

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Energetica

*Renewable energy systems*

A.A. 2024/2025



**Politecnico  
di Torino**

## **Riqualificazione energetica di fabbricati del Politecnico di Torino. Analisi energetica di interventi di ottimizzazione sugli impianti di riscaldamento e raffrescamento.**

Relatore:  
Vincenzo CORRADO

Correlatori:  
Ilaria BALLARINI  
Paola LERARIO  
Emanuele LOGLISCI

Candidato:  
Simone DA CAMPO  
Matricola 306246



# Indice

<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Introduzione .....</b>	<b>6</b>
Cambiamenti climatici .....	6
Azioni a livello globale .....	7
Impatto degli edifici .....	8
Evoluzione futura dell’impatto degli edifici .....	9
Impatto degli edifici in Italia.....	10
Azioni del Politecnico di Torino .....	13
<b>2. Direttive europee e normativa italiana sull’efficienza energetica degli edifici.....</b>	<b>17</b>
Direttive Europee .....	17
Legislazione Italiana .....	21
Norme tecniche di riferimento .....	25
<b>3. Inquadramento storico dell’edificio oggetto di studio .....</b>	<b>27</b>
Storia del Politecnico .....	27
Sede centrale del Politecnico .....	28
Ampliamento delle maniche .....	29
Ampliamento dell’edificio oggetto di studio .....	30
<b>4. Descrizione dello stato attuale dell’edificio oggetto di studio.....</b>	<b>33</b>
Contesto climatico.....	34
Descrizione dell’edificio .....	35
Descrizione dell’involucro .....	37
Facciate e coperture .....	37
Pareti e solai .....	39
Serramenti .....	51
Impianti di climatizzazione .....	53
Generazione .....	53
Distribuzione.....	54
Terminali .....	55
Impianto di ventilazione.....	56

<b>5. Metodo di calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio .....</b>	<b>57</b>
Dati di input .....	58
Algoritmo di calcolo .....	58
Software EDILCLIMA .....	60
<b>6. Zonizzazione dell'edificio .....</b>	<b>61</b>
Definizione delle zone termiche .....	61
Dati di input delle zone termiche .....	63
<b>7. Analisi dei consumi e calibrazione del modello .....</b>	<b>66</b>
Consumi attuali dell'edificio 4A.....	66
Calibrazione del modello .....	68
Risultati della diagnosi energetica .....	72
Rendering 3D del modello su Edilclima.....	75
<b>8. Efficientamento energetico degli impianti di climatizzazione.....</b>	<b>76</b>
Introduzione .....	76
Impianti termici.....	76
Sottosistemi degli impianti.....	77
Sottosistema di generazione.....	78
Sottosistema di distribuzione .....	79
Sottosistema di regolazione .....	81
Sottosistema di emissione .....	85
Building Management System (BMS).....	89
Temperatura di set point nei locali .....	91
<b>9. Analisi energetica degli interventi di efficientamento energetico ...</b>	<b>93</b>
Introduzione .....	93
Dati analizzati .....	94
Interventi sugli impianti.....	95
Analisi sottosistema di emissione .....	95
Analisi sottosistema di regolazione.....	100
Analisi isolamento termico della distribuzione.....	106
Analisi temperatura di set point .....	108
Impianto di climatizzazione abbinato ai sensori di presenza.....	111
Integrazione dell'impianto fotovoltaico.....	114

Risultati globali post-intervento.....	120
Discussione dei risultati ottenuti .....	121
<b>10. Valutazione economica degli interventi.....</b>	<b>123</b>
Introduzione .....	123
Agevolazioni per gli interventi .....	123
Conto Termico.....	123
Descrizione delle variabili economiche analizzate .....	126
Costi attuali .....	127
Intervento di efficientamento energetico degli impianti termici.....	128
Calcolo incentivo per l'intervento.....	130
Analisi economica.....	130
Integrazione dell'impianto fotovoltaico.....	132
Analisi economica.....	134
Conclusioni sui risultati ottenuti .....	135
<b>11. Isolamento termico dell'involucro edilizio.....</b>	<b>137</b>
Introduzione .....	137
Isolamento dell'involucro edilizio .....	137
Miglior soluzione di isolamento termico .....	137
Analisi dei consumi energetici .....	140
Risultati globali post-intervento.....	143
Analisi economica.....	145
Calcolo incentivo per l'intervento.....	146
Analisi VAN .....	147
Conclusioni sui risultati ottenuti .....	148
<b>Conclusioni finali .....</b>	<b>150</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>152</b>
Fonti delle tabelle e delle figure.....	152
Bibliografia generale.....	154
<b>Indice delle figure.....</b>	<b>159</b>
<b>Indice delle tabelle.....</b>	<b>162</b>
<b>Allegati .....</b>	<b>165</b>

## Abstract

Il settore edilizio rappresenta una delle principali fonti di consumo energetico e di emissioni di gas serra a livello globale, rendendolo un ambito chiave per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione fissati dall'Unione Europea. In Italia la grande maggioranza degli edifici esistenti è stata realizzata prima dell'introduzione di criteri costruttivi orientati all'efficienza energetica e pertanto gran parte del patrimonio edilizio rientra nelle classi energetiche meno performanti. Grazie all'introduzione di normative sempre più stringenti si è assistito a un progressivo miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici di nuova realizzazione; tuttavia, per la transizione ecologica è fondamentale mettere in atto strategie di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, con interventi mirati alla riduzione dei consumi e dell'impatto ambientale.

Questa tesi si focalizza pertanto sulla riqualificazione degli impianti di climatizzazione di un edificio del Politecnico di Torino, già peraltro inserito nel piano pluriennale di decarbonizzazione dell'Ateneo, con l'obiettivo di migliorarne l'efficienza energetica e ridurre i consumi. Lo studio è stato condotto insieme ad un collega del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, con il quale è stata condotta un'attività di collaborazione tra due diversi ma complementari ambiti della progettazione, quella edile e quella impiantistica.

Il modello energetico dell'edificio, partendo da una elaborazione del progetto di riqualificazione degli spazi, è stato sviluppato mediante il software Edilclima EC700, adottando il metodo di calcolo dinamico su base oraria per stimare il fabbisogno energetico dell'edificio e valutarne le prestazioni post-intervento. La fase di calibrazione del modello ha richiesto un'analisi parametrica sulle volumetrie del complesso edilizio, poiché non erano disponibili misurazioni dirette dei consumi del singolo edificio. In seguito, il lavoro è stato sviluppato in parallelo secondo due differenti linee di approfondimento: questa tesi si è focalizzata sugli interventi di riqualificazione energetica degli impianti di climatizzazione, mentre il collega ha approfondito il tema dell'isolamento termico dell'involucro opaco.

Le analisi svolte hanno esaminato diverse soluzioni di intervento sugli impianti di riscaldamento e raffrescamento e sui componenti, valutandone le prestazioni all'interno del sistema edificio-impianto e individuando le strategie più efficaci. Sono stati analizzati i singoli sottosistemi dell'impianto termico considerando l'integrazione di un sistema di supervisione avanzato in grado di gestire in maniera intelligente e autonoma tutti gli impianti presenti nell'edificio. Infine, è stata valutata l'installazione di un impianto fotovoltaico per incrementare la quota di energia da fonte rinnovabile. I parametri energetici analizzati sono molteplici, tra cui il fabbisogno di energia primaria, l'energia fornita dai vettori energetici e le emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte. In aggiunta è stata condotta un'analisi economica per determinare la fattibilità finanziaria degli interventi, valutando l'investimento iniziale richiesto, il tempo di ritorno e il rendimento su un periodo di 30 anni.

Il lavoro di tesi si è concluso combinando i risultati emersi dalle due analisi per ottenere una valutazione tecnica ed economica dell'intervento complessivo. Questo approccio permette di definire strategie integrate per l'efficientamento energetico degli edifici esistenti, fornendo indicazioni utili per la riqualificazione sostenibile del patrimonio edilizio universitario e per la riduzione delle emissioni nel settore edilizio.

# 1. Introduzione

## Cambiamenti climatici

Nel corso della storia del Pianeta i cambiamenti climatici si sono verificati più volte ma il riscaldamento globale a cui stiamo assistendo da circa un secolo è differente in quanto causato principalmente dall'uomo e dalle sue attività. Dalla rivoluzione industriale ad oggi milioni di tonnellate di anidride carbonica e altri gas serra sono stati immessi in atmosfera; gli scienziati di tutto il mondo hanno raccolto dati e verificato, tramite studi approfonditi, l'esistenza di una chiara relazione tra l'aumento dei livelli di CO<sub>2</sub> e l'incremento delle temperature registrate sulla Terra. La temperatura media del Pianeta è aumentata di 0,98 °C rispetto ai livelli preindustriali e, senza interventi per limitare e mitigare questo fenomeno, la tendenza è destinata a peggiorare nei prossimi decenni.

Negli ultimi 40 anni l'Europa ha registrato un significativo aumento delle temperature con una media, negli ultimi cinque anni, di 2,2 °C più alta rispetto alla fine del XIX secolo. I fenomeni meteorologici si sono intensificati come effetto del riscaldamento globale, aumentando la frequenza e l'impatto degli eventi estremi. In tutta l'area mediterranea l'intensità delle precipitazioni è incrementata del 22% negli ultimi 50 anni, le inondazioni gravi sono diventate più frequenti, gli incendi sono eventi sempre più comuni provocando la distruzione di interi boschi e foreste, il ghiaccio marino artico è diminuito in media del 12,85% per decennio. L'Italia è uno dei Paesi europei più colpiti dai cambiamenti del clima e le conseguenze non sono solamente di tipo ambientale ma si ripercuotono anche sulla società e sull'economia dei Paesi. Temperature più elevate possono causare un aumento della mortalità soprattutto tra le fasce più vulnerabili della popolazione, portare ad una riduzione della produttività, danni a infrastrutture, edifici ed aziende, e possono avere ripercussioni sull'agricoltura.

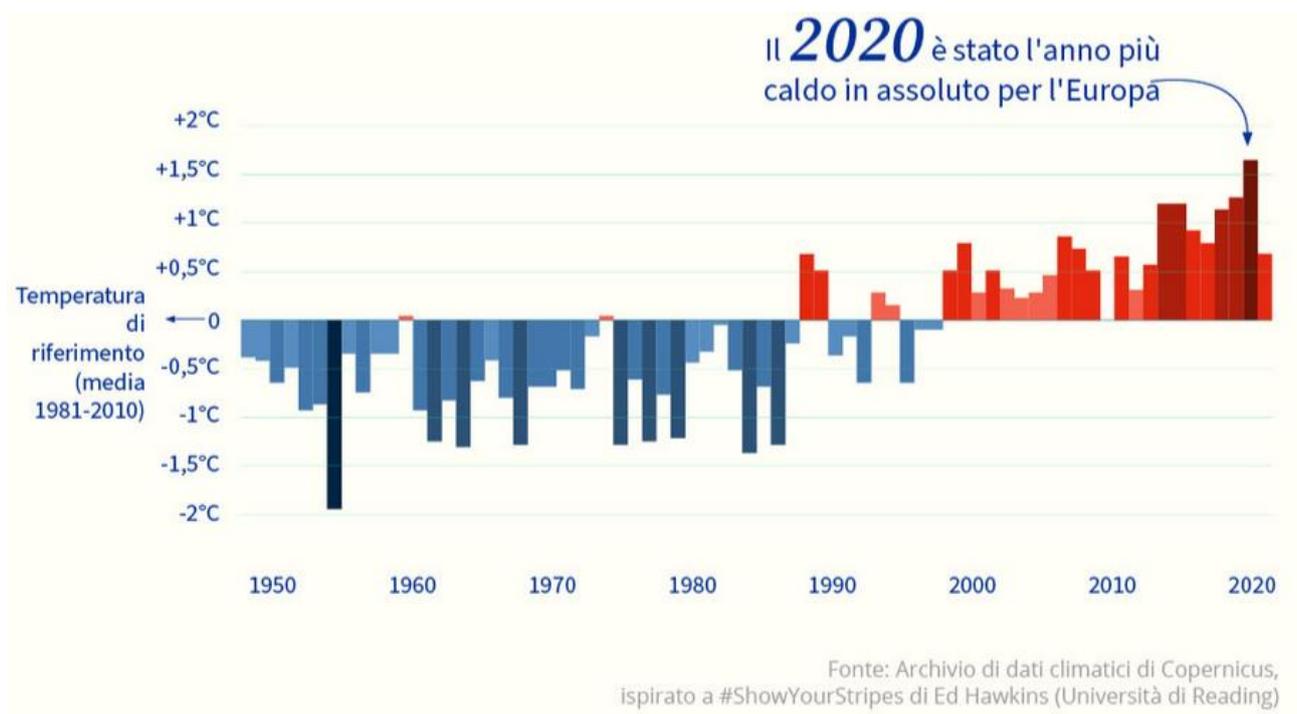


Figura 1 – Variazione della temperatura media annua rispetto al valore di riferimento (media 1981-2010)

## Azioni a livello globale

Il problema della tutela ambientale e dell'efficiamento energetico è al centro delle politiche odierne ma il tema risulta in discussione già da più di un cinquantennio. Il primo passo a livello internazionale è stata la Conferenza di Stoccolma (1972) che, anche se non vincolante, ha spianato la strada per la cooperazione tra stati in tema di tutela ambientale.

