale frigorifera di fase 3

Per quanto riguarda il circuito secondario, i dati modificabili sono ben pochi in quanto il sistema è vincolato dai dati inseriti in precedenza. Gli unici dati modificabili sono quelli riferiti al sistema di pompaggio, il quale consente l'uso di una singola pompa. Anche in questo caso, i dati relativi alle pompe sono stati sommati e inseriti.

Sulla linea guida utilizzata per la modellazione della centrale di fase 3, si è modellata anche la centrale di fase 2. Le uniche differenze sostanziali tra le due centrali sono: la potenza termica nominale delle torri evaporative e la quantità del numero di pompe presenti. Di seguito saranno mostrati gli schemi impiantistici disegnati dal software IES VE per la rappresentazione grafica delle centrali. Negli schemi sono presenti le utenze che rappresentano i terminali e le batterie di raffrescamento.

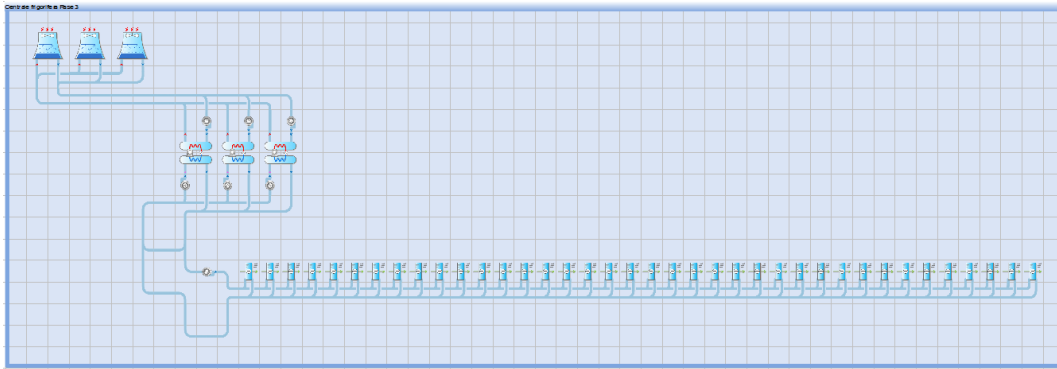


Figura 49 - Schema della centrale frigorifera di fase 3

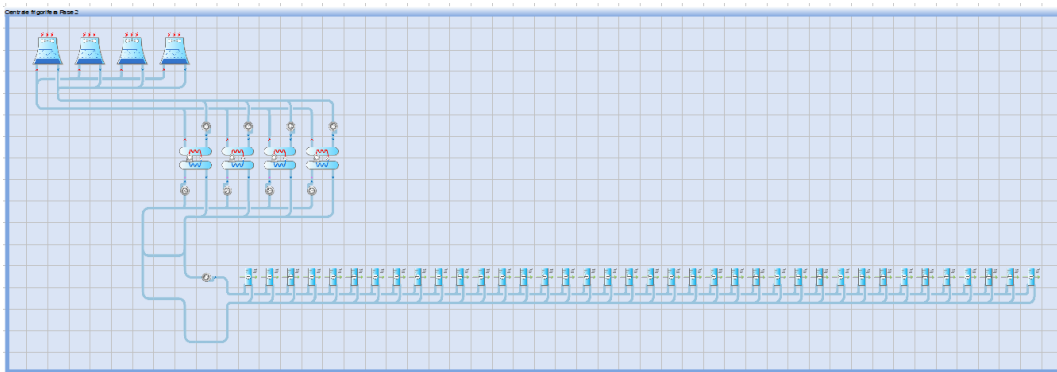


Figura 50 - Schema della centrale frigorifera di fase 2

### 4.7.3 Modellazione delle unità di trattamento aria e dei terminali

La modellazione delle Unità di Trattamento dell'Aria (UTA) è anch'essa realizzata utilizzando l'applicativo *ApacheHVAC* all'interno del *software IES VE*, nella sezione dedicata *Airflows*. In questa sezione, è possibile inserire sia le UTA che i terminali idronici e associarli alle zone termiche precedentemente elencate nel paragrafo 4.5. Quando si inseriscono utilizzatori come le batterie delle UTA e i terminali all'interno del circuito, è fondamentale associarli alla centrale termica o frigorifera, seguendo la configurazione reale dell'edificio, come illustrato nella Figura 51.

Heating Coil ✕

Reference:

Coil type:

Hot water loop:  ↻

Hot water loop circuit:

Design sizing parameters

Oversizing factor:	1.25
Heating capacity:	685.500 kW A

Figura 51 - Esempio di associazione di una batteria di preriscaldamento alla centrale termica di fase 2

Per rappresentare in maniera esaustiva il sistema di riscaldamento e di raffreddamento abbiamo bisogno di dieci tipi di circuito diversi, i quali differiscono per gli elementi presenti nel circuito e la logica di controllo ad essi associata. Nella Tabella 25 sono rappresentati i modelli di circuito utilizzati e il numero di essi per rappresentare l'intero sistema.

TIPO	PRERISCALDAMENTO	RAFFRESCAMENTO	POSTRISCALDAMENTO	RECUPERATORE	RICIRCOLO	TERMINALI	QUANTITA'
A	X	X					5
B	X	X			X		5
C	X	X				X	17
D	X	X	X				4
E	X	X	X		X		2
F	X	X	X			X	6
G	X	X	X	X			1
H	X	X	X	X		X	6
I	X	X	X	X	X	X	1
L				X		X	1
TOTALE							48

Tabella 25 - Configurazioni delle tipologie di UTA e di terminali nel modello dell'edificio

Come si può notare, i circuiti totali sono inferiori rispetto alle UTA presenti nell'edificio; questa differenza è dovuta all'aggregazione delle UTA che servono la stessa zona, in modo tale da creare un solo circuito invece di enne circuiti.

A titolo di esempio, procederemo a illustrare il funzionamento e la logica di controllo del circuito TIPO I. È importante notare che questo circuito è completo e comprende tutti i controlli presenti anche negli altri circuiti. Dopo aver spiegato in dettaglio il funzionamento di questo circuito, saranno fornite solo le illustrazioni dei tipi di circuiti presenti, in quanto condividono le stesse logiche di controllo di base.

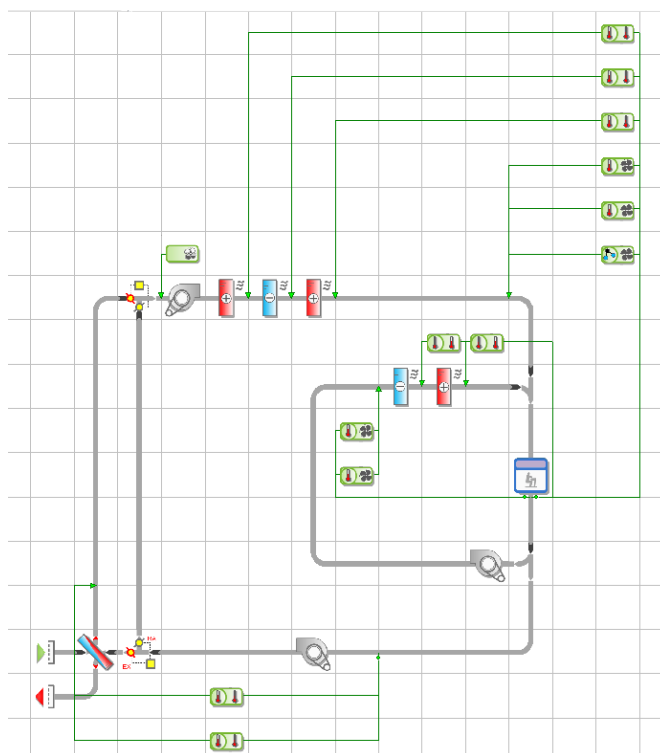


Figura 52 - Schema funzionale del circuito di TIPO I

La figura 52 rappresenta lo schema del circuito TIPO I. In grigio sono indicati i canali d'aria, mentre in verde è illustrato lo schema del sistema di controllo. All'interno dell'impianto, sono presenti i seguenti componenti:

- Batteria di preriscaldamento;
- Batteria di raffreddamento;
- Batteria di post-riscaldamento;
- Batteria per i terminali di riscaldamento;
- Batteria per i terminali di raffreddamento;
- Recuperatore di calore;
- Serranda per il ricircolo;
- Ventilatore di mandata;
- Ventilatore di ritorno;
- Ventilatore associato ai terminali.

Il sistema di controllo è caratterizzato da componenti che effettuano rilevazione della variabile e attuazione sui componenti pertinenti. Questi componenti includono:

- Sensore/attuatore per la batteria di preriscaldamento;
- Sensore/attuatore per la batteria di raffreddamento;
- Sensore/attuatore per la batteria di post-riscaldamento;
- Sensore/attuatore per la batteria per i terminali del riscaldamento;
- Sensore/attuatore per la batteria per i terminali del raffreddamento;
- Sensore/attuatore per la ventilazione nel condotto principale;
- Sensore/attuatore per la ventilazione nel condotto dei terminali;
- Sensore/attuatore per il recuperatore di calore in configurazione invernale;
- Sensore/attuatore per il recuperatore di calore in configurazione estiva.

Questi componenti svolgono un ruolo essenziale nell'assicurare che l'aria venga trattata e distribuita in modo efficace e conforme alle esigenze termiche e di ventilazione dell'ambiente servito. Nei prossimi punti analizzeremo ogni singolo componente e la logica di controllo associata.

### **Batteria di preriscaldamento**

La batteria di preriscaldamento ha la funzione di aumentare la temperatura dell'aria in modo che possa fornire un contributo termico all'ambiente. Questa batteria è alimentata con il fluido termovettore caldo prodotto nella centrale termica ed è regolata attraverso una valvola motorizzata posizionata sulla mandata. A livello *software*, la batteria viene modellata inserendo la sua potenza nominale, che rappresenta la quantità di energia termica che essa fornisce alla portata d'aria, e viene associata alla centrale termica di appartenenza (*HotWaterLoop*), come illustrato nella Figura 51.

Per quanto riguarda il controllo, il *software* non ci consente di modellare la valvola motorizzata; per questo motivo è stato implementato un controllo basato sulla temperatura del flusso d'aria in uscita dalla batteria di preriscaldamento. Come evidenziato nella Figura 53, ci sono due voci importanti per il sensore/attuatore, ovvero la variabile controllata (*Controlled variable*) e la variabile misurata (*Sensed variable*). Nel caso della batteria di preriscaldamento, la variabile misurata è la

temperatura di bulbo secco dell'ambiente servito. Questa temperatura segue un profilo termico di attenuazione di 19°C dalle 05:00 alle 21:00 e di 16°C dalle 21:00 alle 05:00. Il sistema di controllo interviene sulla temperatura in uscita dalla batteria, garantendo che, quando è in funzione, l'aria abbia una temperatura di 22°C.

Un'altra voce importante nei *controller* è il *Time Switch Profile*; in questa sezione è possibile inserire un profilo di tipo binario che consente di impostare la stagionalità dei componenti.

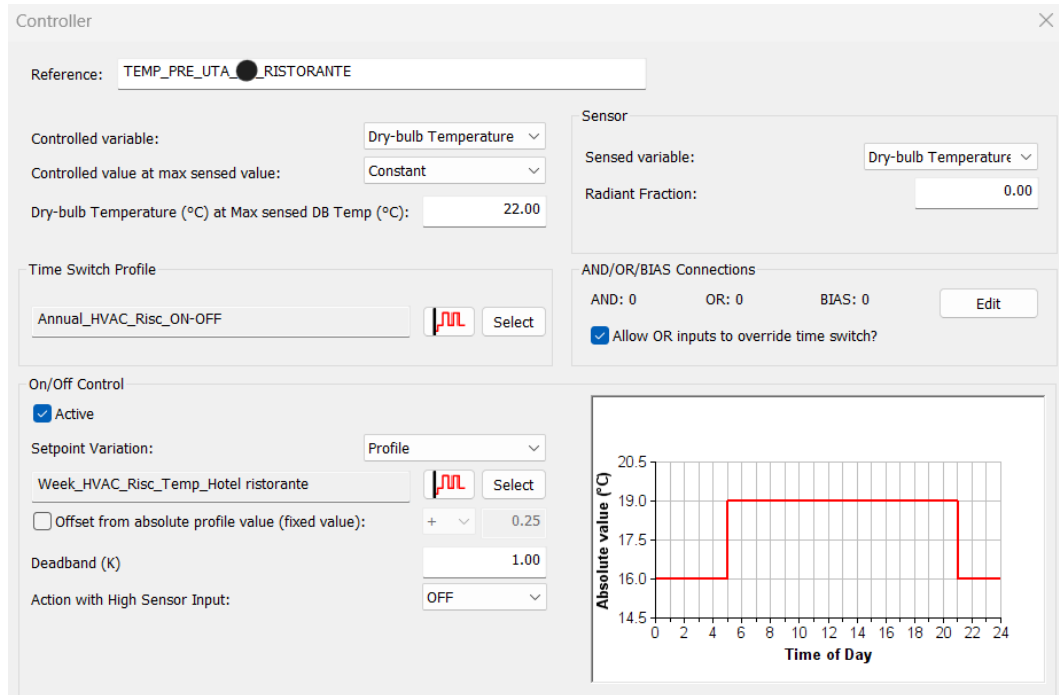


Figura 53 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della batteria di preriscaldamento

La stessa logica di controllo viene usata anche per la regolazione dei terminali di riscaldamento, in quanto il *software* modella i fan-coil come delle batterie, associando una ventilazione interna all'ambiente climatizzato.

## Batteria di raffreddamento

La batteria di raffreddamento ha la funzione di abbassare la temperatura dell'aria in modo da contribuire a raffreddare l'ambiente. Questa batteria è alimentata con il fluido termovettore freddo prodotto nella centrale frigorifera ed è regolata attraverso una valvola motorizzata posizionata sulla mandata. A livello *software*, la batteria viene modellata inserendo la sua potenza nominale, che rappresenta la quantità di energia termica che essa rimuove dalla portata d'aria, e viene associata alla centrale frigorifera di appartenenza (*ChilledLoop*).