La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), approvata a New York il 9 maggio 1992, rappresenta la risposta a livello globale per contrastare e ridurre gli effetti del cambiamento climatico con l'obiettivo principale di stabilizzare la concentrazione dei gas serra. Il Protocollo di Kyoto, firmato nel dicembre 1997 durante la COP3, prevedeva l'obbligo per i 160 Paesi firmatari di ridurre le emissioni globali dei gas ritenuti responsabili del riscaldamento del pianeta. Primo tra tutti è l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), seguita dal metano (CH<sub>4</sub>), dall'ossido di azoto (N<sub>2</sub>O), dall'esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>), dagli idrofluorocarburi (HFCs) e dai perfluorocarburi (PFCs).

Nel 2015 i governi di 194 Paesi, firmando l'Accordo di Parigi, si sono decisi a intraprendere un'azione concreta al fine di mantenere il riscaldamento globale al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, con l'obiettivo, se possibile, di limitarlo a 1,5 °C e contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici. Secondo il rapporto sul riscaldamento globale 2021 redatto dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) l'obiettivo di limitare a 1,5 °C il riscaldamento sarà irraggiungibile se non con un intervento immediato su scala globale.

I Paesi dell'Unione Europea si sono attivati maggiormente per una concreta azione di lotta ai cambiamenti climatici: dal 1990 al 2018 l'UE è stata in grado di ridurre le sue emissioni di gas serra del 23%. Nel dicembre 2019 i leader dell'UE riuniti in sede di Consiglio europeo hanno raggiunto un accordo riguardante il conseguimento della neutralità climatica entro il 2050, in linea con gli obiettivi dell'accordo di Parigi, presentando una tabella di marcia definita nel Green Deal. Con neutralità climatica si intende l'emissione in atmosfera della sola quantità di gas serra che può essere assorbita dalla natura ma tale fine può essere raggiunto solo se i Paesi dell'UE ridurranno drasticamente le loro emissioni, trovando soluzioni per compensare le emissioni inevitabili. La transizione ecologica deve essere efficiente in termini economici ma al tempo stesso socialmente equilibrata ed equa, tenendo in considerazione le differenti situazioni delle nazioni e i diversi mix energetici attuali.

Nel dicembre 2020 gli stessi leader hanno definito un passo intermedio verso il grande obiettivo del 2050, convenendo che entro il 2030 le emissioni di gas serra dell'UE dovranno essere ridotte di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990. Nel luglio 2021 a tal proposito è entrata in vigore la legge europea sul clima che obbliga i paesi dell'UE a raggiungere gli obiettivi climatici prefissati definendo un quadro di azioni da adottare al fine di ridurre progressivamente le emissioni fino alla neutralità climatica entro il 2050. La normativa prevede l'istituzione di un comitato consultivo scientifico sui cambiamenti climatici con il compito di fornire consulenza in merito agli obiettivi fissati e alle misure intraprese dall'UE.

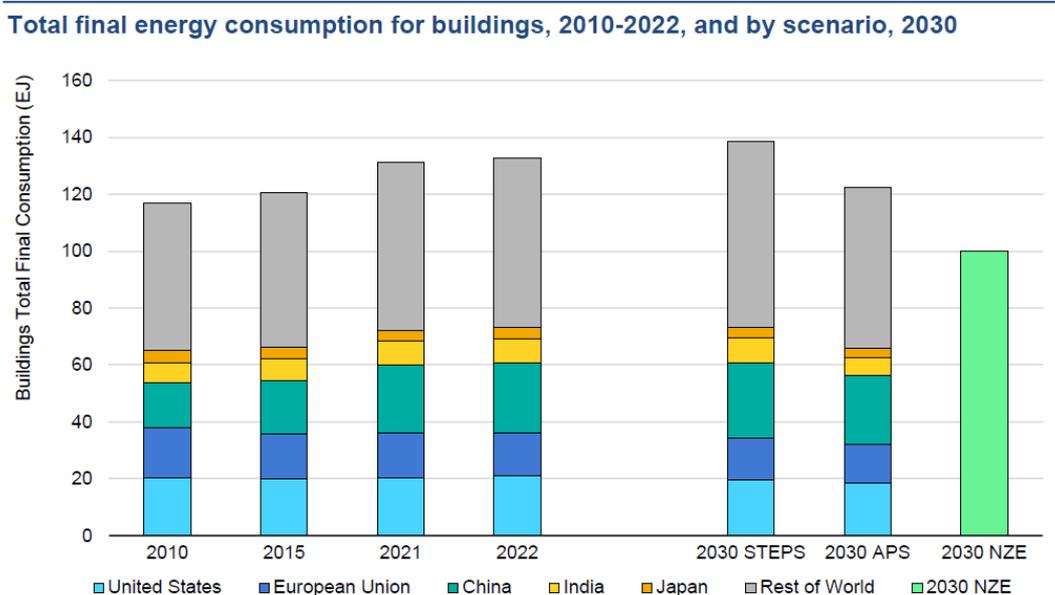
Un ulteriore impegno dell'UE verso la neutralità climatica è assicurato tramite il pacchetto "Pronti per il 55%" (Fit for 55) che comprende proposte di revisione della legislazione vigente e nuove iniziative per garantire l'allineamento delle politiche dei differenti Paesi con gli obiettivi concordati dal Consiglio e dal Parlamento europeo. Il pacchetto prevede inoltre norme in termini di energia, trasporti, scambio e riduzione delle emissioni e utilizzo del suolo.

Il percorso di transizione ecologica intrapreso richiede sicuramente ingenti investimenti pubblici e privati e per questo motivo i Paesi si sono impegnati a spendere il 30% del bilancio dell'UE per il periodo 2021-2027 in progetti legati al clima.

### Impatto degli edifici

Secondo il report “Energy Efficiency 2023” dell’International Energy Agency (IEA), nel 2022 il consumo finale di energia a livello globale è stato di circa 440 exajoule (EJ); il settore industriale si è confermato come maggiore responsabile con uno share del 38%, seguito dal settore edilizio (30%) e dal settore dei trasporti (26%). Gli edifici, dunque, hanno un impatto notevole sul consumo energetico globale, considerando sia l’energia impiegata durante la loro costruzione sia quella necessaria al riscaldamento, al raffrescamento, all’illuminazione e alle diverse attività quotidiane. Questo settore è responsabile del 26% delle emissioni globali, di cui l’8% sono emissioni dirette degli edifici dovute al riscaldamento e all’impiego del gas per cucinare mentre il restante 18% sono indirette derivanti dalla produzione dell’elettricità richiesta. Gli edifici ad uso residenziale hanno emissioni più elevate, circa il 60% del totale, dovuto al fatto che rappresentano l’80% del patrimonio edilizio esistente. Il settore non residenziale invece impatta maggiormente dal punto di vista del consumo di elettricità.

Nel periodo tra il 2010 e il 2022 il settore edilizio ha registrato un incremento annuo dell’1,1% dei consumi energetici globali, circa 133 EJ, con un andamento differente nelle diverse aree del mondo. In Cina e India l’incremento è stato più elevato, rispettivamente 4,8% e 1,9% annuo, negli USA il consumo è rimasto stabile, nei Paesi dell’UE e in Giappone si è registrata una riduzione del 1,3% e 1,1% annuo come risultato dei progressi a livello di efficienza.



IEA. CC by 4.0

Note: STEPS = Stated Policies Scenario; APS = Announced Pledges Scenario; and NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario.

Source: IEA (2023), [World Energy Outlook 2023](#).

Figura 2 – Consumo energetico totale degli edifici nel periodo 2010-2022 e scenari per il 2030

L'efficientamento energetico del settore edilizio ha dunque un ruolo significativo nella transizione energetica; la superficie globale degli edifici è in continuo aumento, soprattutto nei Paesi in via di sviluppo dove si assiste ad un rapido aumento della popolazione. Secondo una previsione delle Nazioni Unite, la popolazione globale è destinata a crescere da circa 7,6 miliardi nel 2019 fino a 9,4 - 10,1 miliardi nel 2050 e, in aggiunta, un continuo processo di urbanizzazione porterà ad una crescita dal 54% al 66% della popolazione nelle città. In generale, a livello mondiale, la crescita degli standard di vita, della ricchezza e del benessere stanno portando sempre più consumatori ad accedere a numerosi servizi che se da un lato migliorano la vita, dall'altro comportano un aumento delle richieste energetiche.

I sistemi legati ai servizi per il riscaldamento e raffrescamento hanno il maggior potenziale per un incremento dell'efficienza e corrispondente riduzione dei consumi. Attualmente il riscaldamento degli edifici, nella maggior parte dei casi, è ottenuto impiegando energia da fonti fossili ma vi è un'opportunità di elettrificazione attraverso l'installazione di pompe di calore, più efficienti e con la possibilità di essere alimentate da fonti rinnovabili. È dimostrato come le pompe di calore utilizzino dalle tre alle cinque volte meno energia rispetto ai sistemi tradizionali. Il raffrescamento degli ambienti, ottenuto tramite impianti di condizionamento dell'aria, rileva la crescita più rapida tra i consumi legati agli edifici negli ultimi anni; ciò è dovuto anche alle ondate di calore sempre più intense e frequenti in tutto il mondo e più in generale all'incremento delle temperature e all'allungamento delle stagioni più calde.

### Evoluzione futura dell'impatto degli edifici

L'incremento dell'efficienza negli edifici è di grande importanza visto il grande impatto ed è dunque importante allinearsi con gli obiettivi energetici prefissati senza affliggere il comfort termico e la qualità della vita delle persone. I progressi del settore edilizio non sono attualmente in linea con i requisiti concordati per la decarbonizzazione definiti dall'IEA. Nel 2018 l'efficienza è aumentata dell'1,2%, non sufficiente se confrontato con il 3% annuo previsto e soprattutto inferiore all'incremento dell'1,7% e 2,5% rispettivamente registrati nel 2017 e 2000.

La previsione sul consumo energetico del settore edilizio nei prossimi anni, tuttavia, è determinata da una grande incertezza dovuta a diversi fattori: esistono aspetti politici, demografici, sociali, economici e tecnologici che possono portare a scenari differenti tra di loro ed è dunque fondamentale analizzarne diversi per comprendere la potenziale evoluzione ed agire di conseguenza.

La IEA ha sviluppato due diversi scenari per una decarbonizzazione del settore edilizio come risposta agli accordi di Parigi. Nello scenario di sviluppo sostenibile (SDS) l'obiettivo è di minimizzare le emissioni entro il 2070 mentre nello scenario delle emissioni nette zero (NZE 2050), l'obiettivo è di raggiungere le zero emissioni nette entro il 2050. In entrambi i casi è previsto un deciso incremento dell'uso di energia pulita e dell'efficienza energetica degli edifici. Nello SDS è previsto un taglio del 30% delle emissioni dirette entro il 2030 e una riduzione del 10% dei consumi totali entro il 2070 grazie a interventi di riqualificazione energetica sul parco esistente e con la costruzione di edifici ad alta efficienza. Prevede inoltre un'elettrificazione per i sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria andando a sostituire gli attuali sistemi tradizionali alimentati da combustibili fossili con pompe di calore. Nello NZE 2050 è prevista una riduzione del 50% delle emissioni dirette e una

più generica riduzione di quelle indirette tramite un taglio delle emissioni della produzione di elettricità del 60% entro il 2030. L'elettificazione dei sistemi dovrebbe essere accoppiata da un maggiore uso di energia pulita arrivando a una quota del 75% del totale. L'efficienza energetica degli edifici dovrebbe migliorare tramite interventi sull'involucro degli edifici, sulla ventilazione e cambiamenti a livello di comportamento degli occupanti, portando a una riduzione del fabbisogno energetico del 65% entro il 2050.

Gli scenari di decarbonizzazione analizzati richiedono grandi investimenti che porterebbero a uno sviluppo economico e sociale ma che potrebbe andare incontro a diverse problematiche:

- L'impiego di energie da fonti pulite per sostituire i combustibili di origine fossile, la riqualificazione degli edifici esistenti e la realizzazione di nuovi edifici a zero emissioni richiedono investimenti economici che i Paesi sviluppati possono sostenere a differenza di quelli in via di sviluppo; una stima del costo globale di queste tipologie di interventi si aggira tra i 92 e 173 miliardi di dollari nei prossimi 40 anni.
- L'incertezza del costo dell'energia elettrica nei prossimi anni con una maggiore introduzione di energia pulita può portare a problematiche socioeconomiche.
- La decarbonizzazione richiede tecnologie avanzate di cui non tutti i Paesi del mondo sono a disposizione.
- L'impiego di materie prime, in particolare l'uso di minerali preziosi e terre rare, è destinato ad aumentare notevolmente ma la produzione di tali è riservata a poche regioni del globo.

### Impatto degli edifici in Italia

In Italia il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica promuove l'efficientamento attraverso interventi di carattere regolatorio (certificazioni energetiche) e agevolativo (detrazioni e incentivi). Dal 2015 sono in vigore nuove normative riguardanti i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e per la redazione dell'Attestato di Prestazione Energetico (APE) con linee guida e strumenti decisi dallo Stato con le regioni.

Il sistema informativo sugli attestati di prestazione energetica (SIAPE) è lo strumento nazionale per la raccolta degli APE di edifici e unità immobiliari. È realizzato da ENEA mettendo insieme le informazioni raccolte dai dati degli APE provenienti dai catasti locali di Regioni e Province Autonome. Tale sistema ha l'obiettivo di restituire un'immagine dettagliata dello stato dell'arte del patrimonio immobiliare privato e pubblico e della riqualificazione energetica del parco edilizio nazionale considerando diversi aspetti come ad esempio la destinazione d'uso, l'anno di costruzione degli stabili, la classe energetica. ENEA e CTI utilizzano il database degli APE prima citato per redigere annualmente il rapporto sulla certificazione energetica degli edifici. Quattro edizioni sono state rilasciate dal 2020 ad oggi e ciascuna di essa si riferisce agli attestati presentati nell'anno precedente; analizzando i dati raccolti si possono fare alcune considerazioni rispetto alle prestazioni energetiche degli edifici. Questo strumento è utile infatti per definire strategie, misure e azioni sul parco edilizio in linea con gli obiettivi della transizione energetica.

Di seguito sono state estratte e riportate alcune informazioni dal rapporto dell'edizione 2023 (riferita ai dati del 2022) per avere una panoramica sull'attuale patrimonio immobiliare italiano.

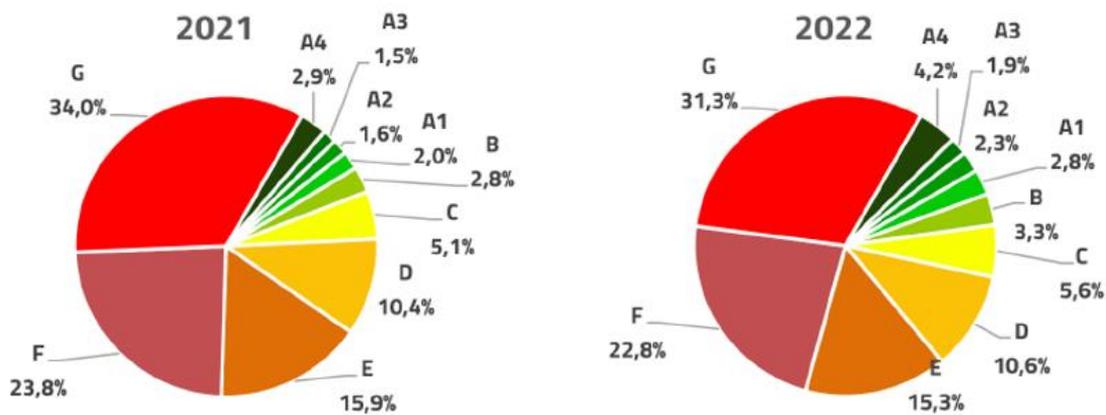


Figura 3 – Distribuzione percentuale degli APE emessi nel 2021 e nel 2022 per classe energetica [1]

La Figura 3 mostra come la maggior parte degli edifici, circa il 55%, ricade ancora nelle classi energetiche più basse, la F e la G, ma da un confronto con i dati dell'anno precedente si osserva un miglioramento delle prestazioni energetiche degli immobili; la percentuale di edifici nelle classi F e G è diminuita a favore delle classi più alte A4-B.

I grafici in Figura 4 mostrano una più dettagliata distribuzione delle classi energetiche secondo una classificazione tra edifici residenziali e non residenziali:

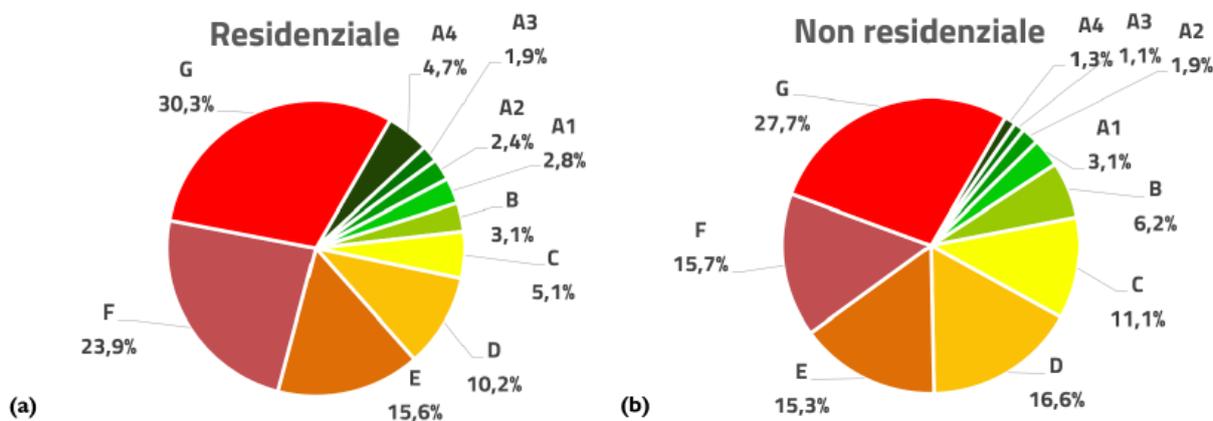


Figura 4 - Distribuzione percentuale degli APE per classe energetica per gli immobili residenziali (a) e non residenziali (b) [1]

Il settore residenziale ricalca l'andamento del campione totale con una distribuzione dei casi che, ad eccezione della classe A4, aumenta con il peggioramento della classe energetica. Il settore non residenziale è caratterizzato da una percentuale più elevata nelle classi A4-B e una inferiore nelle classi peggiori.

Nella tabella riportata in Figura 5 sono riassunti i valori medi di  $EP_{gl}$ ,  $EP_{gl,nren}$ ,  $EP_{gl,ren}$ ,  $EP_{H,nd}$  e di emissioni di CO<sub>2</sub> per ciascuna classe energetica e suddivisi in settore residenziale e non residenziale. L' $EP$  rappresenta l'indice di prestazione energetica, ovvero il fabbisogno di energia primaria in relazione alla superficie utile di riferimento ( $gl \rightarrow$  globale ovvero include tutti i servizi;  $nren \rightarrow$  quota di energia non rinnovabile;  $ren \rightarrow$  quota di energia rinnovabile;  $H,nd \rightarrow$  quota necessaria per il servizio di riscaldamento).

	Classe energetica	n.	EP <sub>gl</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	EP <sub>gl,ren</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	EP <sub>gl,ren</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	EP <sub>H,nd</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> anno]
Residenziale	A4	42.215	69,3	16,4	52,2	30,4	3,7
	A3	16.448	94,3	42,8	49,4	40,3	9,4
	A2	20.919	85,3	57,7	23,3	36,5	12,2
	A1	24.451	91,2	71,5	12,5	41,4	14,9
	B	27.197	104,8	86,9	8,8	50,5	18,0
	C	44.677	120,7	104,4	5,3	57,9	21,5
	D	88.376	139,7	127,2	3,4	69,6	25,8
	E	132.927	160,9	152,6	2,4	84,7	30,6
F	197.170	196,3	189,4	1,9	109,3	37,7	
G	246.592	290,2	282,8	1,9	166,9	56,2	
Non residenziale	A4	1.526	97,0	28,8	65,1	52,2	6,6
	A3	1.392	160,5	81,0	77,0	73,4	19,1
	A2	2.353	202,4	115,9	75,5	80,1	26,5
	A1	3.942	251,8	162,4	75,6	82,5	37,0
	B	7.582	323,0	220,7	89,6	97,4	49,9
	C	13.918	341,6	257,3	53,8	115,9	56,7
	D	20.779	345,1	289,3	33,4	137,9	61,7
	E	18.456	313,9	280,3	20,2	152,2	58,1
F	17.740	278,8	259,8	9,7	154,8	52,8	
G	31.094	254,6	245,9	1,8	154,5	48,6	

Figura 5 - Distribuzione dei valori medi dell'EP<sub>gl</sub>, dell'EP<sub>gl,ren</sub>, dell'EP<sub>gl,ren</sub>, dell'EP<sub>H,nd</sub> e delle emissioni di CO<sub>2</sub> per classe energetica per gli immobili residenziali e non residenziali [1]

La tabella riportata in Figura 6 evidenzia un miglioramento nel tempo delle prestazioni energetiche con una riduzione dell'EP globale e in particolare una riduzione dell'EP non rinnovabile e un aumento dell'EP rinnovabile. Vi è stata una decrescita delle emissioni di CO<sub>2</sub> abbinata al miglioramento degli indici.

	Anno di emissione dell'APE	n.	EP <sub>gl</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	EP <sub>gl,ren</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	EP <sub>gl,ren</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	EP <sub>H,nd</sub> [kWh/m <sup>2</sup> anno]	CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> anno]
Residenziale	2018	439.388	192,55	181,04	2,08	102,44	35,58
	2019	472.906	188,05	176,32	2,17	99,30	35,00
	2020	469.827	188,98	176,18	2,48	100,34	35,41
	2021	727.402	191,63	176,57	2,65	101,79	35,46
	2022	840.972	181,79	165,20	3,07	96,67	33,23
Non residenziale	2018	86.421	342,43	298,03	23,77	154,03	61,53
	2019	90.063	324,21	280,65	22,29	146,77	58,63
	2020	78.817	313,09	269,49	21,37	142,93	56,52
	2021	111.005	297,22	254,21	19,47	137,90	53,32
	2022	118.782	292,60	249,31	19,27	137,21	52,31

Figura 6 - Distribuzione dei valori medi dell'EP<sub>gl</sub>, dell'EP<sub>gl,ren</sub>, dell'EP<sub>gl,ren</sub>, dell'EP<sub>H,nd</sub> e delle emissioni di CO<sub>2</sub> per anno di emissione dell'APE per gli immobili residenziali e non residenziali [1]

I grafici della Figura 7 mostrano la distribuzione degli edifici secondo l'anno di costruzione e la classe energetica appartenente.

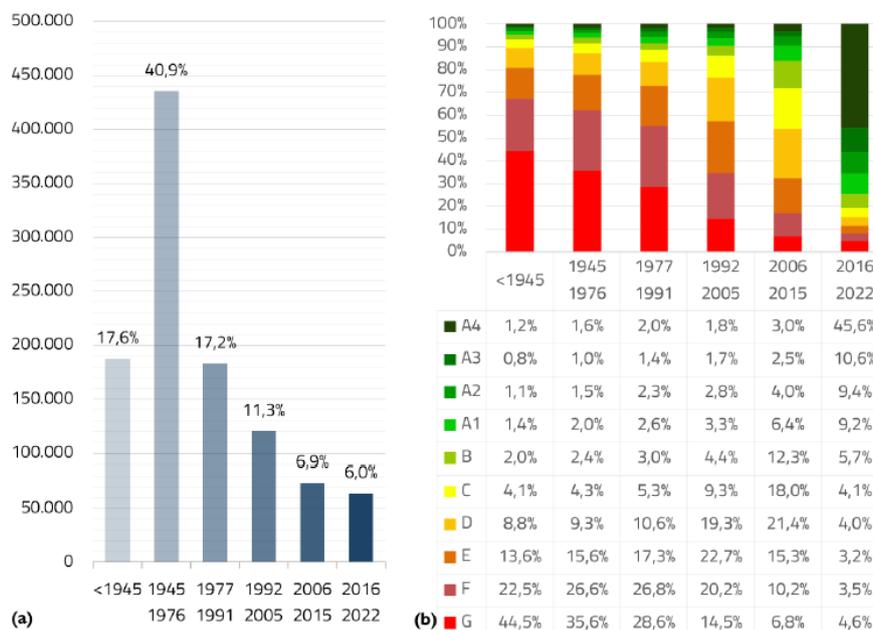


Figura 7 - Distribuzione degli APE per periodo di costruzione (a) e distribuzione percentuale degli APE per periodo di costruzione e classe energetica (b) [1]

Una prima osservazione riguarda il fatto che più della metà degli edifici sottoposti ad APE siano stati realizzati prima del 1991 quando non vi erano ancora normative per la costruzione e per i consumi energetici delle abitazioni e per questo motivo appartengono nella quasi totalità alle classi energetiche peggiori. La distribuzione dal punto di vista delle prestazioni energetiche migliora con gli edifici di più recente realizzazione grazie all'evoluzione della normativa vigente che richiede requisiti sempre più stringenti. Quasi la metà degli edifici realizzati nel periodo 2016-2022 appartiene alla migliore classe energetica (A4).

### Azioni del Politecnico di Torino

L'obiettivo delle emissioni nette zero di gas serra entro il 2050, prefissato dagli accordi di Parigi e Glasgow, è di fondamentale rilevanza se si intende limitare i cambiamenti climatici e mitigarne gli effetti.

Il Politecnico di Torino ha aderito alla campagna globale "Race To Zero" supportata dall'UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), in cui attori non statali tra cui aziende, università, regioni, città e istituzioni di varia tipologia, si impegnano ad intraprendere azioni rigorose e immediate per ridurre le emissioni entro il 2030. Dal 2020, oltre 14 mila membri hanno aderito alla campagna con piani d'azione trasparenti e con solidi obiettivi a breve termine.

L'Ateneo ha deciso di anticipare al 2040 l'obiettivo della neutralità carbonica tramite un Piano pluriennale di Decarbonizzazione, avviando un significativo progetto di analisi delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di programmazione delle possibili azioni da intraprendere. Il Politecnico ha sviluppato il proprio inventario delle emissioni climalteranti seguendo gli standard del protocollo "GHG Protocol

Corporate Accounting and Reporting Standard (2004)”, analizzando le emissioni dirette (Scope 1), indirette derivanti dall’energia acquistata e consumata (Scope 2) e tutte le altre emissioni indirette generate dall’Ateneo come quelle legate ai consumi dei server, alla produzione di rifiuti e alle attività di ricerca (Scope 3).

La Figura 8 mostra la sintesi delle emissioni del Politecnico per il periodo 2018-2023.