Per quanto riguarda il controllo, il *software* non permette di modellare direttamente la valvola motorizzata; quindi, è stato implementato un controllo basato sulla temperatura del flusso d'aria in uscita dalla batteria di raffreddamento. Come mostrato nella Figura 54, ci sono due voci importanti per il sensore/attuatore, ovvero la variabile controllata e la variabile misurata. Nel caso della batteria di raffreddamento, la variabile misurata è la temperatura di bulbo secco dell'ambiente servito. Questa temperatura segue un profilo termico di attenuazione di 26°C dalle

05:00 alle 21:00 e di 30°C dalle 21:00 alle 05:00. Il sistema di controllo regola la temperatura in uscita dalla batteria, garantendo che quando la batteria è attiva, l'aria abbia una temperatura di 15°C, consentendo così una leggera deumidificazione. Anche in questo caso, è possibile impostare un *Time Switch Profile* per gestire la stagionalità dei componenti.

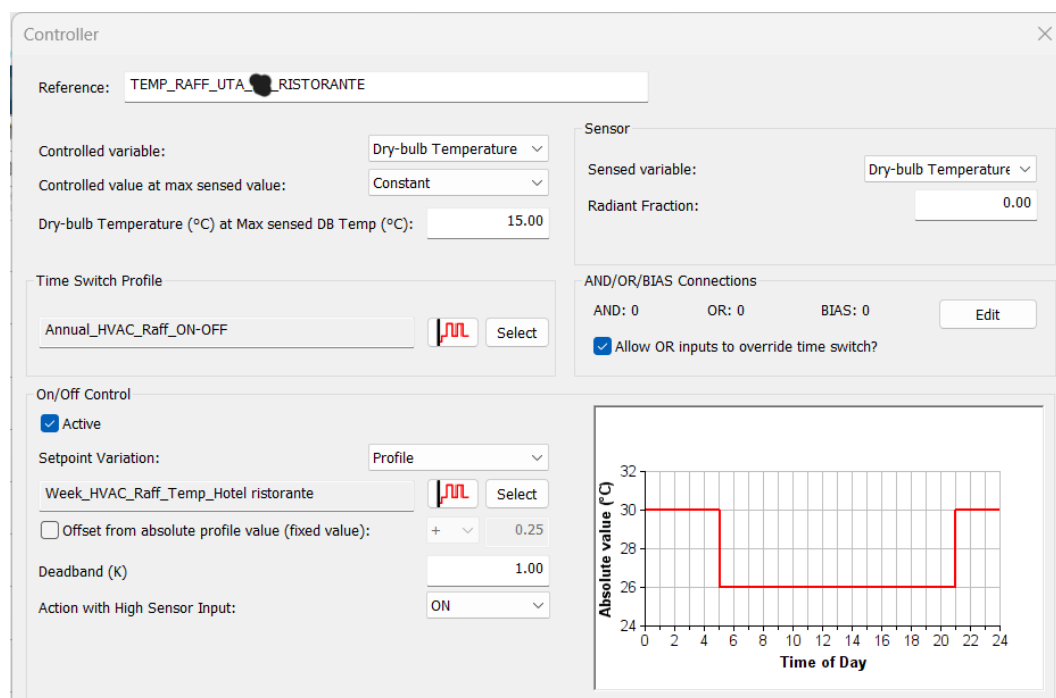


Figura 54 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della batteria di raffreddamento

La stessa logica di controllo viene usata anche per la regolazione dei terminali di raffreddamento, in quanto il *software* modella i fan-coil come delle batterie, associando una ventilazione interna all'ambiente climatizzato.

## Batteria di post-riscaldamento

La batteria di post-riscaldamento ha la funzione di alzare la temperatura dell'aria in modo garantire una temperatura adeguata di immissione in ambiente. Questa batteria è utilizzata nella stagione estiva, siccome è associata alla bassa temperatura dovuta alla batteria di raffreddamento. L'alimentazione della batteria avviene con il fluido termovettore caldo prodotto nella centrale termica ed è regolata attraverso una valvola motorizzata posizionata sulla mandata. A livello *software*, la batteria viene modellata inserendo la sua potenza nominale, che rappresenta la quantità di energia termica che essa fornisce dalla portata d'aria, e viene associata alla centrale termica di appartenenza (*HotWaterLoop*).

È stato implementato un controllo basato sulla temperatura del flusso d'aria in uscita dalla batteria di post-riscaldamento. Come evidenziato nella Figura 55, nel caso della batteria di post-riscaldamento, la variabile misurata è la temperatura di bulbo secco dell'ambiente servito. Questa temperatura segue un profilo termico di attenuazione di 26°C dalle 05:00 alle 21:00 e di 30°C dalle 21:00 alle 05:00. Il sistema di controllo interviene sulla temperatura in uscita dalla batteria, garantendo che, quando è in funzione, l'aria abbia una temperatura di 24°C.

Come nei casi precedenti, è possibile impostare un *Time Switch Profile* per gestire la stagionalità dei componenti. Nonostante sia una batteria calda, il periodo di funzionamento è nella stagione estiva.

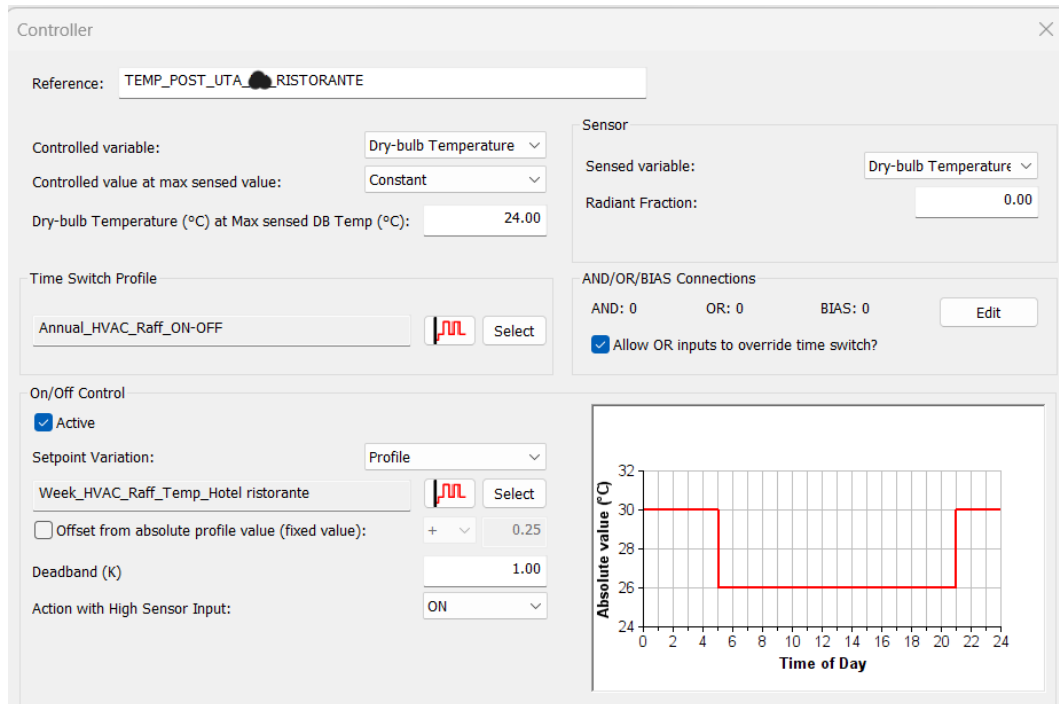


Figura 55 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della batteria di post-riscaldamento

## Ventilazione

La ventilazione ha un ruolo fondamentale nel funzionamento del circuito secondo il *software*; se non c'è alcuna portata d'aria circolante nel condotto principale (maglia generale della Figura 52) tutti i sistemi di controllo e tutti i componenti si spengono. Per questo motivo, sul condotto di aereazione sono posizionati tre controlli che agiscono sul ventilatore di mandata.

La prima operazione da effettuare è inserire nel circuito il ventilatore di mandata e di ritorno e, tramite un *popup*, si inseriscono le caratteristiche associate, come mostrato nella Figura 56. Come per le pompe, il *software* usa la funzione *autosize* che permette di ricavare tutti i valori riferiti al ventilatore solamente inserendo la portata d'aria, la prevalenza e i rendimenti sia del motore elettrico che della ventola. I consumi elettrici della ventilazione possono essere associati ad un *meter* dedicato, in questo modo, quando si effettuerà la calibrazione, sarà possibile determinare su quale utilizzatore intervenire affinché lo scostamento tra i dati del modello e quelli reali sia il più basso possibile.

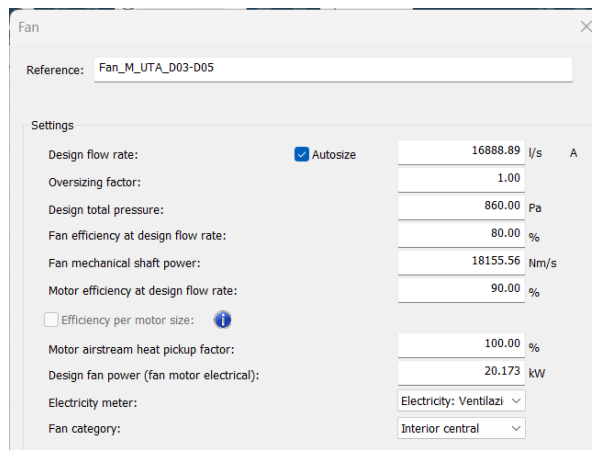


Figura 56 - Caratteristiche tecniche del ventilatore di mandata

Come detto in precedenza, la ventilazione è gestita da tre sistemi di controllo, due in cui la variabile misurata è la temperatura in ambiente e l'altro in cui è misurata la concentrazione di CO<sub>2</sub>.

Il sistema di controllo della ventilazione basato sulla temperatura invernale è utilizzato per garantire la portata di ventilazione affinché i componenti del circuito si attivino e siano in grado di garantire le richieste dell'ambiente.



Figura 57 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della ventilazione nella configurazione nei mesi invernali

Nell'esempio, Figura 57, possiamo notare che la variabile misurata è la temperatura di bulbo secco nell'ambiente, mentre la variabile controllata è la portata d'aria con valore costante, dato che i ventilatori delle UTA nel nostro edificio lavorano a velocità fissa. Come mostrato dal grafico, se la temperatura misurata scende sotto i 19°C il ventilatore di mandata si attiva e si spegne quando si supera il *set-point*, considerando una *deadband* di 1 K. La *deadband* è una piccola variazione di



temperatura entro la quale il controllo rimane inattivo per evitare cicli frequenti di accensione e spegnimento.

Similmente, il sistema di controllo della ventilazione basato sulla temperatura estiva è progettato per assicurare una portata d'aria adeguata in modo che i componenti del circuito possano entrare in funzione e soddisfare le esigenze termiche dell'ambiente durante la stagione estiva. In questa configurazione, la temperatura è il fattore di controllo utilizzato per regolare la ventilazione e garantire che l'aria trattata sia a una temperatura adeguata per mantenere il comfort termico dell'ambiente servito.

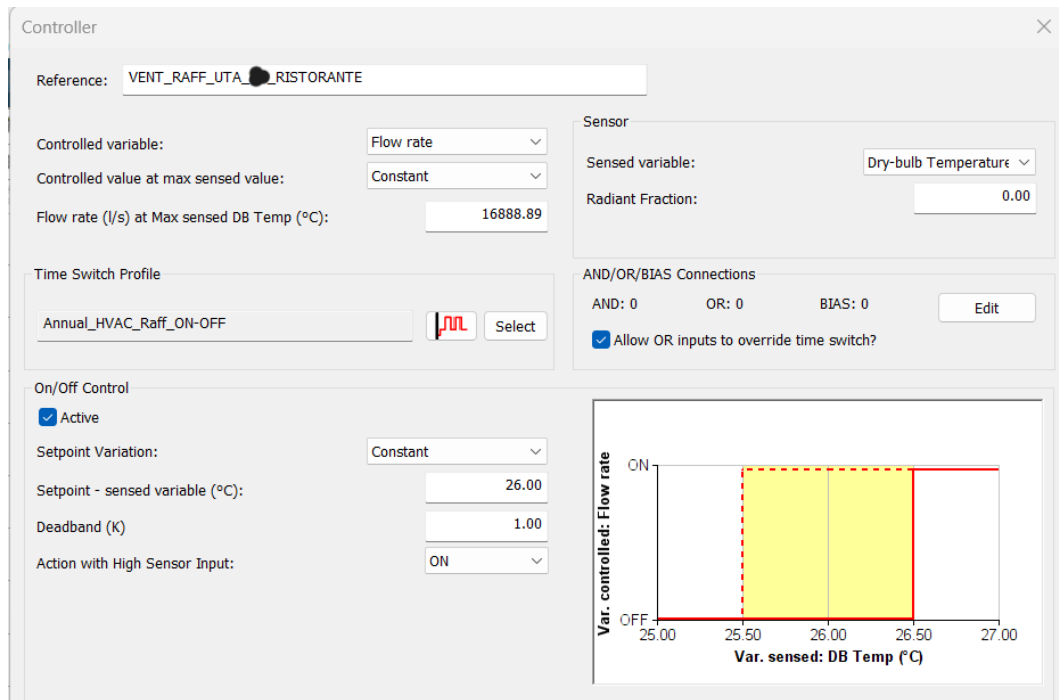


Figura 58 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della ventilazione nella configurazione nei mesi estivi

Nell'esempio della Figura 58, la variabile misurata è la temperatura di bulbo secco nell'ambiente, mentre la variabile controllata è la portata d'aria, che ha un valore costante poiché i ventilatori delle UTA nell'edificio operano a velocità fissa. Come mostrato nel grafico, quando la temperatura misurata supera i 26°C, il ventilatore si attiva e rimane attivo fino a quando la temperatura scende sotto il setpoint, con una *deadband* di 1 K.

L'ultimo controllo sulla ventilazione è effettuato mediante la misurazione della concentrazione di CO<sub>2</sub> in ambiente; questo controllo è stato inserito per permettere al sistema di funzionare nel caso in cui gli apporti interni non permettano l'attivazione della ventilazione in base alla temperatura. Quindi, questo sensore non è presente in tutto l'edificio, ma a livello di modello è utile per il funzionamento dei circuiti.

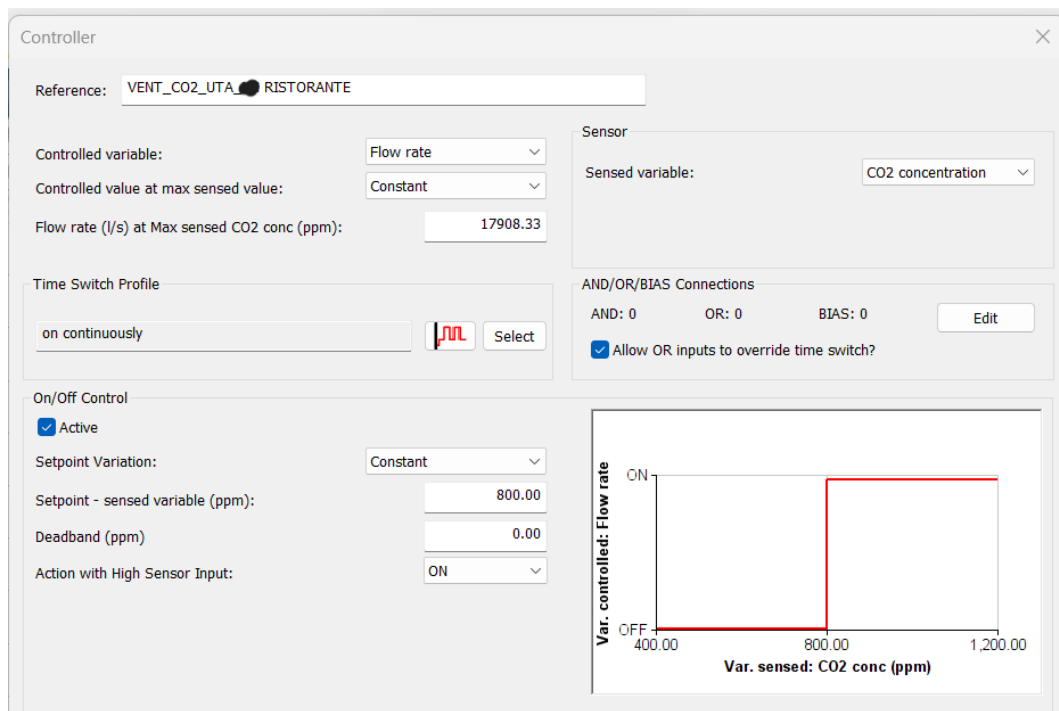


Figura 59 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione della ventilazione in base alla concentrazione della CO2

Il funzionamento è abbastanza simile agli altri controllori, figura 59, solo che in questo caso la variabile misurata è la concentrazione di CO2. Se nell'ambiente la CO2 supera gli 800 ppm, il ventilatore si attiva, consentendo il ricambio d'aria nell'ambiente e nel caso fosse necessario, le batterie forniranno dell'energia termica per garantire il comfort. In questo caso il *Time Switch Profile* è impostato con il profilo *on continuously*, siccome questo controllore deve lavorare tutto l'anno.

## Recuperatore di calore

Il recuperatore di calore nelle unità di trattamento dell'aria è un componente essenziale per il controllo dell'efficienza energetica e del comfort termico in un edificio. Il suo ruolo principale è quello di recuperare e riutilizzare l'energia termica contenuta nell'aria di espulsione proveniente dagli ambienti interni e di preriscaldare o preraffreddare l'aria esterna che viene introdotta nell'edificio. In questo modo, si riduce la necessità di riscaldare o raffreddare l'aria esterna in modo completo, contribuendo a risparmiare energia e riducendo i costi operativi.

Nel *software* il recuperatore di calore è modellato mediante un componente apposito; le caratteristiche richieste sono l'efficienza di recupero del calore sensibile e latente. Un dato aggiuntivo richiesto nella configurazione del recuperatore è la potenza elettrica per la movimentazione del fluido (recuperatore a batterie d'acqua glicolata).

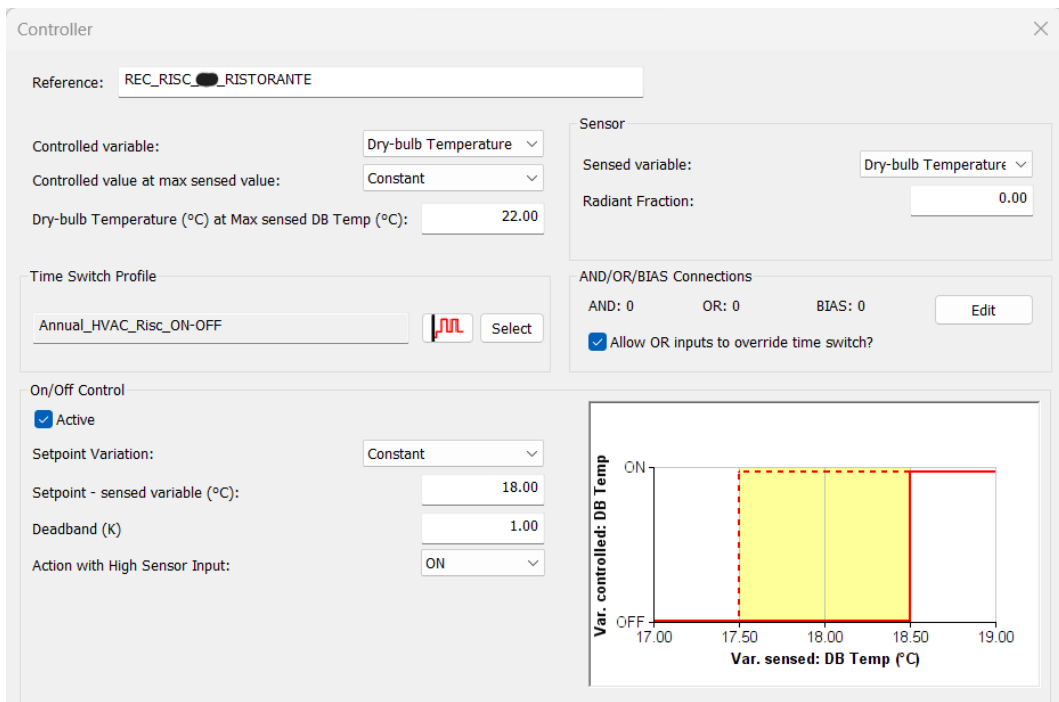


Figura 60 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione del recuperatore di calore nella stagione invernale

Il sistema di controllo è basato sulla temperatura del flusso d'aria che attraversa il recuperatore. Come mostrato nella Figura 60, ci sono due voci importanti per il sensore/attuatore, ovvero la variabile controllata e la variabile misurata. Nel caso in questione, la variabile misurata è la temperatura di bulbo secco dell'ambiente servito. Se la temperatura è maggiore di 18°C il sistema di recupero del calore è attivo. Il sistema di controllo regola la temperatura in uscita dal recuperatore, cercando di ottenere una temperatura di 22°C in uscita. Anche in questo caso, si è impostato un *Time Switch Profile* per gestire la stagionalità del componente.

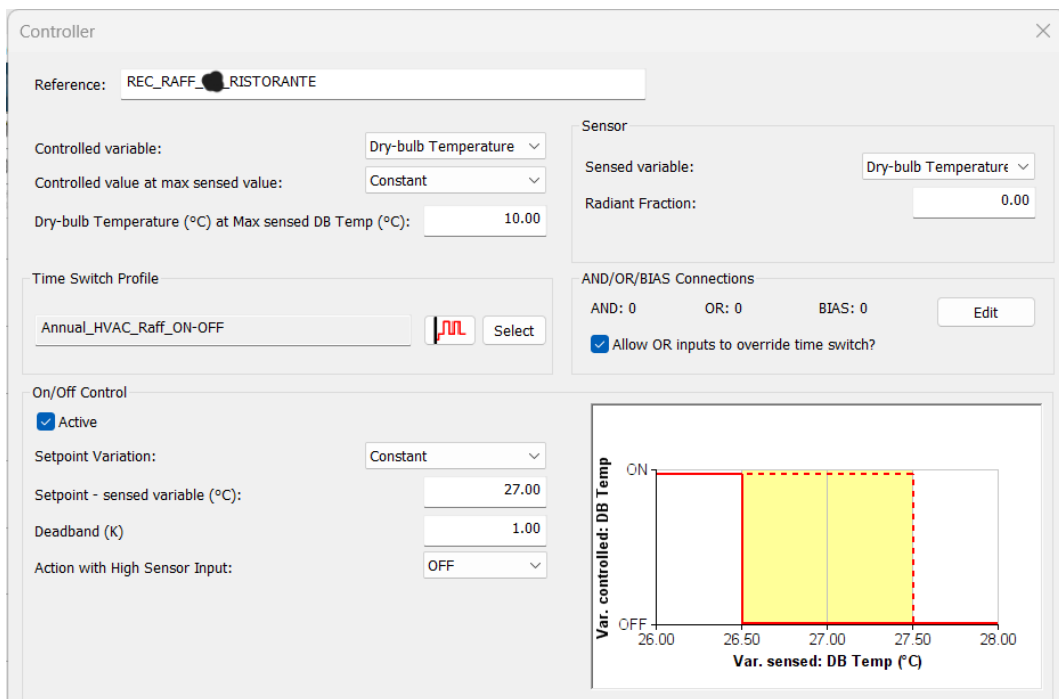


Figura 61 - Esempio di sistema di controllo e di attuazione del recuperatore di calore nella stagione estiva

Il sistema di controllo è basato sulla temperatura del flusso d'aria che attraversa il recuperatore, come mostrato nella Figura 61. In questo caso, la variabile misurata è la temperatura di bulbo secco dell'ambiente servito. Se la temperatura è minore di 27°C il sistema di recupero del calore è attivo. Il sistema di controllo regola la temperatura in uscita dal recuperatore, cercando di ottenere una temperatura di 10°C in uscita. Anche in questo caso, si è impostato un *Time Switch Profile* per gestire la stagionalità del componente.

## Ricircolo

La portata di ricircolo nelle UTA è la quantità di aria interna dell'edificio che viene estratta dagli ambienti interni, trattata e quindi reinserita negli stessi spazi, anziché essere espulsa all'esterno. Il ricircolo dell'aria è utilizzato per vari scopi, tra cui il risparmio energetico e il mantenimento di condizioni ambientali confortevoli.

La modellizzazione del sistema di ricircolo sul *software IES VE* è molto semplice; inserendo il componente di ricircolo nel circuito, appare un *popup* (Figura 62) in cui è possibile inserire la portata massima di aria che deve provenire dall'esterno associata ad un profilo modulare di occupazione. La portata reale di aria esterna in entrata nell'UTA è data dal prodotto della portata inserita e il profilo di occupazione.

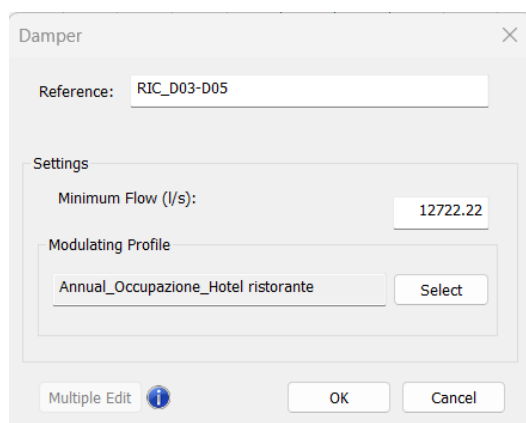


Figura 62 - Caratteristiche tecniche del ricircolo d'aria

## Schemi dei circuiti

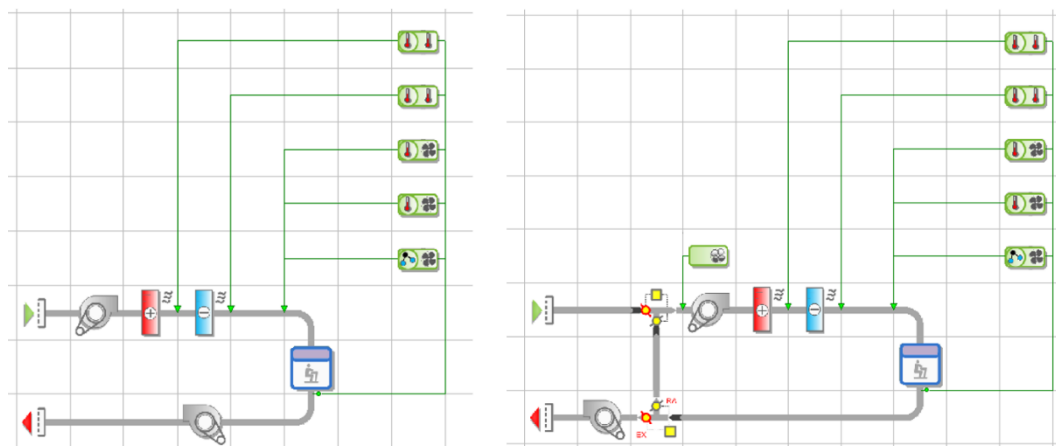


Figura 63 - Schema funzionale del circuito tipo A (sinistra) e tipo B (destra)