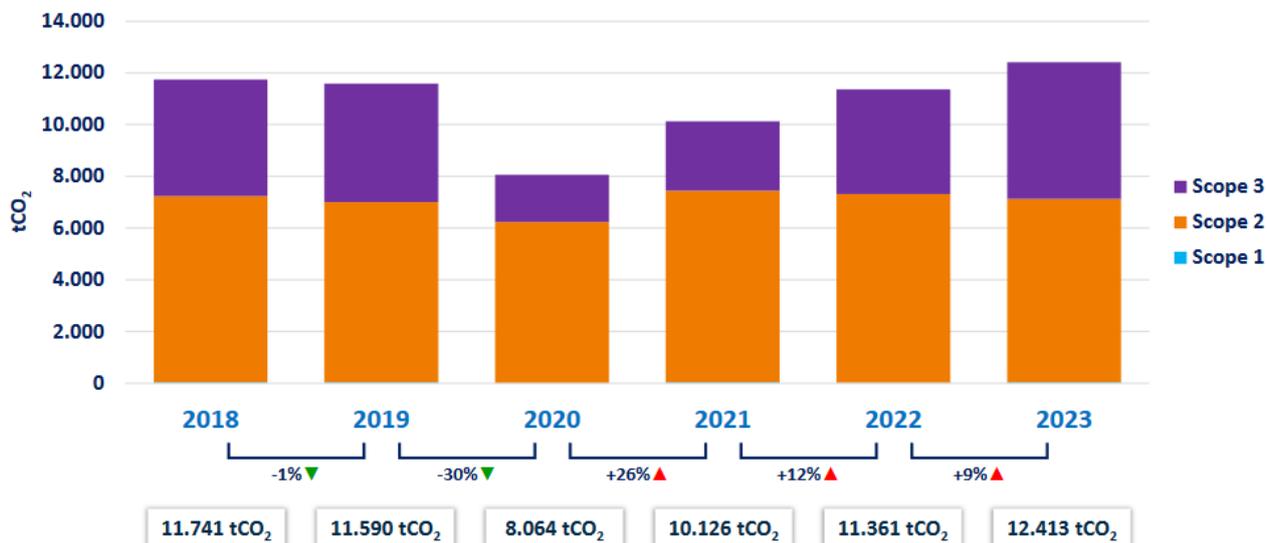


Figura 8 – Emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dal Politecnico di Torino nel periodo 2018-2023 [2]

I grafici in Figura 9 mettono in evidenza le cause delle emissioni relative agli Scope 2 e 3:

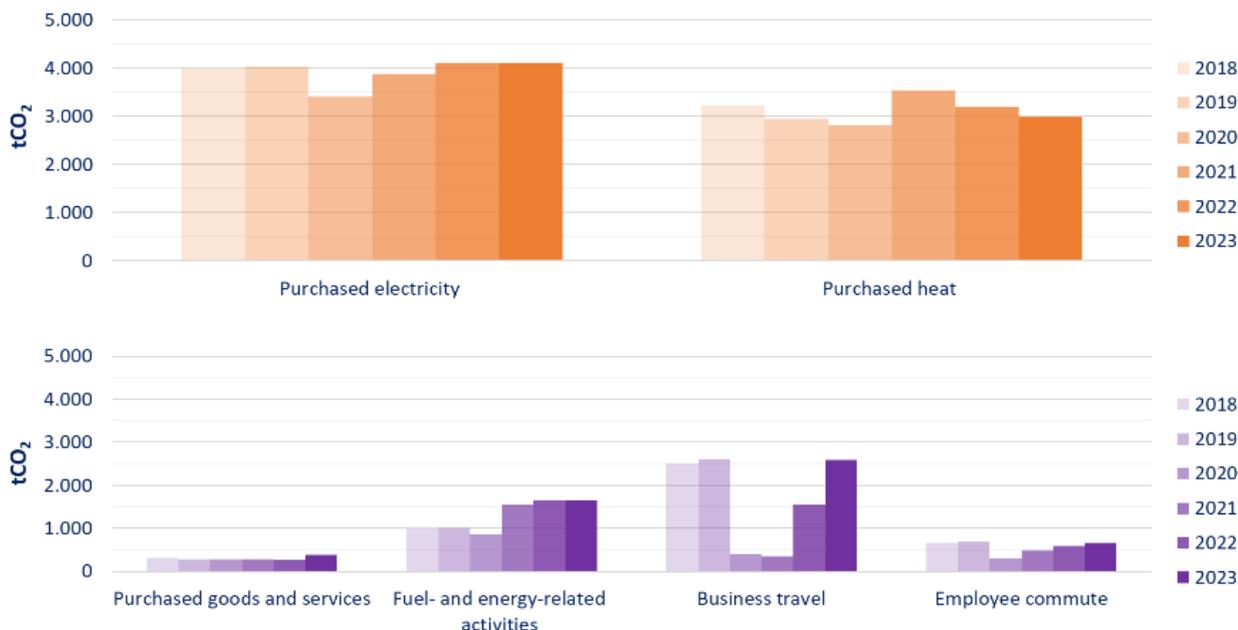


Figura 9 – Focus sugli scope 2 e 3 per le emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dal Politecnico di Torino nel periodo 2018-2023 [2]

L'analisi delle emissioni ha messo in risalto alcuni aspetti, tra cui gli ambiti prioritari di produzione di CO<sub>2</sub> (riscaldamento, elettricità e mobilità), la necessità di coinvolgimento della comunità accademica per la valutazione complessiva delle azioni, la necessità di incrementare il livello di dettaglio (ad esempio l'impatto dei singoli edifici) e la necessità di distinzione tra emissioni legate ad attività di ricerca e al funzionamento ordinario.

Uno dei pilastri strategici per la transizione ecologica e sociale dell'Ateneo e del suo Campus è rappresentato dallo sviluppo del concetto di "Sostenibilità" e si declina attraverso azioni di mitigazione della produzione di gas climalteranti, azioni di adattamento al cambiamento climatico, iniziative mirate a ridurre l'impatto ambientale, gestione responsabile delle risorse e progetti di collaborazione su filoni di attività che vedono centrale il "Piano di Decarbonizzazione".

Fin dal 2012 il Politecnico ha introdotto il concetto di sostenibilità tra i Principi dello Statuto e dal 2014 nel Piano Strategico di Ateneo vi è una linea specifica dedicata a questo ambito. A supporto di questa visione vi è il Green Team, un gruppo di professori, ricercatori, personale amministrativo e studenti che promuove e incoraggia la stessa università ad un'integrazione globale della sostenibilità nella ricerca, nell'insegnamento e nelle diverse attività svolte. L'ideale del Team è fondato sul rendere concreta l'attuazione delle linee del piano strategico sul campus sostenibile per una riduzione dei consumi ma anche per contribuire alla formazione, allo sviluppo e all'esperienza del personale e degli studenti del Politecnico.

L'Ateneo si è posto l'obiettivo di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2040 individuando e intervenendo sulle attività con il maggior impatto relativamente a cinque ambiti tematici: Energia e Clima, Educazione, Inclusione, Risorse, Mobilità e Trasporti. Per questo motivo è stato avviato un Piano pluriennale di Decarbonizzazione che viene aggiornato annualmente e traccia il percorso dell'Ateneo verso l'obiettivo "Net Zero" dettagliando, con specifiche assegnazioni di budget, le azioni già intraprese e quelle previste per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> e aggiornando costantemente la situazione grazie all'inventario delle emissioni del Campus.

Le prime azioni a breve termine relative all'ambito dell'efficientamento energetico, intraprese dall'Ateneo riguardano:

- Contenimento dei consumi di energia elettrica supportato da un'indagine sui carichi elettrici nei periodi di inattività e azioni per la riduzione ed eliminazione degli assorbimenti impropri;
- Contenimento dei consumi di energia termica e frigorifera con sostituzione o ottimizzazione degli impianti termici;
- Coibentazione dell'involucro edilizio;
- Efficientamento degli impianti di illuminazione tramite una mappatura dei sistemi e la sostituzione di essi con nuova illuminazione a LED più efficiente;
- Monitoraggio energetico tramite una mappatura dei consumi nei locali e nelle strutture dell'Ateneo;
- Potenziamento degli impianti fotovoltaici;
- Sostituzione dei serramenti.

Il Politecnico di Torino ha deciso di inserire nel proprio programma di efficientamento energetico l'edificio denominato 4A che rappresenta il caso studio analizzato in questo lavoro di tesi e sul quale è prevista una strutturata azione di ottimizzazione dell'involucro edilizio e degli impianti.

Prima di entrare nel dettaglio degli interventi specifici, si è ritenuto opportuno fare un richiamo alle principali direttive europee che regolano l'efficientamento energetico, tra cui la EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) e la RED (Renewable Energy Directive), nonché alle loro applicazioni a livello nazionale. Queste rappresentano un fondamentale quadro di riferimento che orienta le politiche energetiche e la pianificazione degli interventi sia a livello europeo che nazionale.

## 2. Direttive europee e normativa italiana sull'efficienza energetica degli edifici

### Direttive Europee

A livello europeo, in materia di efficienza energetica e di fonti rinnovabili, sono state introdotte e aggiornate a più riprese numerose direttive per indicare ai Paesi membri la strada da percorrere. Questi atti giuridici stabiliscono i principi e gli obiettivi che gli Stati dell'Unione Europea sono tenuti a conseguire, sebbene poi spetti ad essi definire le modalità di attuazione tramite le disposizioni nazionali. Di seguito sono riportate le direttive più importanti introdotte negli anni:

#### ➤ EPBD (Direttiva 2002/91)

La direttiva EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 16 dicembre 2002, con lo scopo di dare un indirizzo, comune a tutti gli Stati membri, in materia di miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. Le disposizioni contenute in essa riguardano:

- il quadro generale di una metodologia per il calcolo della prestazione energetica degli edifici;
- l'applicazione di requisiti minimi in materia di prestazione energetica degli edifici di nuova costruzione e di quelli esistenti sottoposti a importanti ristrutturazioni;
- la certificazione energetica degli edifici obbligatoria per la costruzione, la compravendita o la locazione;
- l'ispezione periodica delle caldaie e dei sistemi di condizionamento dell'aria negli edifici al fine di limitare il consumo energetico e le emissioni di biossido di carbonio e per suggerire interventi migliorativi.

Il compito degli Stati membri era di recepire e applicare la direttiva con normative nazionali, per adeguarsi al progresso tecnologico e garantire una transizione sostenibile.

#### ➤ EPBD II (Direttiva 2010/31)

La direttiva EPBD II è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 19 maggio 2010. Si tratta di una rifusione della precedente in cui si rafforzano gli obiettivi già presentati nel 2002 promuovendo ulteriormente l'efficienza energetica degli edifici e integrando nuove misure per ridurre le emissioni di gas serra e raggiungere gli obiettivi climatici dell'UE. Viene introdotto il concetto di "edifici a energia quasi zero" (nZEB), ovvero edifici ad altissima prestazione energetica con un fabbisogno molto basso o quasi nullo che dovrebbe essere coperto in misura significativa da energia proveniente da fonti rinnovabili. La direttiva prevede inoltre che:

- entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero;

- a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero;
- gli Stati membri elaborino piani nazionali finalizzati all'aumento del numero di edifici nZEB.

All'interno del documento viene trattata l'importanza di mettere a disposizione strumenti finanziari o di altro tipo per favorire il miglioramento delle prestazioni energetiche e il passaggio a edifici nZEB.

#### ➤ EPBD III (Direttiva 2018/844)

La direttiva EPBD III è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 30 maggio 2018 per modificare la precedente direttiva sulla prestazione energetica degli edifici e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Le principali modifiche introdotte sono le seguenti:

- Gli Stati membri devono stabilire una strategia a lungo termine per trasformare il parco immobiliare nazionale in edifici ad alta efficienza e decarbonizzato entro il 2050;
- Le strategie devono includere una tabella di marcia con misure e indicatori di progresso misurabili stabiliti a livello nazionale con tappe intermedie per il 2030 e 2040;
- L'introduzione del concetto di “predisposizione degli edifici all'intelligenza” con la promozione di sistemi di automazione per monitorare, regolare e migliorare l'uso dell'energia negli edifici;
- Una maggiore attenzione verso la mobilità elettrica con la realizzazione di infrastrutture come punti di ricarica in edifici non residenziali di nuova costruzione o sottoposti a ristrutturazioni importanti con più di dieci posti auto;
- Aggiornamenti per l'ispezione degli impianti di riscaldamento e condizionamento dell'aria.

#### ➤ EPBD IV (Direttiva 2024/1275)

La direttiva EPBD IV è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 24 aprile 2024 e si tratta della più recente rifusione in ambito di prestazioni energetiche degli edifici.

L'articolo 1 spiega che *“La presente direttiva promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici e la riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra provenienti dagli edifici all'interno dell'Unione per conseguire un parco immobiliare a emissioni zero entro il 2050...”*.