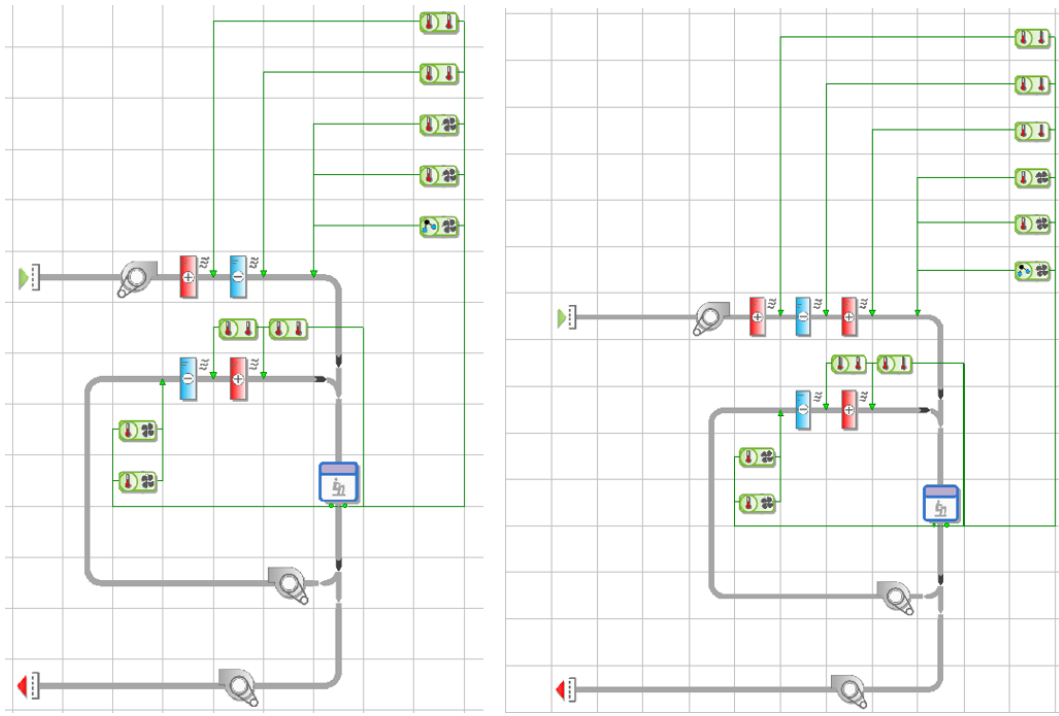


Figura 64 - Schema funzionale del circuito tipo C (sinistra) e tipo F (destra)

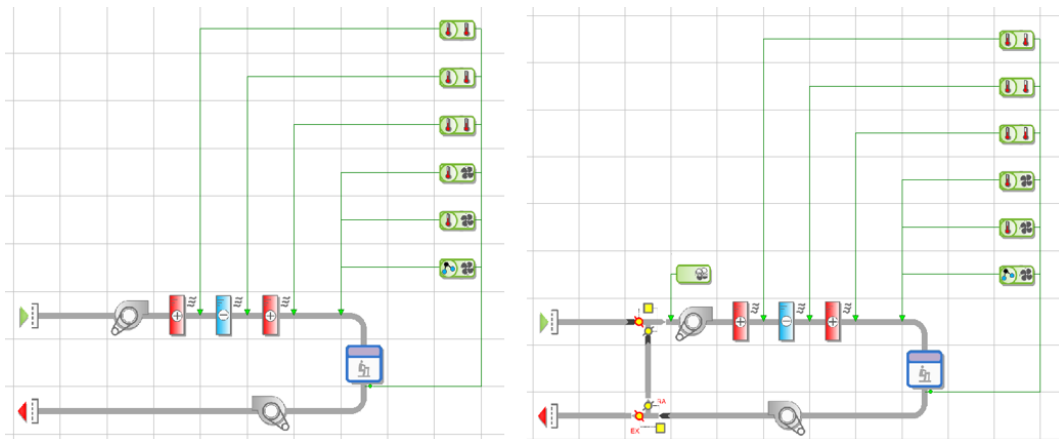


Figura 65 - Schema funzionale del circuito tipo D (sinistra) e tipo E (destra)

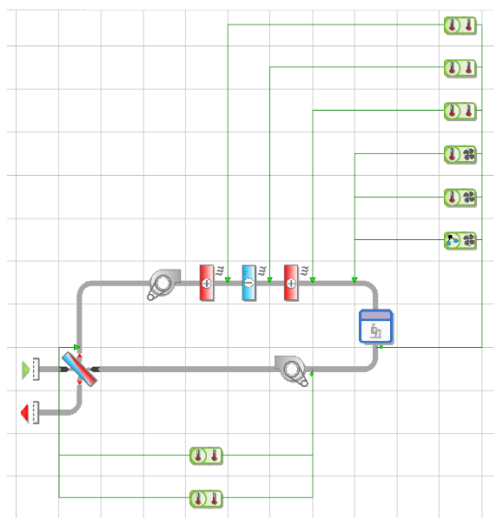


Figura 66 - Schema funzionale del circuito tipo G

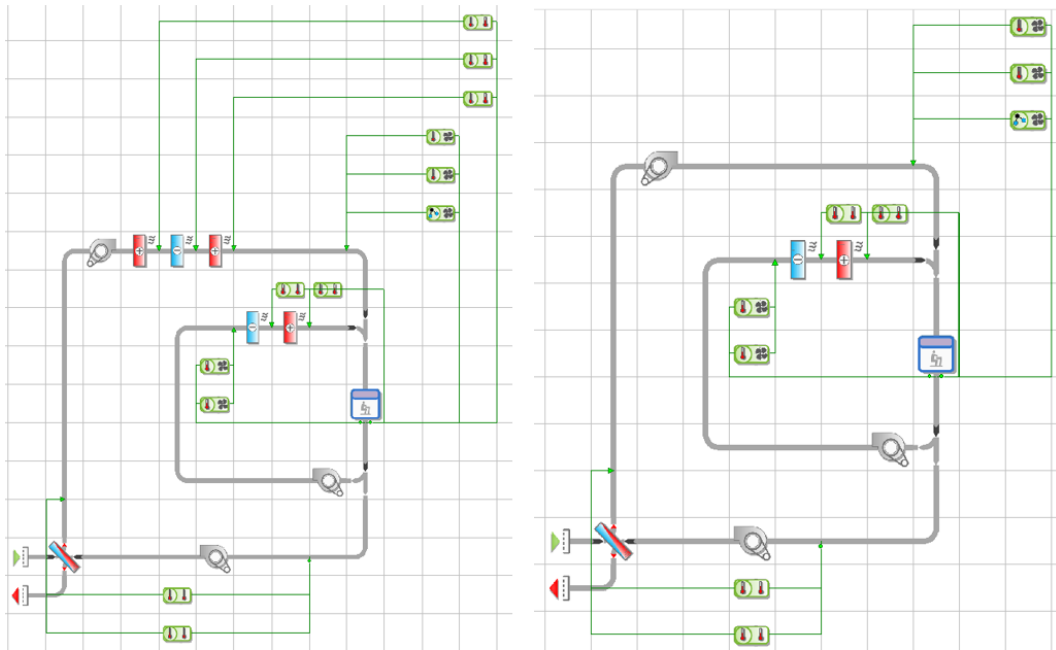


Figura 67 - Schema funzionale del circuito tipo H (sinistra) e tipo L (destra)

#### 4.7.4 Schema di massima dei collegamenti alle centrali

Fase 1	Fase 2	Fase 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centro fiere</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auditorium</li> <li>• Centro congressi</li> <li>• Cinema</li> <li>• Galleria f2</li> <li>• Ristorante</li> <li>• Struttura alberghiera 1</li> <li>• Torre centrale</li> <li>• Torre sud</li> <li>• Uffici</li> <li>• Uffici pt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clinica</li> <li>• Galleria f3</li> <li>• Struttura alberghiera 2</li> <li>• Struttura alberghiera 3</li> <li>• Uffici f3</li> <li>• Università</li> </ul>

Figura 68 - Schema delle zone termiche collegate alle diverse centrali

### 4.8 Risultati della simulazione e calibrazione

In questo paragrafo, condurremo un'analisi critica dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello dell'edificio che è stato creato in precedenza. L'obiettivo principale sarà valutare la precisione del modello e identificare le aree in cui è necessario apportare modifiche al fine di ottenere una calibrazione più accurata. Durante questa fase, esamineremo attentamente i dati di simulazione alla luce dei dati reali e delle prestazioni registrate nell'edificio. Sarà importante identificare eventuali discrepanze significative tra i risultati del modello e i dati effettivi, e analizzare le possibili cause di tali discrepanze.

Successivamente, procederemo con le modifiche necessarie al modello al fine di migliorarne la corrispondenza con i dati reali. Queste modifiche potrebbero riguardare parametri specifici degli impianti, delle strutture o delle condizioni ambientali. L'obiettivo sarà ottenere indici di calibrazione accettabili, che indichino una buona aderenza tra i risultati della simulazione e i dati reali.

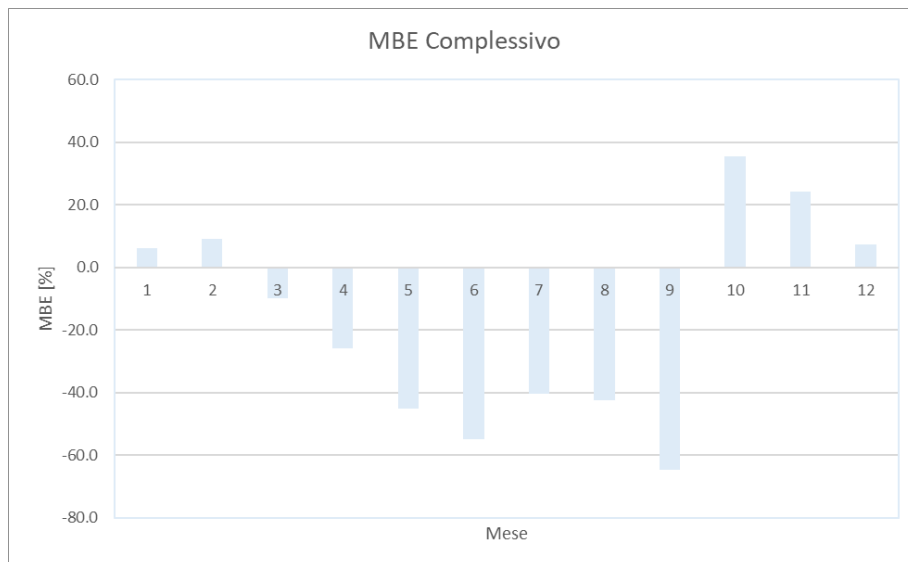
#### 4.8.1 Risultati della simulazione

La simulazione dinamica è stata condotta con il file climatico di Torino, corretto con la temperatura esterna rilevata dalle sonde presenti nell'edificio. I consumi reali sono corrispondenti all'anno 2022; i consumi elettrici reali sono divisi per illuminazione della zona termica GALLERIA e i consumi elettrici dovuti alle centrali tecnologiche di fase 1, 2 e 3. I consumi del teleriscaldamento sono suddivisi per le tre centrali termiche. Considerando che le centrali di fase 2 e 3 sono collegate sulla stessa dorsale non è possibile effettuare una calibrazione sulle singole centrali, in quanto durante certi periodi dell'anno, è attiva solo una di esse. Per l'accordo di riservatezza e essendo dati sensibili, non sarà possibile mostrare i consumi reali dell'edificio, ma mostreremo solo lo scostamento tra i consumi reali e simulati e l'indice MBE per le suddivisioni precedentemente citate.

MESE	Scostamento centrale F1 [%]	Scostamento centrale F2 e F3 [%]	Scostamento Complessivo [%]	MBE centrale F1 [%]	MBE Centrale F2 e F3 [%]	MBE Complessivo [%]
Gennaio	134.7	2.0	12.9	40.2	1.0	6.1
Febbraio	75.7	13.2	20.2	27.5	6.2	9.2
Marzo	-29.0	-16.4	-18.1	-17.0	-8.9	-9.9
Aprile	-42.5	-40.9	-41.1	-27.0	-25.7	-25.8
Maggio		-65.6	-62.1		-48.9	-45.0
Giugno		-70.8	-70.8		-54.8	-54.8
Luglio		-57.4	-57.4		-40.2	-40.2
Agosto		-59.7	-59.7		-42.5	-42.5
Settembre		-78.5	-78.5		-64.6	-64.6
Ottobre		90.3	110.6		31.1	35.6
Novembre	138.7	55.5	64.1	40.9	21.7	24.3
Dicembre	101.1	6.9	15.7	33.6	3.4	7.3
Totale	172.2	-4.6	2.1	26.5	-2.3	1.0

Tabella 26 - Scostamento e MBE in base ai consumi termici reali del teleriscaldamento

La Tabella 26 riporta gli scostamenti tra i consumi energetici previsti dal modello e i consumi effettivi, insieme all'Indice di Errore Medio (MBE). È evidente che, se consideriamo i valori annuali, i consumi predetti dal modello sono abbastanza simili a quelli reali. Tuttavia, nell'ambito della calibrazione che eseguiremo successivamente, concentreremo gli sforzi per ridurre ulteriormente le discrepanze mese per mese, al fine di rendere il modello più affidabile e preciso. La Tabella 26 suggerisce che i consumi del modello per la centrale di fase 1 sono sovrastimati, con una differenza del 172,2% rispetto ai consumi effettivi, mentre i consumi previsti per le fasi 2 e 3 sono leggermente inferiori, con una discrepanza del 4,6%. Queste discrepanze possono derivare da varie fonti, tra cui parametri imprecisi del modello, dati di ingresso non correttamente calibrati o variazioni reali nei comportamenti degli utenti o nelle condizioni ambientali che non sono state pienamente considerate nel modello.



**Figura 69 - MBE complessivo per i consumi del teleriscaldamento**

La calibrazione mese per mese sarà un passo importante per affinare ulteriormente il modello e garantire una rappresentazione accurata delle prestazioni energetiche dell'edificio in tutte le condizioni stagionali.

MESE	Scostamento Illuminazione [%]	Scostamento Elettrico [%]	MBE Illuminazione [%]	MBE Elettrico [%]
Gennaio	273.5	-71.7	57.8	-55.9
Febbraio	304.0	-75.4	60.3	-60.5
Marzo	352.8	-79.1	63.8	-65.5
Aprile	380.0	-78.3	65.5	-64.4
Maggio	362.8	-80.7	64.5	-67.6
Giugno	340.5	-70.3	63.0	-54.3
Luglio	335.3	-56.3	62.6	-39.2
Agosto	364.1	-58.8	64.5	-41.6
Settembre	425.7	-73.1	68.0	-57.5
Ottobre	400.2	-72.2	66.7	-56.5
Novembre	440.1	-64.3	68.8	-47.4
Dicembre	386.1	-62.0	65.9	-44.9
Totale	359.3	-68.6	64.2	-52.2

**Tabella 27 - Scostamento e MBE in base ai consumi elettrici reali dell'illuminazione e del tecnologico**

La Tabella 27 mostra gli scostamenti tra i consumi elettrici del modello e quelli reali; in questo caso si nota un grande divario tra la situazione reale dell'edificio e quella del modello. Lo scostamento riferito all'illuminazione è pari 359,3% mentre i consumi elettrici delle centrali termiche e frigorifere riportano un scostamento del -68,6%.



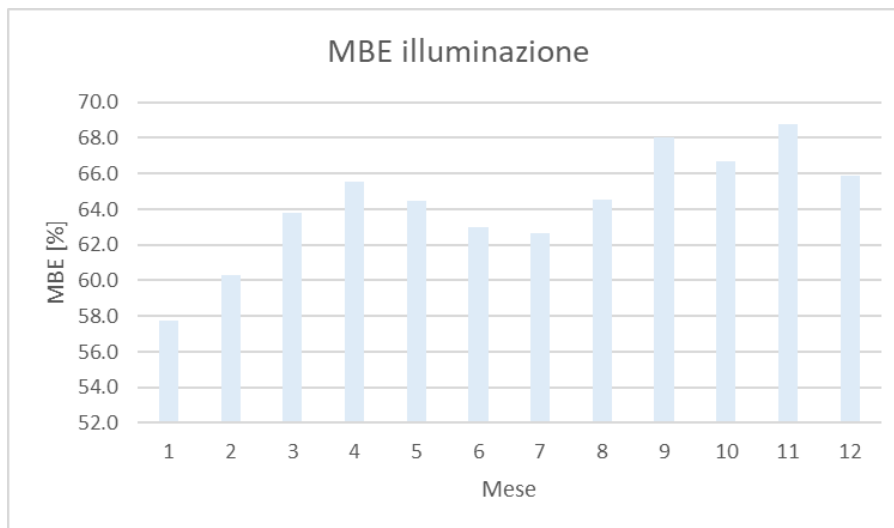


Figura 70 - MBE per i consumi di illuminazione

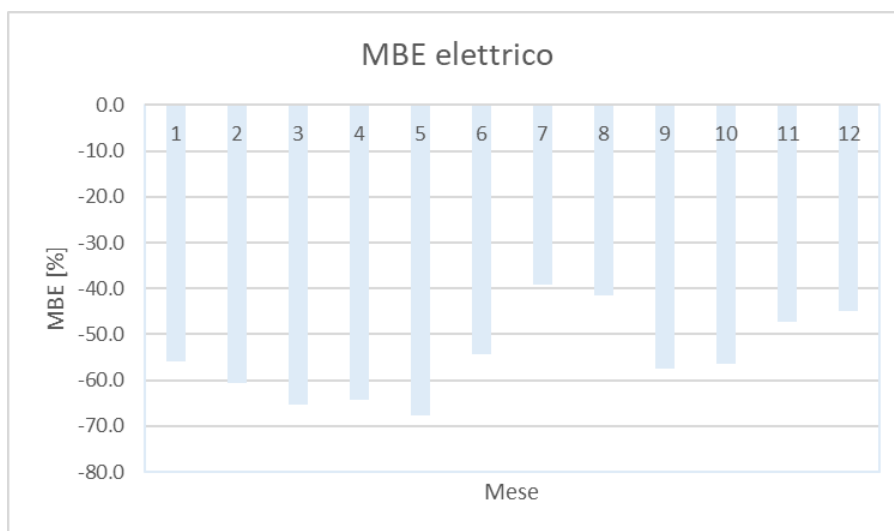


Figura 71 - MBE per i consumi delle centrali tecnologiche

#### 4.8.2 Prima calibrazione

L'analisi dei risultati della simulazione suggerisce che le discrepanze riscontrate sono principalmente dovute alla modellazione degli impianti, in particolare ai consumi elettrici, che presentano scostamenti significativi rispetto ai dati reali. Inoltre, sembra che le discrepanze relative alle centrali tecnologiche e all'illuminazione non varino notevolmente nei diversi mesi dell'anno.

Da queste osservazioni, è possibile dedurre che una delle principali cause di tali scostamenti potrebbe essere il sovradimensionamento o la sottostima delle potenze installate per i sistemi tecnologici e l'illuminazione nell'ambito del modello. Questo significa che i consumi previsti dal modello potrebbero essere superiori o inferiori a quelli effettivamente registrati. Ridimensionare accuratamente queste potenze potrebbe contribuire a ridurre le discrepanze tra i consumi previsti e quelli reali.

MESE	Scostamento Illuminazione [%]	Scostamento Elettrico [%]	MBE Illuminazione [%]	MBE Elettrico [%]
Gennaio	96.0	-68.6	32.4	-52.2
Febbraio	111.1	-72.2	35.7	-56.5
Marzo	136.7	-75.8	40.6	-61.0
Aprile	151.7	-74.9	43.1	-59.9
Maggio	142.4	-80.4	41.6	-67.2
Giugno	130.7	-71.4	39.5	-55.6
Luglio	127.4	-57.2	38.9	-40.1
Agosto	143.0	-59.7	41.7	-42.5
Settembre	174.7	-74.0	46.6	-58.7
Ottobre	161.4	-68.3	44.7	-51.8
Novembre	182.8	-59.3	47.8	-42.1
Dicembre	155.4	-57.6	43.7	-40.4
Totale	140.4	-67.7	41.2	-51.2

Tabella 28 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la prima calibrazione

Nella prima calibrazione si è interagito solo con i consumi elettrici, dato che la modifica della parte degli impianti potrebbe portare modifiche anche ai risultati sul teleriscaldamento. Interagendo sul sistema di teleriscaldamento non riusciremmo a capire se le modifiche effettuate sono stati utili alla calibrazione.

Considerando la grande discrepanza per l'illuminazione, è stato effettuato un controllo sulle zone termiche associate al *meter*, infatti era presente una zona termica che non andava considerata. La Tabella 28 mostra che con questa operazione, lo scostamento dell'illuminazione si è ridotto al 140,4%.

Per quanto riguarda i consumi derivati dalle centrali tecnologiche, si è optato per la riduzione dei rendimenti elettrici ed idraulici dei gruppi pompaggio di riscaldamento e raffreddamento; abbiamo ridotto il rendimento idraulico dal 80% al 60%, mentre, quello elettrico da 90% ad 80%. Questa operazione ha portato ad un aumento del 1% dello scostamento, questo ci fa capire che dobbiamo interagire anche su altri elementi che consumano energia elettrica per calibrare il modello.

	Scostamento centrale F1 [%]	Scostamento centrale F2 e F3 [%]	Scostamento Complessivo [%]	MBE centrale F1 [%]	MBE Centrale F2 e F3 [%]	MBE Complessivo [%]
Gennaio	134.7	3.2	14.0	40.2	1.6	6.5
Febbraio	75.7	15.1	21.8	27.5	7.0	9.8
Marzo	-29.0	-14.2	-16.2	-17.0	-7.6	-8.8
Aprile	-42.5	-38.7	-39.1	-27.0	-24.0	-24.3
Maggio		-64.5	-61.0		-47.6	-43.9
Giugno		-70.9	-70.9		-54.9	-54.9
Luglio		-57.5	-57.5		-40.4	-40.4
Agosto		-59.8	-59.8		-42.6	-42.6
Settembre		-78.6	-78.6		-64.8	-64.8
Ottobre		98.6	118.8		33.0	37.3
Novembre	138.7	58.3	66.7	40.9	22.6	25.0
Dicembre	101.1	8.2	16.9	33.6	4.0	7.8
Totale	172.2	-2.9	3.6	26.5	-1.5	1.8

Tabella 29 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento dopo la prima calibrazione

Come si poteva immaginare, gli scostamenti del riscaldamento sono mutati per le centrali termiche di fase 2 e 3, avvicinando i consumi del modello ai consumi reali.

### 4.8.3 Seconda calibrazione

I nuovi risultati indicano una riduzione degli scostamenti, ma risultano ancora elevati. Nella seconda calibrazione interverremo nuovamente sulle caratteristiche modificate nella prima calibrazione in più agiremo su altri componenti elettrici, che in precedenza non sono stati modificati.

MESE	Scostamento		MBE	
	Illuminazione [%]	Elettrico [%]	Illuminazione [%]	Elettrico [%]
Gennaio	57.7	-49.8	22.4	-33.1
Febbraio	69.4	-55.8	25.8	-38.7
Marzo	90.0	-62.4	31.0	-45.4
Aprile	102.5	-63.0	33.9	-46.0
Maggio	94.8	-74.3	32.2	-59.1
Giugno	85.4	-64.9	29.9	-48.0
Luglio	82.4	-49.6	29.2	-33.0
Agosto	95.3	-51.8	32.3	-34.9
Settembre	120.4	-66.9	37.6	-50.3
Ottobre	109.8	-54.2	35.4	-37.2
Novembre	127.3	-36.0	38.9	-21.9
Dicembre	105.7	-32.7	34.6	-19.5
<b>Totale</b>	<b>93.2</b>	<b>-57.1</b>	<b>31.8</b>	<b>-39.9</b>

Tabella 30 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la seconda calibrazione

La calibrazione dei consumi elettrici è stata effettuata variando i seguenti dati del modello:

- Riduzione della potenza elettrica per unità di superficie dell'illuminazione della zona termica GALLERIA da 12 W/m<sup>2</sup> a 8 W/m<sup>2</sup>;
- Riduzione del rendimento idraulico delle pompe di circolazione da 60% a 50%;
- Riduzione del rendimento elettrico dei motori associati al gruppo pompe da 80% a 70%.

Con queste operazioni di calibrazione appena citate, abbiamo ridotto lo scostamento di illuminazione dal 140,4% al 93,2%. Mentre, lo scostamento per le centrali tecnologiche si è aumentato dal -67,7% al -57,1%.

In questo caso, siamo intervenuti anche sul teleriscaldamento associato alla centrale di fase 1, in modo tale da ridurre lo scostamento.

MESE	Scostamento centrale F1 [%]	Scostamento centrale F2 e F3 [%]	Scostamento Complessivo [%]	MBE centrale F1 [%]	MBE Centrale F2 e F3 [%]	MBE Complessivo [%]
Gennaio	133.1	1.5	12.3	40.0	0.7	5.8
Febbraio	74.4	13.1	19.9	27.1	6.2	9.1
Marzo	-29.6	-16.1	-17.9	-17.4	-8.7	-9.8
Aprile	-43.0	-40.5	-40.8	-27.4	-25.4	-25.6
Maggio		-66.2	-62.7		-49.4	-45.6
Giugno		-72.2	-72.2		-56.5	-56.5
Luglio		-59.0	-59.0		-41.9	-41.9
Agosto		-61.2	-61.2		-44.1	-44.1
Settembre		-79.6	-79.6		-66.1	-66.1
Ottobre		92.0	112.1		31.5	35.9
Novembre	136.9	55.3	63.7	40.6	21.7	24.2
Dicembre	99.7	6.4	15.1	33.3	3.1	7.0
Totale	170.9	-4.9	1.7	26.2	-2.5	0.8

**Tabella 31 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento dopo la seconda calibrazione**

L'operazione effettuata sulla calibrazione del modello della centrale termica di fase 1 consiste nella riduzione dei giorni di accensione dell'impianto passando da 3 a 2 giorni a settimana. Questa operazione è giustificata dal fatto che il centro fiere, in linea generale, non ospita eventi tutti i giorni, di conseguenza la sua occupazione è molto stocastica; infatti, anche dai risultati della calibrazione si nota che ci sono dei valori completamente discordanti tra i mesi; questo perché non siamo a conoscenza degli eventi che sono stati svolti nel 2022. La soluzione a questo problema è risolta calibrando solo sull'anno e non sul mese. La riduzione dei giorni di accensione dell'impianto ha portato a una riduzione di circa il 2% sullo scostamento.

#### 4.8.4 Terza calibrazione

Dalla calibrazione precedentemente effettuata, analizzando mese per mese, si nota che i valori di scostamento per il tecnologico sono più alti nei mesi estivi. Da questa osservazione andremo ad interagire sull'impianto di raffreddamento.

MESE	Scostamento Illuminazione [%]	Scostamento Elettrico [%]	MBE Illuminazione [%]	MBE Elettrico [%]
Gennaio	25.7	-6.3	11.4	-3.3
Febbraio	35.7	-17.5	15.1	-9.6
Marzo	52.1	-29.9	20.7	-17.6
Aprile	61.4	-32.2	23.5	-19.2
Maggio	55.6	-56.3	21.8	-39.2
Giugno	48.1	-42.0	19.4	-26.6
Luglio	46.1	-19.2	18.7	-10.6
Agosto	56.0	-22.0	21.9	-12.4
Settembre	76.5	-44.3	27.7	-28.4
Ottobre	68.0	-17.0	25.4	-9.3
Novembre	81.6	19.5	29.0	8.9
Dicembre	63.6	26.0	24.1	11.5
Totale	54.4	-26.0	21.4	-14.9

**Tabella 32 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la terza calibrazione**

Dall'osservazione precedentemente fatta e per ridurre ancor di più il *gap* tra i consumi reali e modellati, si sono effettuate le seguenti operazioni:

- Riduzione del rendimento della ventola del ventilatore associati alle UTA da 80% a 50%;
- Riduzione del rendimento elettrico dei motori associati ai ventilatori delle UTA da 90% a 70%;
- Riduzione della potenza elettrica per unità di superficie dell'illuminazione della zona termica GALLERIA da 8 W/m<sup>2</sup> a 6 W/m<sup>2</sup>;
- Aumento della potenza nominale dei ventilatori delle torri evaporative da 150 kW a 400 kW.