Le principali modifiche introdotte sono le seguenti:

- Gli edifici di nuova costruzione dovranno essere ad emissione zero:
  1. A decorrere dal 1° gennaio 2028 per i nuovi edifici di proprietà degli enti pubblici;
  2. A decorrere dal 1° gennaio 2030 per tutti gli edifici;
- Gli Stati membri devono stabilire soglie massime di prestazione energetica per gli edifici non residenziali più energivori, garantendo che:
  1. Entro il 2030 il 16% del parco immobiliare nazionale superi la soglia definita;
  2. Entro il 2033 il 26% del parco immobiliare nazionale superi la soglia definita;
- Il consumo medio annuo di energia primaria in kWh/m<sup>2</sup> dell'intero parco immobiliare residenziale deve diminuire del:
  1. 16% rispetto al 2020 entro il 2030;

2. 20-22% rispetto al 2020 entro il 2035;

- Almeno il 55% del calo del consumo medio di energia primaria deve essere ottenuto attraverso la ristrutturazione del 43% degli edifici residenziali con le prestazioni energetiche peggiori;
- I nuovi edifici dovrebbero essere progettati in modo da ottimizzare il loro potenziale di produzione di energia solare in base al livello di irraggiamento del sito. L'articolo 10 stabilisce che gli Stati membri assicurano l'installazione di impianti solari laddove tecnicamente ed economicamente fattibile, definendo le superfici coperte utili da raggiungere per ogni anno e categoria di edificio;
- Viene introdotto il concetto di "edificio a emissioni zero", ovvero un edificio che non genera emissioni in loco di carbonio da combustibili fossili e che il consumo totale annuo sia coperto da energia da fonti rinnovabili generata in loco o nelle vicinanze o da comunità energetiche.

#### ➤ RED (Direttiva 2009/28)

La direttiva RED (*Renewable Energy Directive*) è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 23 aprile 2009 e l'articolo 1 spiega che:

*“La presente direttiva stabilisce un quadro comune per la promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Fissa obiettivi nazionali obbligatori per la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia...”*

Tali piani miravano a definire gli obiettivi nazionali per il 2020 comprensivi delle misure necessarie a raggiungerli. Tra gli obiettivi comuni figuravano i cosiddetti “obiettivi 20-20-20” ossia:

- Ridurre del 20% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990;
- Raggiungere un miglioramento pari al 20% dell'efficienza energetica;
- Portare la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili al 20% del consumo finale lordo di energia.

#### ➤ RED II (Direttiva 2018/2001)

La direttiva RED II è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea l'11 dicembre 2018. Si tratta di una rifusione della precedente in cui sono stati aggiornati gli obiettivi in vista del 2030 stabilendo che la quota di energia da fonti rinnovabili deve essere almeno pari al 32% sul consumo finale lordo dell'Unione. Una delle novità riguarda l'utilizzo di energia rinnovabile negli impianti di riscaldamento e raffrescamento. L'articolo 23 della direttiva stabilisce che gli Stati membri devono impegnarsi per incrementare la quota di energia rinnovabile in tale settore di circa 1,3 punti percentuali come media annuale per i periodi dal 2021 al 2025 e dal 2026 al 2030, rispetto alla quota nel 2020.

#### ➤ RED III (Direttiva 2023/2413)

La direttiva RED III è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 18 ottobre 2023 e si tratta della più recente rifusione delle precedenti RED e RED II in ambito di promozione di energie rinnovabili. Le principali modifiche riguardano i seguenti aspetti:

- La quota di energia da fonti rinnovabili nel consumo energetico finale lordo dell'Unione deve essere almeno pari al 42,5% entro il 2030, con l'impegno collettivo di portare questo valore al 45%;
- L'introduzione dell'articolo 15-bis prevede che i membri stabiliscano una quota nazionale di energia rinnovabile nel consumo energetico del settore edilizio, tenendo in considerazione l'obiettivo dell'UE di raggiungere almeno il 49% entro il 2030;
- L'aumento della quota di energia rinnovabile nel settore del riscaldamento e del raffrescamento deve essere di almeno 0,8 punti percentuali come media annua calcolata per il periodo 2021-2025 e di almeno 1,1 punti percentuali per il periodo 2026-2030, rispetto alla quota del 2020.

➤ EED (Direttiva 2006/32)

La direttiva EED (*Energy Efficiency Directive*) è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 5 aprile 2006 con lo scopo di migliorare l'efficienza degli usi finali dell'energia negli Stati membri. L'obiettivo da conseguire è un risparmio energetico nazionale indicativamente pari al 9% entro il 2016 ottenuto attraverso misure di efficientamento energetico che variano da Stato a Stato. In particolare, la direttiva spiega come il settore pubblico debba coprire un ruolo esemplare con politiche e misure come, ad esempio, la ristrutturazione di edifici pubblici. Nell'allegato III si riportano per ciascun settore alcuni esempi di miglioramento dell'efficienza energetica ammissibili e tra quelli per il settore degli edifici si trovano:

- Installazione o aggiornamento di sistemi di climatizzazione con l'utilizzo di pompe di calore o nuove caldaie più efficienti;
- Isolamento della cavità murarie e dei tetti;
- Installazione di serramenti a doppio o triplo vetro;
- Impiego di illuminazione più efficiente con l'introduzione di sistemi di controllo digitale e l'uso di rilevatori di movimento;
- Sistemi del recupero del calore;
- Generazione domestica di energia rinnovabile che consenta di ridurre l'energia acquistata dalla rete.

➤ EED II (Direttiva 2012/27)

La direttiva EED II è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 25 ottobre 2012 e sostituisce la precedente EED. La novità principale è la modifica dell'obiettivo di efficienza energetica, alzato al 20% entro il 2020 e l'introduzione di basi per ulteriori miglioramenti oltre tale data. A supporto del ruolo esemplare che deve coprire il settore pubblico, ogni Stato membro deve garantire che dal 1° gennaio 2014 il 3% della superficie coperta utile totale di edifici di proprietà del governo, o da esso occupati, siano ristrutturati ogni anno. Per quanto riguarda le grandi imprese, queste devono effettuare un audit energetico ogni quattro anni in modo da individuare opportunità di risparmio energetico.

➤ EED III (Direttiva 2018/2002)

La direttiva EED III è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea l'11 dicembre 2018 e modifica la precedente direttiva del 2012. Viene introdotto il nuovo obiettivo in termini di efficienza energetica pari a 32,5% entro il 2030. Gli Stati membri devono garantire un risparmio annuo di energia finale almeno pari allo 0,8% dal 2021 al 2030, ottenuto attraverso misure di efficientamento energetico nei settori edilizi, industriale e dei trasporti.

➤ EED IV (Direttiva 2023/1791)

La direttiva EED IV è stata emanata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio dell'Unione Europea il 13 settembre 2023 ed è il più recente atto in termini di efficienza energetica. Con questa direttiva gli Stati membri sono tenuti a garantire una riduzione collettiva del consumo energetico pari almeno all'11,7% entro il 2030 rispetto alle proiezioni dello scenario di riferimento UE 2020, in modo da non superare i 763 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). In aggiunta viene fissato un limite per il consumo di energia primaria da non superare pari a un volume di 992,5 Mtep nel 2030. I membri devono provvedere a ridurre dell'1,9% all'anno il consumo di energia finale degli enti pubblici rispetto ai valori del 2021. Sono introdotti obblighi di risparmio energetico pari:

- Dal 1° gennaio 2021 al 31 dicembre 2023, allo 0,8% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019;
- Dal 1° gennaio 2024 al 31 dicembre 2025, all'1,3% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019;
- Dal 1° gennaio 2026 al 31 dicembre 2027, all'1,5% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019;
- Dal 1° gennaio 2028 al 31 dicembre 2030, all'1,9% del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 1° gennaio 2019.

### Legislazione Italiana

L'Italia, come ogni altro membro dell'Unione Europea, ha posto l'energia e il clima al centro della sua agenda politica. In particolare, per raggiungere gli obiettivi dell'Unione Europea, ha recepito le indicazioni derivanti dalle diverse direttive UE con una serie di decreti e provvedimenti che hanno modificato, integrato e attuato le disposizioni previste dai testi di recepimento. Le direttive dell'UE vincolano infatti gli Stati membri cui sono rivolte per quanto riguarda il risultato da raggiungere ma è compito delle autorità nazionali definire poi la forma e i mezzi con cui raggiungere tale scopo. Per far sì che la direttiva abbia effetto a livello nazionale, lo Stato membro deve adottare una legge per recepirla entro il termine indicato al momento dell'adozione della direttiva stessa. Di seguito sono riportati i decreti adottati per recepire le direttive descritte in precedenza.

➤ Decreto Legislativo 192/2005:

Il primo decreto derivante dalle politiche comunitarie è stato il D.Lgs. 192/2005 che recepisce a livello nazionale la Direttiva 2002/91 (EPBD) portando a stabilire i criteri, le condizioni e le modalità per il

miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici in Italia. Il fine era quello di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica per contribuire a raggiungere gli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni di gas serra posti dal protocollo di Kyoto. I contenuti principali sono i seguenti:

- Introduzione di una metodologia per il calcolo della prestazione energetica degli edifici;
- Introduzione di requisiti minimi da rispettare in termini di prestazione energetica finalizzati al contenimento dei consumi che tengono conto di numerosi fattori, tra cui le caratteristiche dell'edificio, la destinazione d'uso, il clima esterno e interno;
- Obbligo di dotare gli edifici in compravendita, in locazione o nuova costruzione di un attestato di certificazione energetica (ACE) che fornisca informazioni sulla classe energetica e sui consumi dell'edificio;
- Controllo periodico e manutenzione eseguiti sugli impianti termici con l'obbligo per l'operatore di redigere un rapporto di controllo tecnico;
- Promozione dell'uso razionale dell'energia.

Nell'allegato C vengono quindi introdotti i requisiti per quanto riguarda i valori limite di fabbisogno annuo di energia primaria, di trasmittanza termica delle strutture opache verticali e orizzontali e per le chiusure trasparenti. Tali valori sono successivamente stati aggiornati nel D.Lgs. 311/2006. Nell'allegato D vengono invece proposte indicazioni e raccomandazioni per l'integrazione di impianti solari termici e fotovoltaici e per l'allaccio alla rete del teleriscaldamento.

➤ Decreto Legislativo 63/2013:

Il decreto 63/2013 recepisce a livello nazionale la direttiva 2010/31 (EPBD II) apportando modifiche al D.Lgs. 192/2005. I punti chiave riguardano promuovere il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, sostenere la diversificazione energetica e conseguire gli obiettivi nazionali in materia energetica e ambientale. Il decreto in particolare disciplina:

- la metodologia per il calcolo delle prestazioni degli edifici;
- i nuovi requisiti per fabbricati di nuova costruzione, soggetti a riqualificazione energetica o ristrutturazione importante;
- la definizione di un piano di azione per la promozione degli "edifici a energia quasi zero" (nZEB) che obbligava dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da pubbliche amministrazioni o di loro proprietà ad essere edifici nZEB. Dal 1° gennaio 2021 tutti gli edifici di nuova realizzazione devono essere edifici nZEB.

Con questo decreto l'attestato di certificazione energetica viene sostituito dall'attestato di prestazione energetica (APE), con una validità di dieci anni e deve essere aggiornato in caso di ristrutturazione o riqualificazione che modifichi la classe energetica. Vengono inoltre introdotte detrazioni fiscali per interventi di efficientamento energetico nella misura del 65% delle spese sostenute, con alcune limitazioni.

➤ Legge 90/2013:

La legge 90 del 3 agosto 2013 rappresenta la conversione in legge, con alcune modifiche, del decreto legislativo 63/2013. In particolare, questa punta a rafforzare alcune disposizioni per rendere più rigorosa e applicabile la normativa in materia di efficienza energetica degli edifici. Un esempio riguarda l'obbligo di allegare l'APE ai contratti di compravendita o locazione, pena la nullità dell'atto e sanzioni amministrative. Inoltre, rafforza l'obbligo di pianificare un percorso concreto per quanto riguarda gli edifici nZEB, introducendo un meccanismo di controllo per verificare il rispetto degli standard. Viene introdotto l'obbligo di aggiornare periodicamente i requisiti minimi di prestazione energetica da rispettare con lo scopo di raggiungere gli obiettivi fissati a livello europeo.

➤ Decreti Ministeriali 26/06/2015:

Il 26 giugno 2015 sono stati emanati dal Ministero dello Sviluppo Economico tre provvedimenti fondamentali che hanno ulteriormente definito il quadro normativo nazionale in materia di efficienza energetica degli edifici:

- D.M. 26/06/2015 Requisiti minimi → definisce le modalità di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici adottando le specifiche tecniche UNI/TS 11300 e UNI EN 15193 con le successive modifiche e integrazioni; stabilisce inoltre i nuovi requisiti minimi sia per nuove costruzioni sia soggette a ristrutturazione;
- D.M. 26/06/2015 Linee guida APE → definisce le nuove regole di redazione dell'attestato di prestazione energetica stabilendo la metodologia di calcolo e il format del documento;
- D.M. 26/06/2015 Relazione Tecnica → definisce gli schemi tipo della relazione tecnica di progetto in funzione della tipologia di intervento sull'edificio.

➤ Decreto Legislativo 48/2020:

Il decreto 48/2020 recepisce a livello nazionale la direttiva 2018/844 (EPBD III) sulla prestazione energetica degli edifici. Vengono introdotti i criteri per la predisposizione di una strategia nazionale a lungo termine per la ristrutturazione di edifici pubblici e privati, residenziali e non residenziali, al fine di ottenere un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza energetica entro il 2050. Tale strategia comprende:

- Una ricognizione del parco immobiliare nazionale;
- L'individuazione di approcci per una ristrutturazione efficace in termini di costi considerando la tipologia di immobile e la zona;
- Una revisione delle politiche e delle azioni in vigore;
- L'introduzione di nuove politiche per stimolare le ristrutturazioni importanti ed efficaci e per accelerare la riqualificazione energetica.

Viene istituito presso ENEA il portale nazionale sulla prestazione energetica degli edifici con lo scopo di fornire ai cittadini e alle imprese informazioni per le riqualificazioni energetiche efficaci. Il decreto infine introduce, in linea con la direttiva europea, un sistema di valutazione dell'intelligenza degli

edifici per identificare la capacità del fabbricato nel monitorare e ottimizzare i consumi tramite tecnologie di automazione e controllo.