Dalle operazioni effettuate sul modello gli scostamenti relativi ai consumi elettrici si sono ridotti, rendendo più accurato il modello ma non abbastanza per fermarci. Dalla Tabella 32 si nota una riduzione di circa il 40% sui consumi per illuminazione e una riduzione superiore al 30% sui consumi del tecnologico.

#### 4.8.5 Quarta calibrazione

In base ai dati della calibrazione 3, nella calibrazione 4 del modello abbiamo modificato alcuni parametri, sia per i consumi elettrici che per i consumi per riscaldamento. Le modifiche effettuate nel modello sono:

- Riduzione della potenza elettrica per unità di superficie dell'illuminazione della zona termica GALLERIA da 6 W/m<sup>2</sup> a 4 W/m<sup>2</sup>;
- Aumento della potenza nominale dei ventilatori delle torri evaporative da 400 kW a 650 kW;
- Aumento della richiesta della produzione di acqua calda sanitaria posta a disposizione per le strutture alberghiere;
- Riduzione dell'accensione dell'impianto del centro fiere da 2 a 1 giorno a settimana;
- Riduzione della temperatura di *set back* da 10°C a 5°C quando il centro fiere non ospita eventi.

Queste operazioni hanno reso il modello più affidabile, come mostrato dalle tabelle sottostanti.

	Scostamento centrale F1 [%]	Scostamento centrale F2 e F3 [%]	Scostamento Complessivo [%]	MBE centrale F1 [%]	MBE Centrale F2 e F3 [%]	MBE Complessivo [%]
Gennaio	67.8	-7.2	-1.0	25.3	-3.7	-0.5
Febbraio	11.8	2.3	3.4	5.6	1.1	1.7
Marzo	-69.2	-8.1	-16.3	-52.9	-4.2	-8.8
Aprile	-77.2	-24.6	-30.5	-62.8	-14.0	-18.0
Maggio		-14.5	-13.6		-7.8	-7.3
Giugno		1.3	1.3		0.7	0.7
Luglio		28.2	28.2		12.4	12.4
Agosto		21.4	21.4		9.6	9.6
Settembre		-22.6	-22.6		-12.8	-12.8
Ottobre		44.2	50.3		18.1	20.1
Novembre	43.7	38.8	39.3	17.9	16.2	16.4
Dicembre	43.9	-3.3	1.1	18.0	-1.7	0.5
Totale	108.7	-0.2	0.5	4.2	-0.1	0.3

Tabella 33 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento dopo la quarta calibrazione

MESE	Scostamento		MBE	
	Illuminazione [%]	Elettrico [%]	Illuminazione [%]	Elettrico [%]
Gennaio	-17.8	10.0	-9.8	4.8
Febbraio	-11.7	-4.4	-6.2	-2.3
Marzo	-0.9	-18.8	-0.5	-10.4
Aprile	5.4	-21.5	2.6	-12.0
Maggio	1.6	-40.5	0.8	-25.4
Giugno	-3.4	-15.8	-1.7	-8.6
Luglio	-5.0	16.5	-2.6	7.6
Agosto	1.8	13.7	0.9	6.4
Settembre	14.8	-19.4	6.9	-10.7
Ottobre	9.3	-2.4	4.4	-1.2
Novembre	18.5	36.9	8.5	15.6
Dicembre	7.1	46.9	3.4	19.0
Totale	0.7	-2.3	0.3	-1.2

**Tabella 34 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico dopo la quarta calibrazione**

Di buona norma, un modello si ritiene accettabile se l'indice MBE tra i consumi reali e quelli simulati è inferiore al  $\pm 5\%$  se si considera tutto l'anno, invece del  $\pm 10\%$  se si considera solo il mese.

Dalle Tabelle 33 e 34 si può notare che i valori critici si sono ridotti rispetto alla configurazione iniziale, questo sta ad indicare che il modello è abbastanza accurato. Infatti, per il periodo temporale di un anno, si evince che i valori percentuali dell'indice MBE sono al di sotto del 5% e molto prossimi allo zero. L'unico dato discordante è riferito alla centrale termica di fase 1, in cui l'indice ha un valore del 4,2 %.

Analizzando la zona termica che alimenta questa centrale, come detto in precedenza, è difficile da calibrare in quanto sono presenti valori che cambiano di segno in mesi successivi. L'unica soluzione per capire se questa parte di modello è realmente calibrato è effettuare un'analisi dei giorni di apertura e di conseguenza di accensione dell'impianto, in modo tale da poter assegnare mese per mese l'accensione dell'impianto.

Effettuando un'analisi sulle centrali di fase 2 e fase 3 per ogni mese, il modello risulta non essere molto accurato, in quanto ci sono 5 valori che superano il  $\pm 10\%$ . Anche in questo caso, essendo un edificio molto ampio e con varie destinazioni d'uso, la presenza delle persone e il funzionamento è al quanto stocastico, quindi una possibile soluzione per calibrare ulteriormente il modello, è fare uno studio sull'occupazione più approfondito, valutando il flusso medio di persone che occupano la struttura.

Per quanto riguarda l'illuminazione impostata sul modello, abbiamo riscontrato un ottimo risultato di calibrazione, in quanto l'indice MBE annuale è del 0,3%, mentre quelli mensili sono al di sotto del  $\pm 10\%$ .

Il modello dei consumi elettrici delle centrali tecnologiche non è stato calibrato al meglio, se si considera il periodo mensile. Un modo per migliorare questo modello è la misura separata degli elementi della centrale tecnologica, in questo modo è

possibile agire in maniera mirata sul modello. Per quanto riguarda il periodo annuale, il valore è ben calibrato.

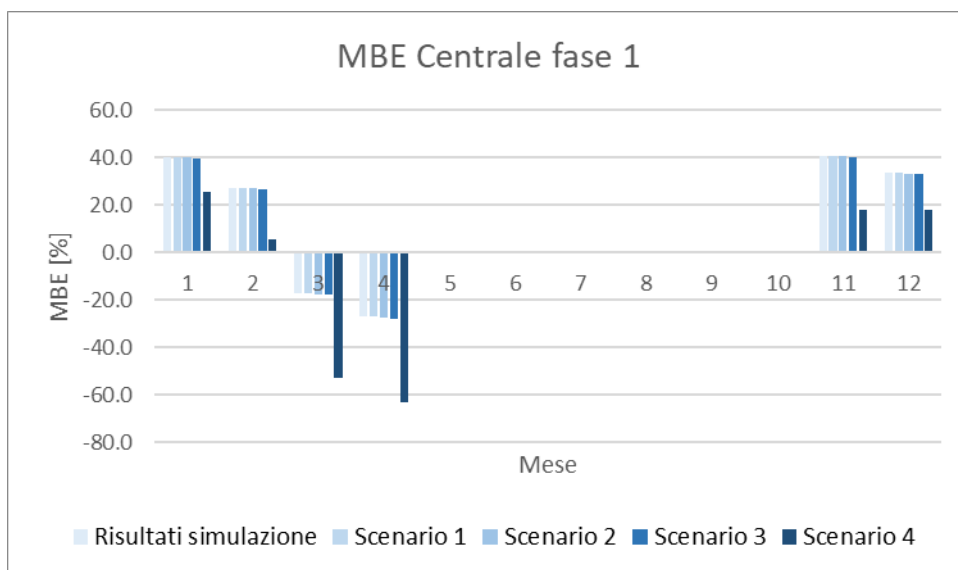


Figura 72 – Indice MBE delle calibrazioni della centrale termica di fase 1

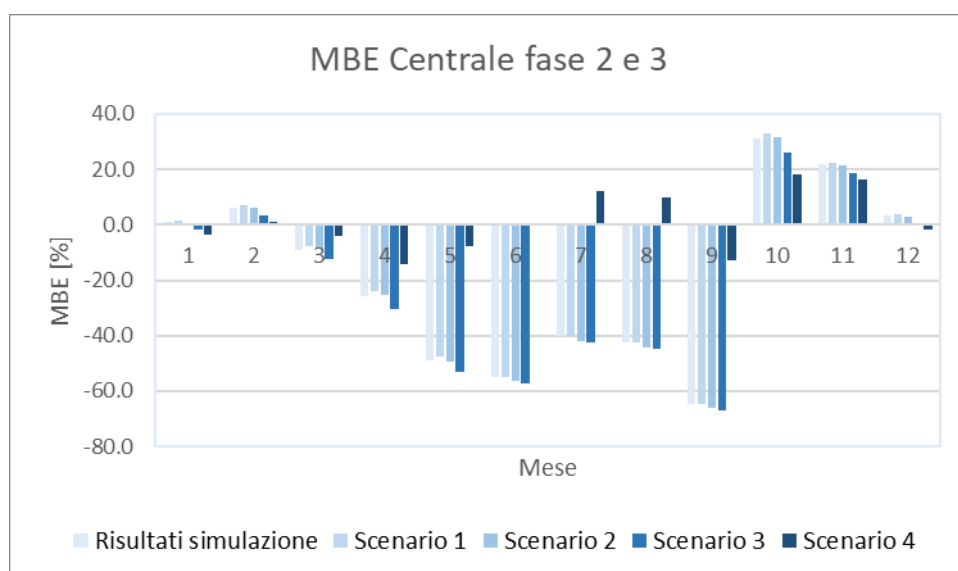


Figura 73 – Indice MBE delle calibrazioni delle centrali termiche di fase 2 e 3

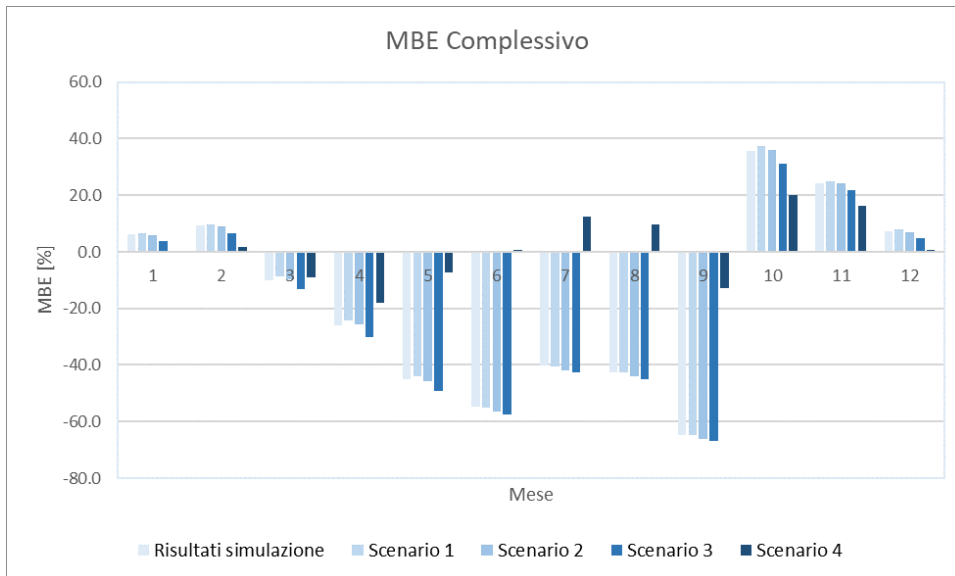


Figura 74 – Indice MBE delle calibrazioni di tutte le centrali termiche

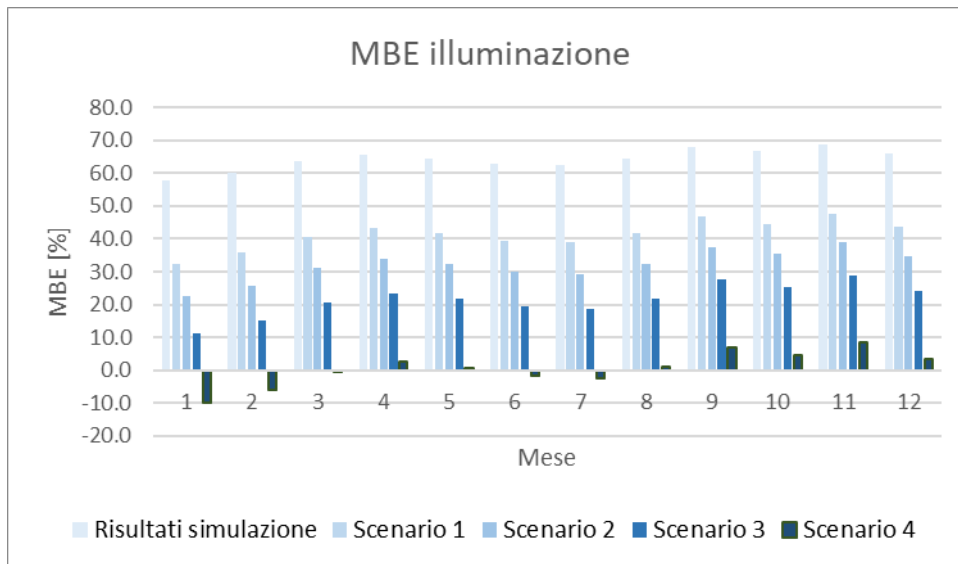


Figura 75 - Indice MBE delle calibrazioni dell'illuminazione della zona termica GALLERIA



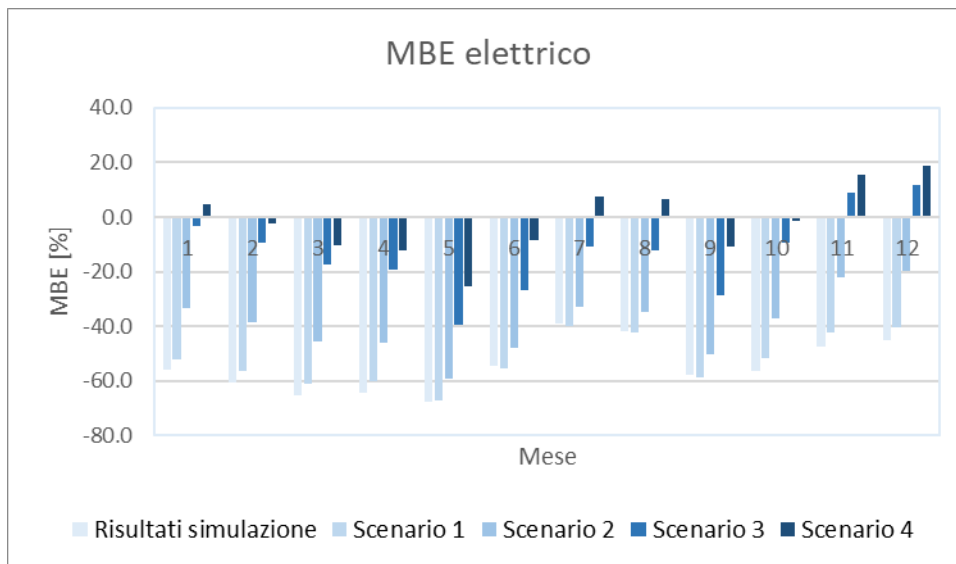


Figura 76 – Indice MBE delle calibrazioni del tecnologico

Analizzando le calibrazioni effettuate, si evince che la quarta calibrazione ha generato degli indici MBE accettabili. Questo risultato ci permette di capire che il modello è abbastanza calibrato; quindi, sarà possibile effettuare degli interventi migliorativi all'interno del modello per la valutazione del risparmio economico ed energetico che essi possono portare all'edificio reale.