La direttiva europea 2024/1275 (EPBD IV) è l'atto più recente relativo alle prestazioni energetiche degli edifici e dovrà essere recepita a livello nazionale entro il 2026.

➤ Decreto Legislativo 28/2011:

Il D.Lgs. 28/2011 rappresenta l'attuazione nazionale della direttiva 2009/28 (RED) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili. In particolare, definisce gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico necessari per il raggiungimento degli obiettivi per il 2020 in materia di quota di energia da fonti rinnovabili. Gli obiettivi nazionali prevedono di raggiungere una quota da fonti rinnovabili pari al 17% sul consumo finale lordo entro il 2020.

Un'azione immediata con risultati a breve termine non era assolutamente fattibile e per questo si sono posti obiettivi intermedi che sono riassumibili nella Figura 10:

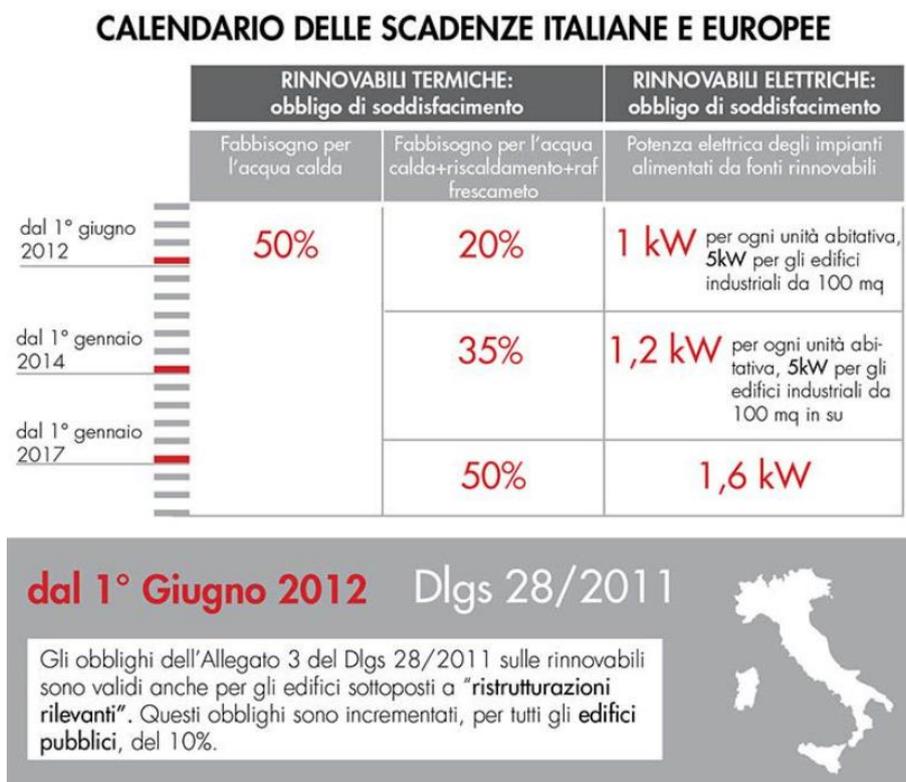


Figura 10 – Calendario delle scadenze italiane ed europee in merito agli obblighi di utilizzo dell'energia rinnovabile

➤ Decreto Legislativo 199/2021:

Il D.Lgs. 199/2021 recepisce a livello nazionale la direttiva 2018/2001 (RED II) relativamente all'uso e alla promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Con questo decreto gli obiettivi nazionali vengono

aggiornati puntando a raggiungere una quota minima del 30% di energia da fonti rinnovabili sul consumo complessivo lordo entro il 2030. Viene inoltre introdotto un nuovo obiettivo relativo all'incremento di energia da fonti rinnovabili nei consumi finali di riscaldamento e raffrescamento pari a 1,33 punti percentuali come media annua calcolata per i periodi dal 2021 al 2025 e dal 2026 al 2030.

La direttiva 2023/2413 (RED III) deve ancora essere recepita a livello nazionale.

➤ Decreto Legislativo 102/2014:

Il D.Lgs. 102/2014 recepisce a livello nazionale la direttiva 2012/27 (EED II) e include misure per la promozione e il miglioramento dell'efficienza energetica in tutti i settori. L'obiettivo nazionale fissato da questo decreto è la riduzione, entro il 2020, di 20 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio dei consumi di energia primaria. L'articolo 4, più precisamente, pone l'attenzione sugli immobili con la richiesta all'ENEA di proposte di intervento efficaci in termini di costi e differenziati in base al tipo di edificio e alla zona climatica. Il decreto inoltre stabilisce che ogni anno, nel periodo dal 2014 al 2020, si preveda la riqualificazione energetica di almeno il 3% della superficie coperta utile degli immobili appartenenti alla pubblica amministrazione, riducendo così il consumo e le emissioni di gas ad effetto serra. Tale obiettivo è stato successivamente prolungato fino al 2030 dal D.Lgs. 73/2020 che recepisce la direttiva 2018/2022.

### Norme tecniche di riferimento

Una norma tecnica è un documento che stabilisce come applicare le regole stabilite dalle leggi definendo le specifiche tecniche, i criteri e i requisiti in relazione all'argomento che trattano. Possono diventare obbligatorie quando vengono richiamate in una legge o in un decreto. Di seguito sono riportate le due norme più importanti per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici.

➤ UNI TS 11300:

La specifica tecnica UNI TS 11300 nasce con l'obiettivo di definire una metodologia di calcolo univoca per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici che dipendono dal sistema edificio-impianto, dalle caratteristiche termiche dell'involucro e dal rendimento degli impianti presenti. Nel documento vengono quindi specificati i metodi per il calcolo del fabbisogno di energia per i servizi presenti nell'edificio (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione, trasporto di persone) e per i rendimenti degli impianti termici. Si articola in sei parti:

- UNI TS 11300-1:2014 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale”.
- UNI TS 11300-2:2019 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione e l'illuminazione”.

- UNI TS 11300-3:2010 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva”.
- UNI TS 11300-4:2016 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria”.
- UNI TS 11300-5:2016 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell’energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili”.
- UNI TS 11300-6:2016 “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili”.

La UNI TS 11300 utilizza un approccio semplificato e statico basandosi su valori medi mensili per il calcolo delle prestazioni energetiche. In questo modo vengono considerate condizioni costanti per ogni mese dell’anno senza includere le variazioni giornaliere o orarie e quindi i parametri utilizzati, come ad esempio le temperature e l’irraggiamento, sono rappresentati da valori medi mensili. L’approccio usato è sicuramente più semplice e richiede meno risorse computazionali anche per il calcolo ma presenta alcuni limiti in quanto non considera il comportamento dinamico dell’edificio incidendo quindi sull’accuratezza del calcolo.

- UNI EN ISO 52016:2018 “Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e raffrescamento”.

Questa norma tecnica internazionale definisce un metodo di calcolo dettagliato per analizzare il fabbisogno di energia dell’edificio e il bilancio termico dell’involucro dell’edificio, permettendo di ottenere l’andamento delle temperature interne e il carico termico richiesto all’impianto. La novità introdotta riguarda il nuovo approccio dinamico orario secondo cui il comportamento dell’edificio viene analizzato ora per ora tenendo quindi in considerazione anche le variazioni climatiche, dei carichi interni e dell’inerzia termica. Il vantaggio è che si ottiene una maggior accuratezza nel calcolo dei consumi e dei carichi. In aggiunta, la norma illustra le regole basilari per la definizione delle zone termiche, i dati di input necessari al calcolo, descrive gli algoritmi di risoluzione e i dati di output.

La UNI EN ISO 52016:2018 è una norma internazionale, recepita anche in Italia, che offre un approccio più avanzato per il calcolo delle prestazioni energetiche. Questa sta progressivamente integrando e sostituendo in alcune parti la UNI TS 11300 che è tuttora impiegata nelle certificazioni energetiche perché è più consolidata in quanto è stata sviluppata per adattarsi alle condizioni climatiche, normative e costruttive dell’Italia.

Definite le normative che regolano gli interventi di efficientamento energetico, risulta utile introdurre il contesto storico in cui si inserisce l’edificio oggetto di studio. Pertanto, nel capitolo successivo verrà analizzata l’evoluzione della sede del Politecnico di Torino, ponendo una maggiore attenzione sulla realizzazione dell’edificio di interesse.

### 3. Inquadramento storico dell'edificio oggetto di studio

#### Storia del Politecnico

Il Politecnico di Torino nasce con la fusione di due istituzioni: la Regia Scuola di Applicazione, nata nel 1859, e il Regio Museo Industriale, inaugurato nel 1871.

Nel 1879 venne approvato un nuovo regolamento per il Regio Museo con la creazione di una nuova categoria di ingegneri detti industriali e grazie a ciò venne sancita la collaborazione fra il Regio Museo e la Regia Scuola di applicazione. Questa porgeva al problema della metodologia di preparazione degli ingegneri una soluzione soltanto transitoria mentre una soluzione definitiva si sarebbe potuta raggiungere soltanto per mezzo di una istituzione unica e propriamente organizzata.

Visto il crescente sviluppo, dal 1903 si iniziò ad avvertire l'esigenza di riformare i due istituti torinesi. Il 26 giugno 1905 l'onorevole Fortis, presidente del Consiglio dei ministri, presentò al Senato del Regno il progetto di legge per l'istituzione del Regio Politecnico di Torino che fondeva in sé la Regia Scuola e il Museo. L'intento non era quello di costituire un semplice istituto locale di istruzione tecnica superiore, bensì un ente nazionale per l'incremento dell'industria e dell'economia del Paese. Il disegno di legge divenne realtà nel 1906, anno in cui si inaugurò il primo anno del Politecnico.

Negli anni successivi, sia per l'aumento nel numero degli studenti nei tre anni di applicazione, sia per l'aumento degli anni di corso da tre a cinque, si ripresentò il problema dello spazio e dei locali limitati che, si può dire, non cessò mai di accompagnare il Politecnico durante la sua ormai lunga vita. Furono anni di espansione logistica dell'Istituto: dopo avere acquisito, come si rileva da un Decreto datato 5 gennaio 1908, gli stabili già della Scuola di Applicazione e del Regio Museo, ovvero il Castello del Valentino con tutte le sue attinenze ed il Palazzo del Museo industriale, il Regio Politecnico provvide ad ampliarli con la costruzione di nuove aule. Tuttavia, poiché a seguito di un continuo aumento nelle iscrizioni il problema dello spazio si era fatto nuovamente presente, furono conclusi degli accordi con il Governo e il Municipio di Torino per la costruzione di una nuova, unica e definitiva sede dell'Istituto. Così si pensava nel 1912 e mancò poco che essa non giungesse davvero alla tanto auspicata soluzione; purtroppo, lo scoppio della Prima guerra mondiale lo impedì.

Nel 1922 la direzione passò al Prof. Gustavo Colonnetti e, poco dopo, nell'aprile del 1923, il primo Politecnico di Torino si trasformava in Scuola di Ingegneria e in Scuola di Architettura.

A partire dal 1927 il Politecnico cominciò a ricevere forti contributi da enti pubblici e privati tra i quali spiccava la FIAT; nel 1938 Giovanni Agnelli annunciò al Consiglio d'amministrazione della sopracitata FIAT l'intenzione di stabilire al Lingotto una nuova sede del Politecnico, progetto però mai attuato a causa dello scoppio della Seconda guerra mondiale. Durante gli anni della guerra, la situazione non fece che peggiorare a causa di un bombardamento che nel 1942 colpì i fabbricati costituenti il Politecnico, che sorgevano sul terreno demaniale delimitato fra le vie Accademia Albertina, Giolitti, San Francesco da Paola e Cavour. I corsi di insegnamenti vennero trasferiti ad Acqui e nel 1944 Colonnetti inaugurò l'attività del Campo Universitario di Losanna dove professori e studenti, profughi dall'Italia, cercarono di ricomporre le basi per la ricostruzione, per la quale fu scelta l'area dell'ex Stadium Nazionale compresa fra i corsi Duca degli Abruzzi, Peschiera, Castelfidardo e Montevicchio.

Il progetto di costruzione della nuova sede si è valso dell'opera collegiale di un gruppo di professori di Istituto presieduto dal Prof. Arch. Giovanni Muzio ispirato al precedente progetto che fin dal 1940 era stato approntato per la costruzione del nuovo Politecnico sull'area della Cascina Ceresa in Regione Molinette, a quel tempo destinata a tale scopo. Detto progetto venne modificato e adattato alla configurazione della nuova area prescelta, adeguandolo alle esigenze della popolazione scolastica del tempo e tenendo conto degli incrementi futuri.

Nel frattempo, nel 1945 riaprì il Politecnico al Castello del Valentino e l'anno dopo, con la Proclamazione della Repubblica Italiana, si ebbe il passaggio dalla denominazione di Regio Politecnico a Politecnico di Torino

### Sede centrale del Politecnico

Nel 1958, durante il rettorato di Antonio Capetti, venne inaugurata la nuova sede del Politecnico in corso Duca degli Abruzzi 24, dove furono trasferiti tutti gli istituti di Ingegneria, mentre la facoltà di Architettura rimase al Castello del Valentino. Il complesso degli edifici eretti nel '58, fu progettato e costruito in tre gruppi, aventi il fronte principale verso corso Duca degli Abruzzi.

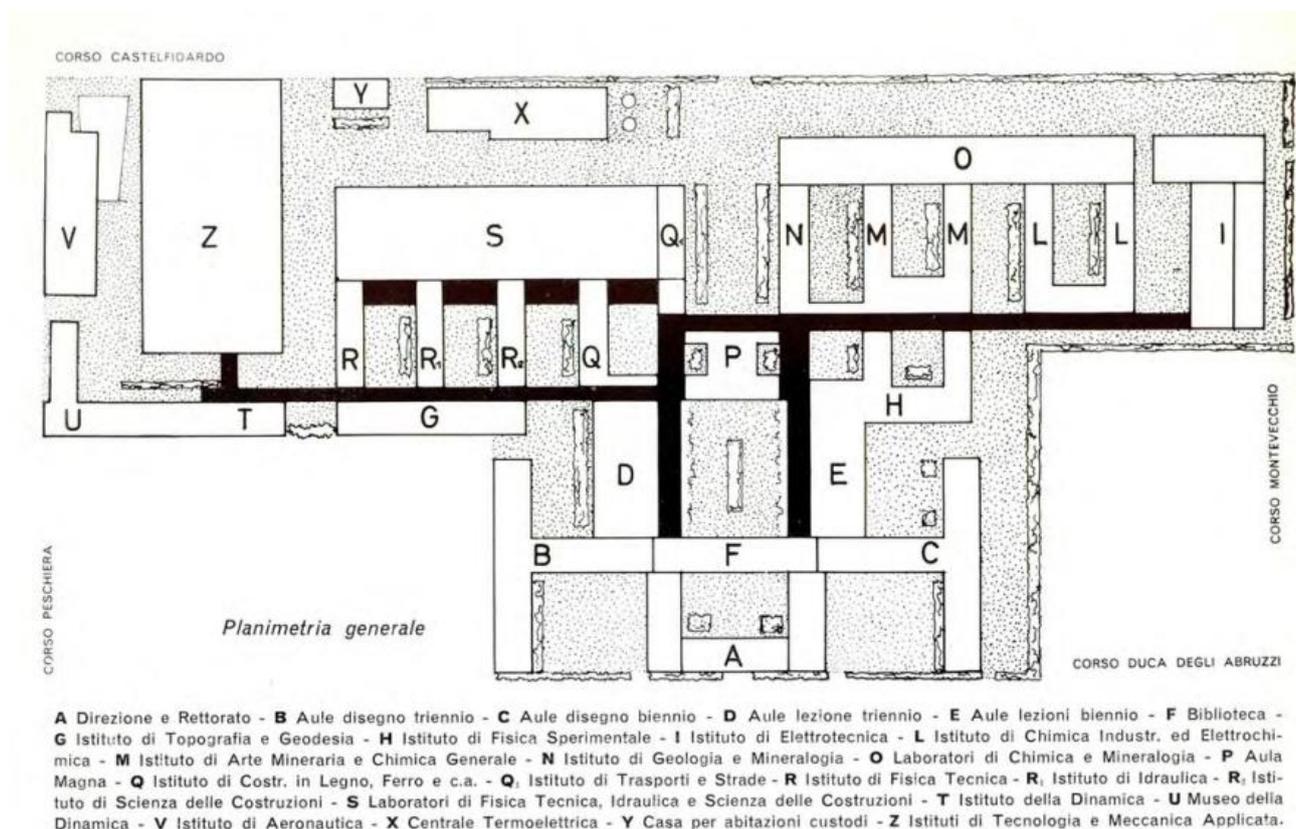


Figura 11 – Planimetria generale della sede centrale del Politecnico di Torino (1958) [4]

In un primo gruppo troviamo il Rettorato, il Palazzo della Direzione e gli Uffici amministrativi. A detto gruppo, formato da fabbricati a quattro o più piani fuori terra, si aggiunge l'edificio centrale dell'Aula Magna a due piani. Fa seguito un secondo ordine di edifici a tre o più piani destinati ai diversi Istituti, opportunamente intervallati da appositi cortili e distinti per complessi di categorie

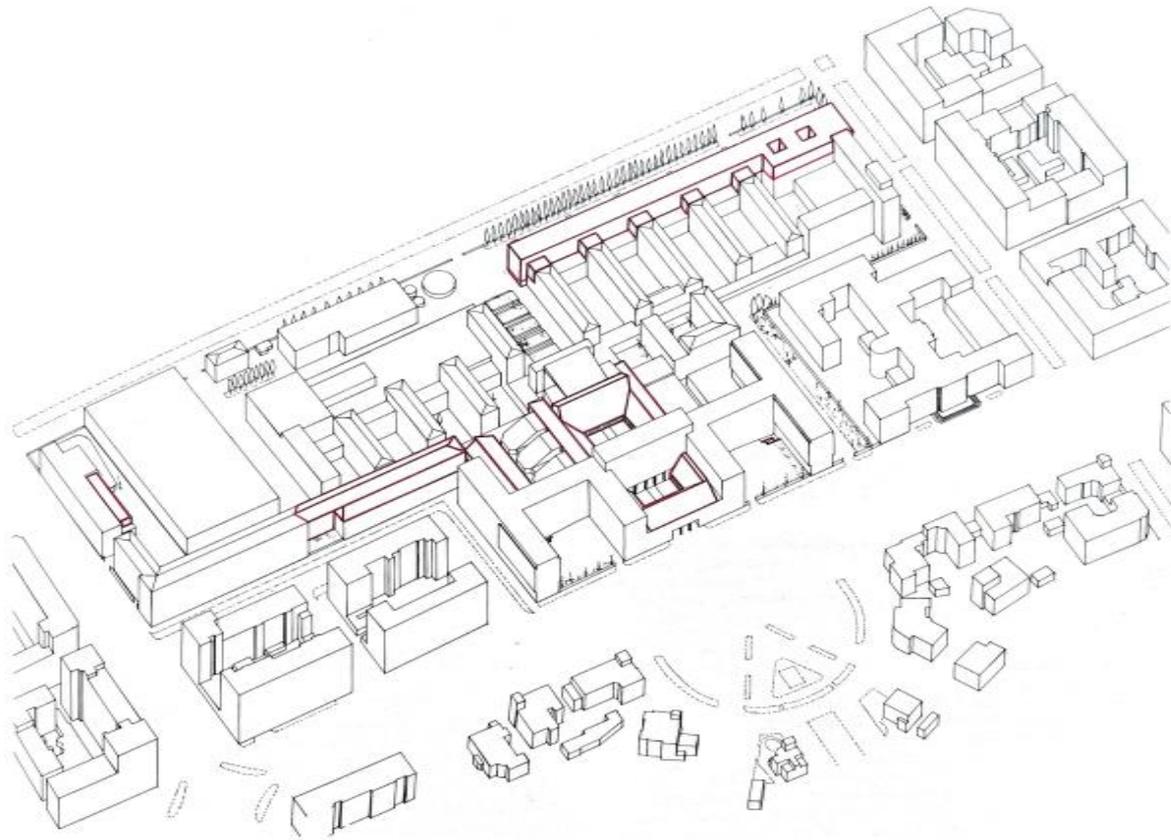
affini. Infine, segue un terzo gruppo di fabbricati a carattere prettamente industriale, destinato a laboratori sperimentali, che si salda alle testate dei rispettivi Istituti ed in cui trovano posto i macchinari e le attrezzature pesanti.

I dati caratteristici di questi edifici, che costituiscono il nucleo dell'attuale sede politecnica si possono invece così riassumere:

- Le strutture portanti, in tutti i fabbricati, sono state ottenute mediante ossature formate da pilastri disposti ad interassi modulati e solai in cemento armato con travi in spessore e chiusure perimetrali in muratura di mattoni a cassa vuota.
- Negli edifici di rappresentanza (il Rettorato e l'aula Magna) il rivestimento delle facciate è stato eseguito con lastre di pietra e la copertura dei tetti piani con un doppio ordine di solai debitamente impermeabilizzati.
- Per gli Istituti ed annessi laboratori, invece le facciate sono state rivestite in piastrelle di litoceramica, mentre i tetti a falde inclinate sono stati costruiti con capriate in cemento armato del tipo prefabbricato.

#### Ampliamento delle maniche

Durante gli anni '80, a fronte del continuo incremento delle iscrizioni e quindi di una crescente inadeguatezza delle strutture, si inizia a pensare all'espansione del Politecnico nelle aree industriali dismesse delle Officine Grandi Riparazioni (OGR) comprese tra Corso Castelfidardo e Via Boggio, che però avverrà soltanto nel 2006. Per far fronte quindi alla crescente domanda di spazi da parte della popolazione del Politecnico, nell'88 viene avviato un progetto riguardo l'espansione di alcune strutture già esistenti all'interno della sede centrale. In una prima fase del lavoro sono state valutate le parti più idonee ad accogliere le proposte di ampliamento, veniva scartata ogni sopraelevazione delle maniche interne poiché non si voleva che i cortili, già assai ridotti, risultassero ulteriormente incassati.



*Figura 12 – Vista assonometrica degli interventi di ampliamento (1988) [6]*

Le maniche oggetto di ampliamento sono state quella affacciata verso l'esterno su via Peano e quella a ridosso dei blocchi che si attestano su corso Castelfidardo nella parte più a Nord. I due nuclei individuati ospitavano quasi esclusivamente attività di tipo dipartimentale, la loro stessa disposizione, marginale e di appendice esistente, li rendeva adatti a soddisfare le esigenze di espansione dei laboratori e degli studi. I nuclei di ampliamento erano caratterizzati da una notevole e reciproca autonomia, conseguenza della loro dislocazione, non esisteva alcun punto di contatto diretto.

#### Ampliamento dell'edificio oggetto di studio

L'edificio oggetto di studio nella tesi risulta essere parte integrante dell'ampliamento a nord-ovest su corso Castelfidardo; esso prendeva spunto dalla semplicità dell'impianto esistente, ovvero maniche disposte a pettine attestate sul corridoio di collegamento.

Il fabbricato originario risale al 1958, anno di inaugurazione della nuova sede del Politecnico di Torino, e inizialmente era costituito da:

- una serie di bassi corpi di fabbrica, denominati “fabbricato O”, adibiti a laboratori e collegati ad altri edifici più alti disposti “a pettine” dove erano collocati gli istituti di Geologia-Minerologia, di Arte Mineraria-Chimica Generale e Chimica Industriale-Elettrochimica;
- un basso fabbricato facente parte del “fabbricato I” dove trovava sede il Laboratorio di Elettrotecnica.

I due edifici erano costituiti solamente da un piano fuori terra e da un piano in parte seminterrato.

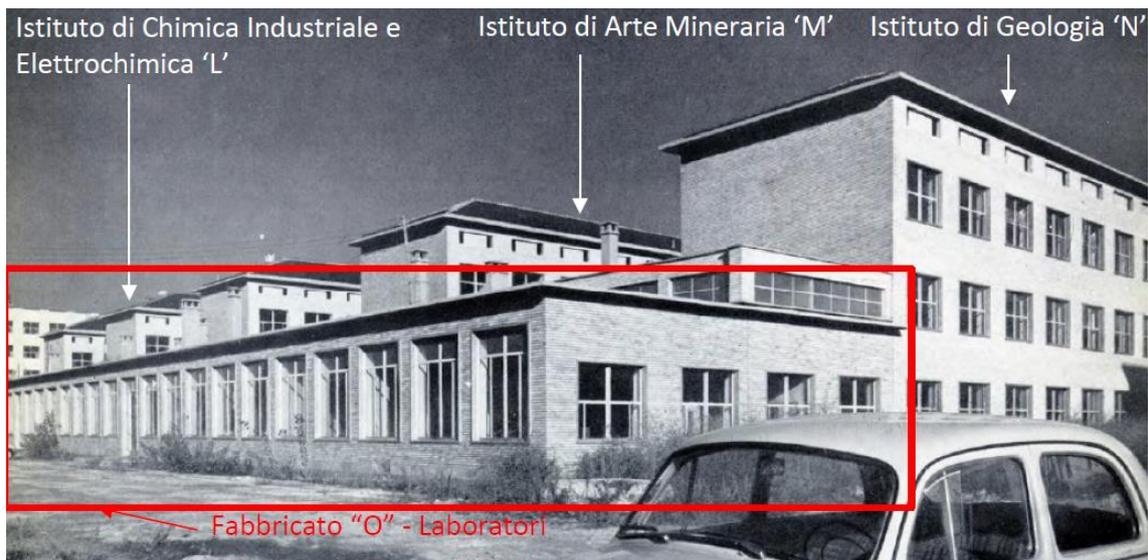


Figura 13 – Foto dell’edificio oggetto di studio pre-intervento di ampliamento (1958) [5]

L’idea alla base del progetto di ampliamento di questo nucleo, prospiciente Corso Castelfidardo, era che in qualche modo si dovesse riprendere lo schema a pettine. Venivano pertanto sviluppate diverse soluzioni che avevano tutte quella matrice. Da quei primi tentativi prendevano avvio i due progetti che sarebbero stati sviluppati fino alla fase del progetto di massima. Alla fine, la soluzione adottata è stata quella presentata dall’architetto Sisto Giriodi, in cui ci si è orientati verso un volume posto sopra i laboratori, dal fronte più lungo possibile in modo da assicurare la minima altezza possibile sui cortili e contemporaneamente il massimo numero di collegamenti possibili tra i blocchi degli istituti. Questo volume avrebbe avuto il fronte verso il corso il più chiuso possibile per tenere fuori il caldo dell’ovest e il rumore delle auto e dei treni ed avrebbe invece aperto liberamente gli uffici verso i cortili più tranquilli. Il progetto prevedeva la costruzione di un blocco destinato ad ampliare gli spazi per i dipartimenti, al margine superiore del comparto, sovrapposto in parte ai laboratori esistenti.