Un'ulteriore conferma dell'affidabilità del modello è stata effettuata simulando il modello con i dati climatici del 2021 e confrontando gli scostamenti.

	Scostamento Illuminazione [%]	Scostamento Elettrico [%]	MBE Illuminazione [%]	MBE Elettrico [%]
Gennaio	-0.6	5.4	-0.3	2.6
Febbraio	-4.5	-7.1	-2.3	-3.7
Marzo	9.4	-18.4	4.5	-10.1
Aprile	68.5	-22.5	25.5	-12.7
Maggio	75.0	1.3	27.3	0.6
Giugno	14.2	-3.6	6.6	-1.8
Luglio	-11.3	36.4	-6.0	15.4
Agosto	0.5	12.8	0.3	6.0
Settembre	9.7	-25.2	4.6	-14.4
Ottobre	4.4	-17.5	2.2	-9.6
Novembre	-6.7	-13.2	-3.4	-7.1
Dicembre	-20.6	7.6	-11.5	3.7
Totale	5.9	0.0	2.9	0.0

Tabella 35 - Scostamento e MBE dell'illuminazione e del tecnologico riferito ai consumi del 2021

	Scostamento centrale F1 [%]	Scostamento centrale F2 e F3 [%]	Scostamento Complessivo [%]	MBE centrale F1 [%]	MBE Centrale F2 e F3 [%]	MBE Complessivo [%]
Gennaio	141.9	7.7	16.6	41.5	3.7	7.7
Febbraio	65.2	9.9	14.5	24.6	4.7	6.7
Marzo	-34.5	-0.6	-3.0	-20.9	-0.3	-1.5
Aprile	-53.3	-4.4	-7.9	-36.3	-2.2	-4.1
Maggio		-24.7	-23.9		-14.1	-13.6
Giugno		11.9	11.9		5.6	5.6
Luglio		-22.7	-22.7		-12.8	-12.8
Agosto		55.3	55.3		21.7	21.7
Settembre		21.1	21.1		9.6	9.6
Ottobre	-89.0	-40.6	-49.7	-80.2	-25.5	-33.1
Novembre	33.7	76.3	70.5	14.4	27.6	26.1
Dicembre	6.5	-19.6	-16.9	3.1	-10.9	-9.2
Totale	115.6	1.1	2.3	7.2	0.6	1.2

**Tabella 36 - Scostamento e MBE del teleriscaldamento riferito ai consumi dell'anno 2021**

Come si evince dalle tabelle 35 e 36, il modello è abbastanza accurato; infatti, gli indici MBE restano nella soglia del 5%. Siccome il modello è accurato, proseguiremo alla proposta di interventi migliorativi affinché ci sia del risparmio energetico.

# Capitolo 5

## Interventi migliorativi mirati alla riduzione dei consumi di energia

Nel quinto capitolo, affronteremo in dettaglio i potenziali interventi per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio simulato. Questi interventi sono cruciali per ridurre i consumi energetici e minimizzare l'impatto ambientale dell'edificio. Uno degli interventi che esamineremo sarà la sostituzione delle torri evaporative attualmente in uso con uno scambio di calore ad acqua di falda. Questa opzione potrebbe consentire un utilizzo più sostenibile delle risorse energetiche, riducendo al contempo i costi operativi legati al raffreddamento. Inoltre, esamineremo l'applicazione di pellicole a controllo solare. Questa strategia potrebbe contribuire a regolare la luce solare e la temperatura interna, riducendo la necessità di raffreddamento e illuminazione artificiale durante le ore diurne.

### 5.1 Sostituzione delle torri evaporative

La sostituzione delle torri evaporative è una soluzione sensata data l'età avanzata delle attuali unità e le inefficienze riscontrate. Le torri presenti sono state installate circa 30 anni fa, questo comporta l'erosione di alcune componenti e la scarsa efficienza di essi. Dai sopralluoghi effettuati, si sono riscontrate delle perdite nelle torri evaporative di fase 2; in più, la scarsa efficienza è dovuta all'età del sistema di ventilazione, in quanto lavora a velocità fissa. Durante questa valutazione, esamineremo due scenari di sostituzione al fine di determinare i benefici in termini di efficienza energetica e riduzione dei costi operativi.

Si valuteranno i risparmi ottenuti con due tipi di sostituzioni:

- Sostituzione delle torri evaporative installate con delle torri di nuova generazione;
- Sostituzione delle torri evaporative con un impianto di reiezione del calore ad acqua di falda.

Sarà importante condurre un'analisi dettagliata dei benefici per ciascuno di questi scenari al fine di prendere una decisione informata. La scelta finale dovrebbe mirare a migliorare l'efficienza energetica dell'edificio in linea con la riduzione dei costi operativi a lungo termine.

### 5.1.1 Torri evaporative di nuova generazione

Come detto in precedenza, le torri evaporative installate nel nostro caso studio hanno una scarsa efficienza dovuta soprattutto all'età del componente. È stata condotta una simulazione dinamica, considerando la sostituzione delle torri, di cui i dati derivano dalla scheda tecnica di un noto produttore.

I consumi relativi al teleriscaldamento non variano, siccome l'intervento effettuato agisce solo sull'impianto di produzione del fluido termovettore freddo.

MESE	Risparmio consumi elettrici [%]
Gennaio	0.0
Febbraio	0.0
Marzo	0.0
Aprile	-6.2
Maggio	-18.9
Giugno	-16.9
Luglio	-14.7
Agosto	-15.7
Settembre	-18.7
Ottobre	-10.7
Novembre	0.0
Dicembre	0.0
Totale	-10.9

Tabella 37 – Analisi dei consumi elettrici dopo la sostituzione delle torri evaporative con altre più efficienti

La Tabella 37 mostra un risparmio consistente, circa l'11%. Questo risparmio notevole è dovuto alle torri evaporative utilizzate nella sostituzione. Quest'ultime sono dotate di inverter, in più la potenza dei ventilatori utilizzati nelle nuove torri evaporative è più bassa a parità di potenza termica espulsa.

### 5.1.2 Utilizzo dell'acqua di falda nel raffreddamento

In questo caso si è pensato di effettuare un cambiamento importante sul tipo di impianto. La sostituzione delle torri viene effettuata con lo smaltimento del calore prodotto dai gruppi frigoriferi mediante l'ausilio dell'acqua di falda.

	Risparmio consumi elettrico [%]
Gennaio	0.0
Febbraio	0.0
Marzo	0.0
Aprile	-6.1
Maggio	-19.6
Giugno	-26.2
Luglio	-27.2
Agosto	-27.1
Settembre	-24.7
Ottobre	-10.4
Novembre	0.0
Dicembre	0.0
<b>Totale</b>	<b>-16.8</b>

**Tabella 38 - Analisi dei consumi elettrici dopo la sostituzione delle torri evaporative con l'impianto ad acqua di falda**

L'installazione di questo tipo di impianto è molto onerosa, dovuta alla perforazione del terreno. Oltre ai costi d'investimento iniziale, l'utilizzo di acqua di falda per gli impianti tecnici prevede un controllo normativo importante, associato alla costante analisi dei possibili inquinanti che possono terminare nella falda acquifera. Superato questo scoglio e considerando una temperatura di falda pari a 15°C, in un anno si registra un risparmio del 16,8%. Questo risparmio è dovuto sia alla bassa temperatura della sorgente di calore sia alla rimozione dei ventilatori utilizzati nelle torri; d'altro canto, i consumi associati al sistema di pompaggio aumentano.

## 5.2 Applicazione di pellicole a controllo solare

L'applicazione delle pellicole a controllo solare è utile per la riduzione del carico di condizionamento dell'edificio, specialmente se la superficie vetrata è elevata e se la quantità di radiazione solare entrante è eccessiva. Le pellicole utilizzate, non possono mutare il colore esterno dei vetri, di conseguenza la selettività è bassa. Di conseguenza, sono state utilizzate delle pellicole che non mutano il colore dei serramenti presenti; l'applicazione della pellicola non muta la trasmittanza equivalente del serramento. Mediante una ricerca approfondita, abbiamo deciso di testare una pellicola a controllo solare di un noto produttore. I dati rilevanti sono:

- Riflessione energia solare: 27%
- Assorbimento energia solare 26%;
- Trasmissione energia solare: 47%;
- Fattore solare: 0,49.

MESE	Risparmio consumi elettrico [%]
Gennaio	-0.1
Febbraio	-0.1
Marzo	0.1
Aprile	-0.3
Maggio	-2.9
Giugno	-1.4
Luglio	-2.1
Agosto	-1.7
Settembre	-2.2
Ottobre	-0.8
Novembre	0.0
Dicembre	-0.2
<b>Totale</b>	<b>-1.3</b>

**Tabella 39 - Analisi dei consumi elettrici dopo all'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti**

Dalla Tabella 39, si nota che l'applicazione delle pellicole solari induce ad un risparmio di energia elettrica pari all'1,3%; in questo caso non si è valutato l'aumento dei consumi per l'illuminazione, in quanto non avevamo a disposizione i dati. Per questo motivo ci è impossibile capire se questo risparmio sia effettivo, in quanto il *surplus* dei consumi per l'illuminazione non devono superare la quantità di energia elettrica risparmiata.

MESE	Risparmio centrale F1 [%]	Risparmio centrale F2 [%]	Risparmio centrale F3 [%]	Risparmio Complessivo [%]
Gennaio	0.09	0.07	0.13	0.09
Febbraio	0.59	0.16	0.38	0.27
Marzo	0.96	0.30	0.34	0.34
Aprile	0.00	0.39	0.53	0.41
Maggio	0.00	-0.55	-0.01	-0.39
Giugno		-1.28	-0.57	-1.07
Luglio		-2.47	-0.43	-1.90
Agosto		-2.25	-0.54	-1.76
Settembre		-1.13	-0.87	-1.05
Ottobre	0.00	0.62	0.86	0.65
Novembre	0.00	0.13	0.23	0.14
Dicembre	0.19	0.04	-0.02	0.05
<b>Totale</b>	<b>0.24</b>	<b>-0.09</b>	<b>0.13</b>	<b>0.00024</b>

**Tabella 40 - Analisi dei consumi del teleriscaldamento dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti**

Dalla Tabella 40 si evince che i consumi del teleriscaldamento restano quasi immutati, in quanto l'aumento dovuto all'applicazione delle pellicole solari è del 0.00024%.

### 5.3 Combinazione degli interventi migliorativi

In questo paragrafo saranno esposti i risultati della combinazione degli interventi migliorativi esposti nei paragrafi precedenti. In particolare, saranno esposte due combinazioni. Le configurazioni sono:

- Sostituzione delle torri evaporative con quelle di nuova generazione e applicazione delle pellicole a controllo solare;
- Sostituzione delle torri evaporative con un impianto che utilizza acqua di falda.

In questo modo si potrà valutare il risparmio energetico conseguito con l'applicazione di questi impianti.

Nella prima configurazione, la sostituzione delle torri evaporative con unità più efficienti e l'aggiunta di pellicole a controllo solare ha portato a un significativo miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio. I consumi di elettricità sono diminuiti grazie alla maggiore efficienza delle torri evaporative e al controllo della radiazione solare. Tuttavia, è importante notare che i consumi relativi al teleriscaldamento rimangono sostanzialmente invariati, poiché l'intervento ha riguardato principalmente il sistema di raffreddamento.

MESE	Risparmio centrale F1 [%]	Risparmio centrale F2 [%]	Risparmio centrale F3 [%]	Risparmio Complessivo [%]
Gennaio	0.09	0.07	0.13	0.09
Febbraio	0.59	0.16	0.38	0.27
Marzo	0.96	0.30	0.34	0.34
Aprile	0.00	0.39	0.53	0.41
Maggio	0.00	-0.55	-0.01	-0.39
Giugno		-1.28	-0.57	-1.07
Luglio		-2.47	-0.43	-1.90
Agosto		-2.25	-0.54	-1.76
Settembre		-1.13	-0.87	-1.05
Ottobre	0.00	0.62	0.86	0.65
Novembre	0.00	0.13	0.23	0.14
Dicembre	0.19	0.04	-0.02	0.05
Totale	0.24	-0.09	0.13	0.00024

**Tabella 41 - Analisi dei consumi del teleriscaldamento dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con altre più efficienti**

MESE	Risparmio consumi elettrico [%]
Gennaio	-0.1
Febbraio	-0.1
Marzo	0.1
Aprile	-0.9
Maggio	-18.1
Giugno	-18.7
Luglio	-16.5
Agosto	-17.2
Settembre	-21.3
Ottobre	-5.7
Novembre	0.0
Dicembre	-0.2
Totale	-11.4

**Tabella 42 - Analisi dei consumi elettrici dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con altre più efficienti**

Nella seconda configurazione, la sostituzione delle torri evaporative con un impianto basato sull'uso di acqua di falda ha comportato notevoli risparmi energetici per l'elettricità. L'uso dell'acqua di falda come fonte di raffreddamento ha ridotto la necessità di utilizzare energia elettrica per il raffreddamento, riducendo significativamente i costi operativi. Tuttavia, è importante considerare le considerazioni ambientali e le potenziali restrizioni normative associate all'uso dell'acqua di falda.

MESE	Risparmio centrale F1 [%]	Risparmio centrale F2 [%]	Risparmio centrale F3 [%]	Risparmio Complessivo [%]
Gennaio	0.09	0.07	0.13	0.09
Febbraio	0.59	0.16	0.38	0.27
Marzo	0.96	0.30	0.34	0.34
Aprile	0.00	0.39	0.53	0.41
Maggio	0.00	-0.55	-0.01	-0.39
Giugno		-1.28	-0.57	-1.07
Luglio		-2.47	-0.43	-1.90
Agosto		-2.25	-0.54	-1.76
Settembre		-1.13	-0.87	-1.05
Ottobre	0.00	0.62	0.86	0.65
Novembre	0.00	0.13	0.23	0.14
Dicembre	0.19	0.04	-0.02	0.05
Totale	0.24	-0.09	0.13	0.00024

**Tabella 43 - Analisi dei consumi del teleriscaldamento dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con l'impianto ad acqua di falda**

MESE	Risparmio consumi elettrico [%]
Gennaio	-0.1
Febbraio	-0.1
Marzo	0.1
Aprile	-0.9
Maggio	-18.3
Giugno	-28.5
Luglio	-29.4
Agosto	-29.0
Settembre	-27.8
Ottobre	-5.5
Novembre	0.0
Dicembre	-0.2
Totale	-17.5

**Tabella 44 - Analisi dei consumi elettrici dopo l'applicazione di pellicole a controllo solare sui serramenti esistenti e la sostituzione delle torri evaporative con l'impianto ad acqua di falda**

In entrambe le configurazioni, l'adozione di soluzioni innovative ha dimostrato il potenziale per ridurre il consumo complessivo di energia dell'edificio e migliorare l'efficienza energetica complessiva. Tuttavia, la scelta tra le due opzioni dovrebbe essere basata su considerazioni economiche, ambientali e normative specifiche.



# Capitolo 6

## Conclusioni

L'analisi dettagliata dei consumi di energia primaria in Europa e in Italia, insieme alla panoramica sulle politiche energetiche europee, offre una visione chiara delle sfide e delle opportunità nel settore dell'energia. Emerge chiaramente la necessità di affrontare le sfide legate ai cambiamenti climatici e alla dipendenza dalle fonti fossili attraverso strategie mirate e sostenibili. Promuovere fonti energetiche rinnovabili e ridurre la dipendenza dalle fonti fossili è cruciale per una transizione sostenibile. Migliorare l'efficienza energetica degli edifici attraverso ristrutturazioni e tecnologie avanzate contribuirà a ridurre i consumi energetici e le emissioni di gas serra. La transizione energetica richiede investimenti significativi, collaborazione tra settori e coinvolgimento del pubblico per affrontare la crisi climatica. In sintesi, l'Europa si sta impegnando in modo deciso nella lotta ai cambiamenti climatici attraverso politiche energetiche ambiziose. Tuttavia, è necessario mantenere un impegno costante e continuo per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni e promuovere un futuro energetico più sostenibile.

Si è analizzato lo stato attuale del patrimonio edilizio italiano, con particolare attenzione all'anno di costruzione e alla classificazione energetica degli edifici. Sono state analizzate le leggi e i decreti governativi che riguardano il restauro e il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici storici e tutelati, evidenziando anche le lacune normative esistenti e le opportunità per colmare tali vuoti. La principale conclusione riguardante il patrimonio edilizio italiano è che una parte significativa degli edifici è stata costruita prima del 1976, anno in cui è stata emanata la prima legge sull'efficienza energetica. Questo fa sì che molti edifici siano energeticamente inefficienti, contribuendo in modo significativo ai consumi energetici complessivi in Italia. Migliorare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio italiano è una sfida importante ma necessaria per ridurre i consumi energetici e le emissioni di CO<sub>2</sub>. Tuttavia, è essenziale affrontare queste sfide con attenzione per preservare il valore storico e architettonico degli edifici.

Si è analizzata l'importanza delle strategie di ottimizzazione energetica non invasive negli edifici per la lotta al cambiamento climatico e la promozione della sostenibilità. Gli occupanti svolgono un ruolo fondamentale, con potenziali risparmi del 9,5% al 21% attraverso l'educazione e il coinvolgimento. La regolazione avanzata degli impianti, basata su algoritmi predittivi, può portare a risparmi energetici significativi fino al 50%, mantenendo inalterato il comfort termico. La gestione degli apporti solari tramite pellicole solari e tendaggi è essenziale per ridurre il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici. Il *free-*

*cooling* e i materiali a cambiamento di fase sono promettenti per ridurre la richiesta energetica per il raffreddamento. Queste strategie contribuiscono a creare ambienti edificati più sostenibili e promuovono uno stile di vita più *eco-friendly*.

L'analisi del caso studio del Centro Polifunzionale Lingotto esplicita diverse conclusioni rilevanti. L'edificio, con la sua storia e la sua complessa struttura, ha presentato sfide uniche per la modellazione energetica. L'utilizzo del *software IES VE* è stato cruciale, mentre la raccolta di dati ha richiesto un approccio ben strutturato per superare le restrizioni di accesso. Nel complesso, l'approccio meticoloso è stato utile per superare le sfide e costruire un modello dinamico simile alla realtà. La calibrazione con dati reali ha permesso di migliorare ulteriormente la precisione del modello. Nell'analisi dettagliata degli impianti dell'edificio in studio, emergono diverse conclusioni significative. In primo luogo, la scelta del *software* di modellazione, specificamente l'utilizzo di *ApacheHVAC*, ha permesso una rappresentazione dettagliata degli impianti, tenendo conto di tutte le logiche di controllo e dei sensori coinvolti. L'approccio meticoloso alla modellazione degli impianti ha fornito una rappresentazione accurata del funzionamento degli impianti dell'edificio. Dalla simulazione e calibrazione del modello dell'edificio emergono conclusioni rilevanti. Dopo una serie di calibrazioni, il modello è accurato e può essere utilizzato per valutare il potenziale risparmio energetico e strategie volte all'efficienza energetica. Inizialmente, vi erano significative discrepanze tra i consumi previsti dal modello e quelli effettivi. Tuttavia, attraverso successive calibrazioni, le discrepanze sono state notevolmente ridotte. Gli indici di Errore Medio (MBE) indicano che il modello è abbastanza accurato, con valori di MBE inferiori al 5% per l'anno considerato. Alcune aree, come le centrali tecnologiche e termiche, richiedono ulteriori studi e miglioramenti, specialmente a livello mensile. Uno studio più approfondito sull'occupazione e sui comportamenti degli utenti potrebbe contribuire a una calibrazione più precisa.

L'adozione di interventi migliorativi mirati, come la sostituzione delle torri evaporative con unità più efficienti e l'applicazione di pellicole a controllo solare, ha dimostrato la potenziale riduzione dei consumi elettrici, migliorando l'efficienza del sistema di raffreddamento. Inoltre, l'uso di acqua di falda per il raffreddamento ha portato a notevoli risparmi energetici, anche se richiede un investimento iniziale significativo e affronta questioni normative e ambientali complesse. Per la scelta tra queste opzioni si dovrebbero considerare costi, benefici e impatti economici, ambientali e normativi specifici. In ogni caso, gli interventi migliorativi possono contribuire in modo significativo alla riduzione dei consumi energetici, migliorando l'efficienza energetica complessiva dell'edificio.

# Bibliografia

- [1] Eurostat. “Produzione di energia primaria in EU”. [Online]. Disponibile: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_statistics\\_-\\_an\\_overview&action=statexp-seat&lang=it#Produzione di energia primaria](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview&action=statexp-seat&lang=it#Produzione_di_energia_primaria)).
- [2] International Energy Agency. 2023. Energy Policy Review Italy 2023.
- [3] <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/contesto/protocollo-di-kyoto>.
- [4] “Pacchetto per il clima e l’energia 2020”. [Online]. Disponibile: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_it#tab-0-1](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_it#tab-0-1).
- [5] Greenreport. 2021. “L’Ue nel 2020 ha raggiunto gli obiettivi climatici 20-20-20, ma solo grazie ai lockdown”. [Online]. Disponibile: <https://greenreport.it/news/energia/lue-nel-2020-ha-raggiunto-gli-obiettivi-climatici-20-20-20-ma-solo-grazie-ai-lockdowns/#:~:text=Le%20stime%20preliminari%20dell'EEA,il%20riscaldamento%20e%20il%20raffreddamento>.
- [6] Commissione Europea. 2011. “Una tabella di marcia verso un’economia competitiva a basse emissioni di carbonio nel 2050” .
- [7] European Parliament. “Directive 2002/91/CE”. Gazz. Uff. dell’Unione europea, vol. L1, no. 4 gennaio 2003, pp. 65–71, 2003.
- [8] European Parliament. “Directive 2010/31/CE,” Gazz. Uff. dell’Unione europea, vol. L153, no. 19 Maggio 2010, pp. 13–35, 2010.
- [9] Unione Europea. “Direttiva (UE) 2018/844 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,” Gazz. Uff. dell’Unione europea, vol. L156, no. 19 giugno 2018, pp. 75–91, 2018.
- [10] Istituto nazionale di statistica (Istat). “Annuario statistico italiano”. 2015.
- [11] Enea, SIAPE. “Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica”. 2023.
- [12] UNI EN 16883:2017 “Conservazione dei beni culturali – Linee guida per migliorare la prestazione energetica degli edifici”.2017.
- [13] Zhiyuan He, Tianzhen Hong, S.K. Chou, “A framework for estimating the energy-saving potential of occupant behaviour improvement”, Applied Energy, vol.287, p.p. 116591. 2021.
- [14] GaoXiang Chen, Jian Yao, RongYue Zheng, “Energy related performance of manual shading device in private offices: An occupant behavior-based comparative study using modeling approaches”, Cases Studies in Thermal Engineering, vol.27, p.p. 101336, 2021.
- [15] IEA 2021 (International Energy Agency) Report. [Online]. Disponibile: [https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC\\_Buildings-GSR-2021\\_BOOK.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf).
- [16] Fabrizio Ascione, Rosa Francesca De Masi, Valentino Festa, Gerardo Maria Mauro, Giuseppe Peter Vanoli, “ Optimizing space cooling of nearly zero energy building via model predictive control: Energy cost vs comfort”, Energy & Buildings, vol.278, p.p. 112664, 2023.

- [17] Phillippe R. Sampaio, Raphael Salvazet, Pierre Mandal, Gwenaelle Becker, Damien Chenu, “Simulation and optimal control of heating and cooling systems: A case study of commercial building” *Energy & Buildings*, vol.246, p.p. 111102, 2021.
- [18] Rongxin Yin, Peng Xu, Pengyuan Shen, “Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai”, *Energy & Buildings*, vol.45, p.p. 132-140, 2012.
- [19] Julia Pereira, Cristina Camacho Rivero, M. Gloria Gomes, A Moret Rodrigues, Madelyn Marrero, “Energy, environmental and economic analysis of windows’ retrofit with solar control films: A case study in Mediterranean climate”, *Energy*, vol.233, p.p. 121083, 2021.
- [20] Francesco Nicoletti, Dimitrios Kaliakatsos, Mirco Parise, “Optimizing the control of Venetian blinds with artificial neural networks to achieve energy savings and visual comfort”, *Energy & Buildings*, vol.294, p.p. 113279, 2023.
- [21] Klemen Dovrtel, Saso Medved, “Multi-objective optimization of a building free cooling system, based on weather prediction”, *Energy & Buildings*, vol.52, p.p. 99-106, 2012.
- [22] Saeed Kamali, “Review of free cooling system using phase change material for building”, *Energy & Building*, vol.80, p.p. 131-136, 2014.
- [23] [http://www.istoreto.it/to38-45\\_industria/schede/flat\\_lingotto.htm](http://www.istoreto.it/to38-45_industria/schede/flat_lingotto.htm)
- [24] <https://www.museotorino.it/view/s/1aaf554a75ca4b2eb7acc11254eea90b>
- [25] <https://www.museotorino.it/view/s/2da9c2e6c07446ed89d7480f08820cae>
- [26] <https://lingottoturingallery.com/edificio/>
- [27] <https://www.iesve.com/>
- [28] “UNI 10349-1:2016. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici – Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell’edificio e metodi per l’irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per c.”
- [29] “UNI 10349-1:2016. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici – Parte 2: Dati di progetto.”
- [30] “UNI 10349-1:2016. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici – Parte 3: Differenze di temperature cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici.”
- [31] “UNI 5364:1976. Impianti di riscaldamento ad acqua calda. Regole per la prestazione dell’offerta e per il collaudo.”
- [32] “DPR 412-93. Regolamento recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell’art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.”
- [33] <https://earth.google.com/web/@45.03234852,7.67098857,251.65456587a,3644.2376812d,34.99999986y,0.00003978h,0t,0r>
- [34] “UNI 10339:1995. Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d’offerta, l’offerta, l’ordine e la fornitura.”
- [35] “UNI/TS 11300:2014. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.”