Negli anni Ottanta iniziarono dunque i lavori di ampliamento su progetto di Sisto Giriodi, Pier Giuseppe Bardelli e Renato Piramide che terminarono nel 1992 e videro la realizzazione di una sopraelevazione di tre piani dei fabbricati originari e la realizzazione di “maniche di collegamento” verso gli Istituti adiacenti, sul lato Est dell’edificio. Sul lato Ovest furono inoltre realizzate cinque corpi scale in acciaio utilizzabili come vie di fuga in situazione di emergenza.

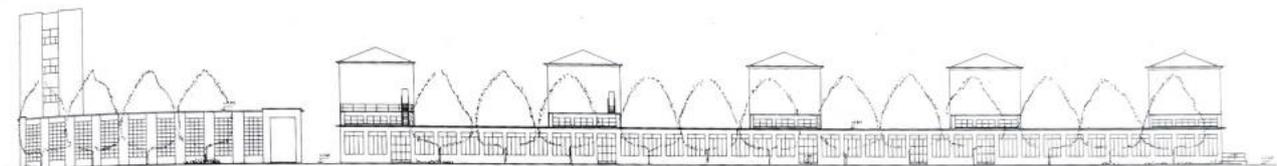


Figura 14 – Prospetto ovest dell’edificio oggetto di studio pre-intervento di ampliamento [6]

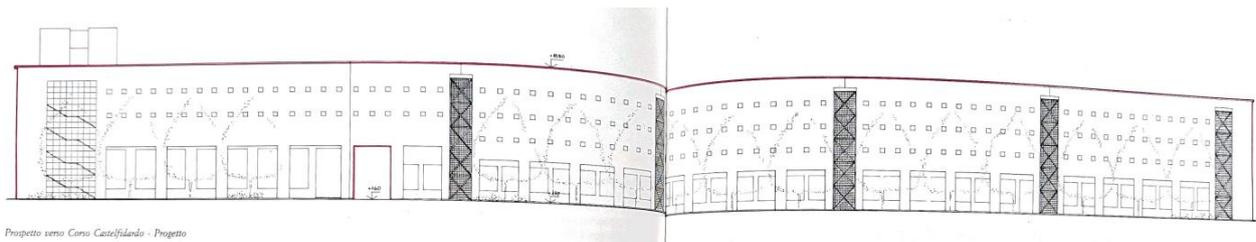


Figura 15 - Prospetto ovest dell'edificio oggetto di studio post-intervento di ampliamento [6]

I laboratori non sono tutti eguali ed è possibile distinguere una piastra bassa a manica doppia, con una pilastrata centrale, ed un capannone più alto con un'unica grande luce libera. Per questo l'edificio nuovo prevede tre piani sopra la piastra e solo due sopra il capannone, e per di più i piani presentano anche uno sviluppo diverso: sono a manica semplice nella parte sovrapposta ai laboratori, mentre sono a piastra con piccoli cortili interni nella parte sovrapposta al capannone.

La distribuzione orizzontale avviene attraverso corridoi diritti che completano la rete dei corridoi degli edifici esistenti mentre quella verticale avviene attraverso blocchi composti da scala ed ascensore, posti nei nodi del reticolo dei corridoi; sempre in questi nodi sono collocate le scale esterne di sicurezza. I tipi di spazi previsti vanno dall'unità standard minima (studio per due docenti o ricercatori) in serie lungo il corridoio, alle sale per riunioni, laboratori, biblioteche specializzate, disposte prevalentemente nei nodi di saldatura con i corpi esistenti e nella piastra a due piani.

Nella Figura 16 si riporta a titolo d'esempio la configurazione attuale degli spazi interni del secondo piano del fabbricato oggetto di studio.

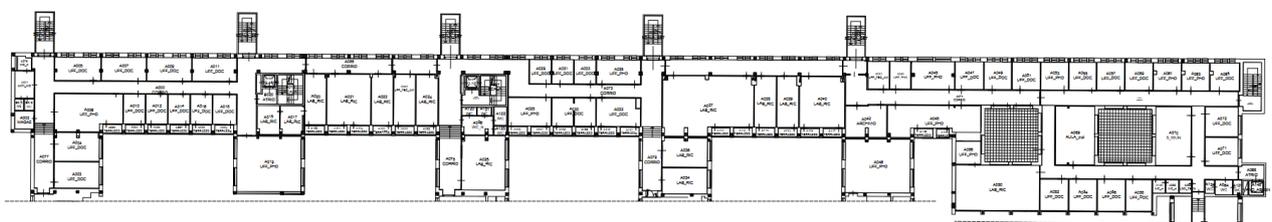
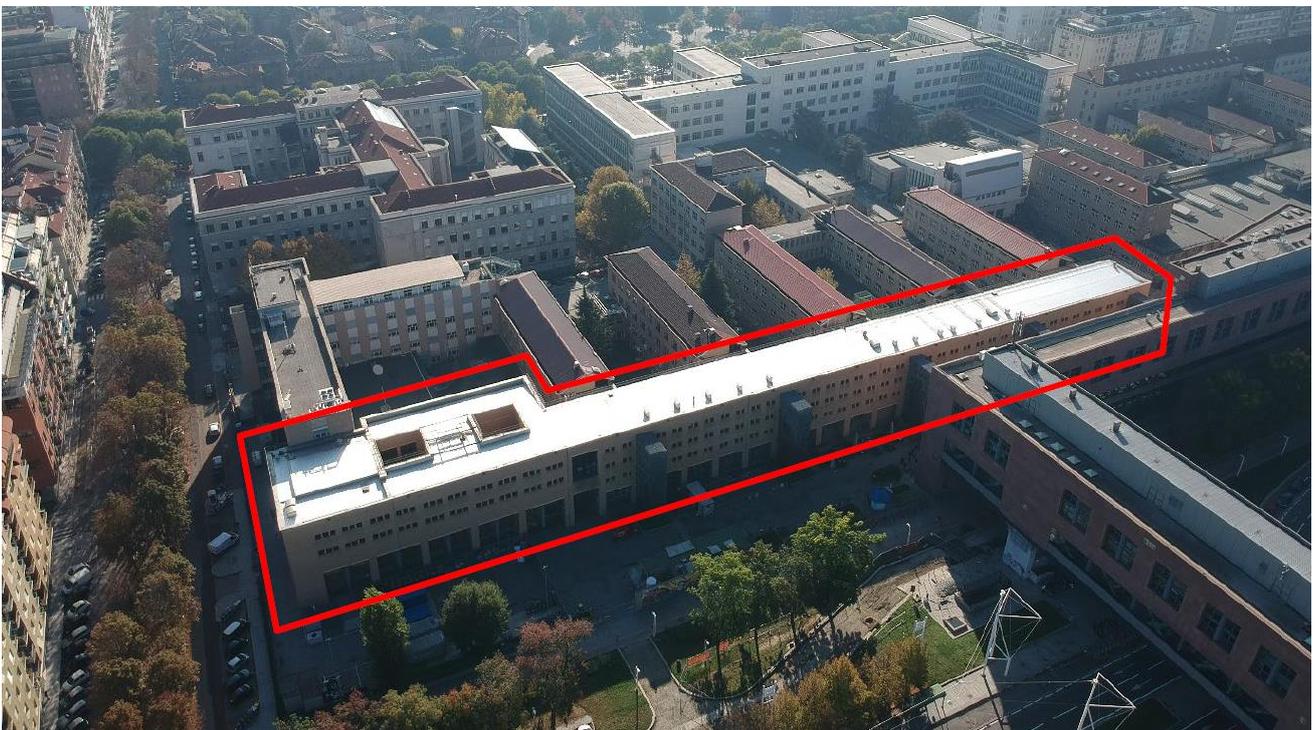


Figura 16 - Pianta del secondo piano post-ampliamento con distribuzione degli spazi [5]

L'ampliamento del corpo di fabbrica verso Corso Castelfidardo (oggi denominato "Fabbricato 4A" e di cui si tratterà dettagliatamente nel successivo capitolo al fine di approfondirne l'analisi tecnica correlata con lo sviluppo della ricerca di tesi) ha pertanto consentito di disporre di nuovi spazi a laboratorio didattici e di ricerca, spazi ad ufficio e zone tecniche in coerenza con le esigenze e le scelte strategiche dell'Ateneo.

## 4. Descrizione dello stato attuale dell'edificio oggetto di studio

L'edificio oggetto di studio, identificato come Fabbricato 4A, è parte integrante della sede centrale del Politecnico di Torino di Corso Duca degli Abruzzi 24, nel comune di Torino. È situato ai limiti del quartiere Crocetta e al confine con zona Cenisia ed è dunque inserito in un contesto urbano circondato da alcune palazzine residenziali a nove piani fuori terra e da altri fabbricati del complesso edilizio del Politecnico. Essendo collocato quasi nel centro città, in territorio pianeggiante, le uniche cause di ombreggiamento sono costituite dagli edifici circostanti. La posizione precisa è identificata tramite le coordinate geografiche 45°03'51 N, 7°39'39 E.



*Figura 17 – Vista dall'alto dell'edificio 4A (2023)*

## Contesto climatico

L'edificio si colloca in zona climatica E secondo l'allegato A del Decreto del Presidente della Repubblica 412/93 in quanto il comune di Torino è caratterizzato da 2617 Gradi Giorno.

La temperatura esterna minima di progetto, secondo la UNI EN 12831-1:2018, è - 8,0 °C e la temperatura massima estiva di progetto dell'aria esterna secondo norma è 31,0 °C. I dati climatici relativi alla posizione dello stabile sono decisi in base alla normativa e sono mostrati nella Figura 18.

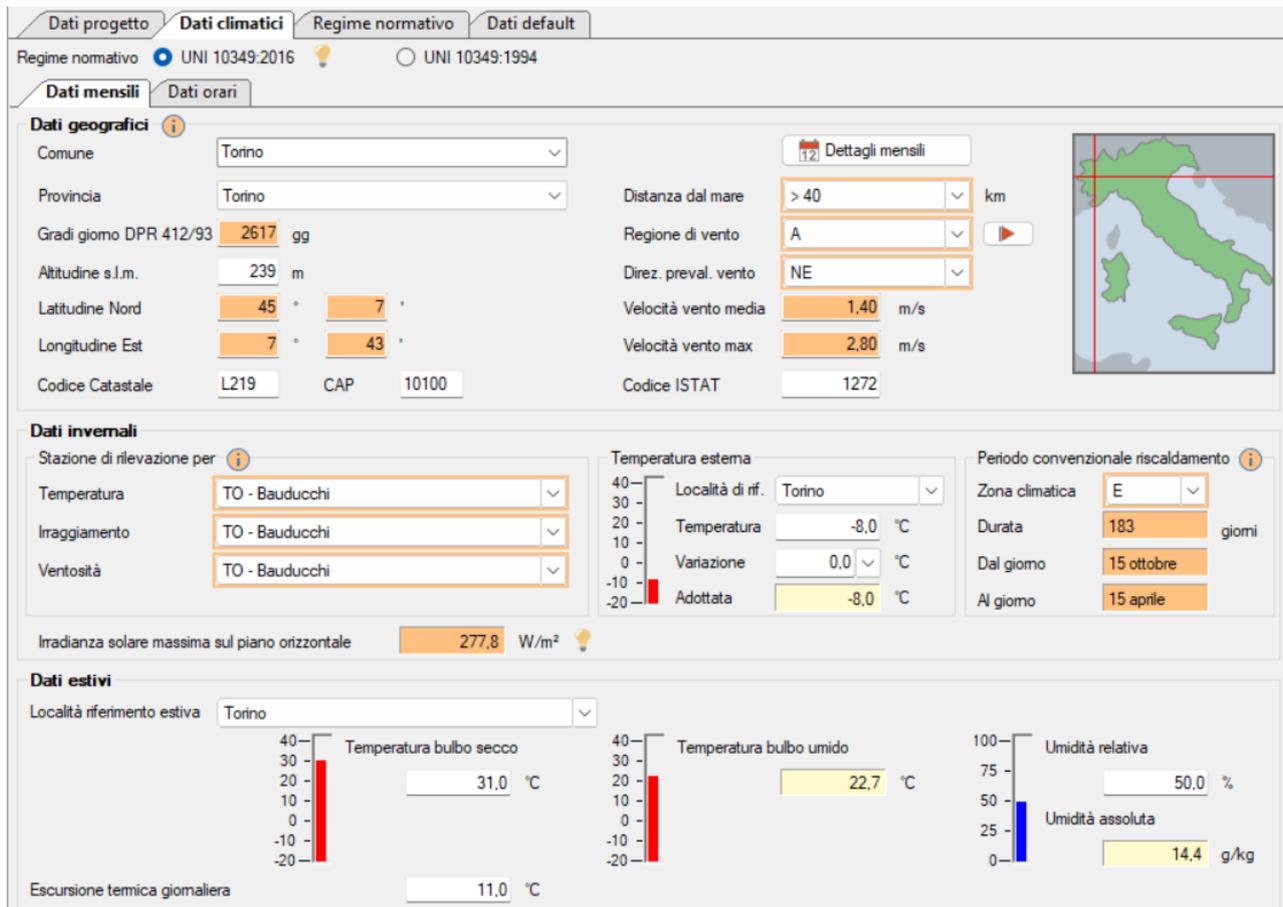
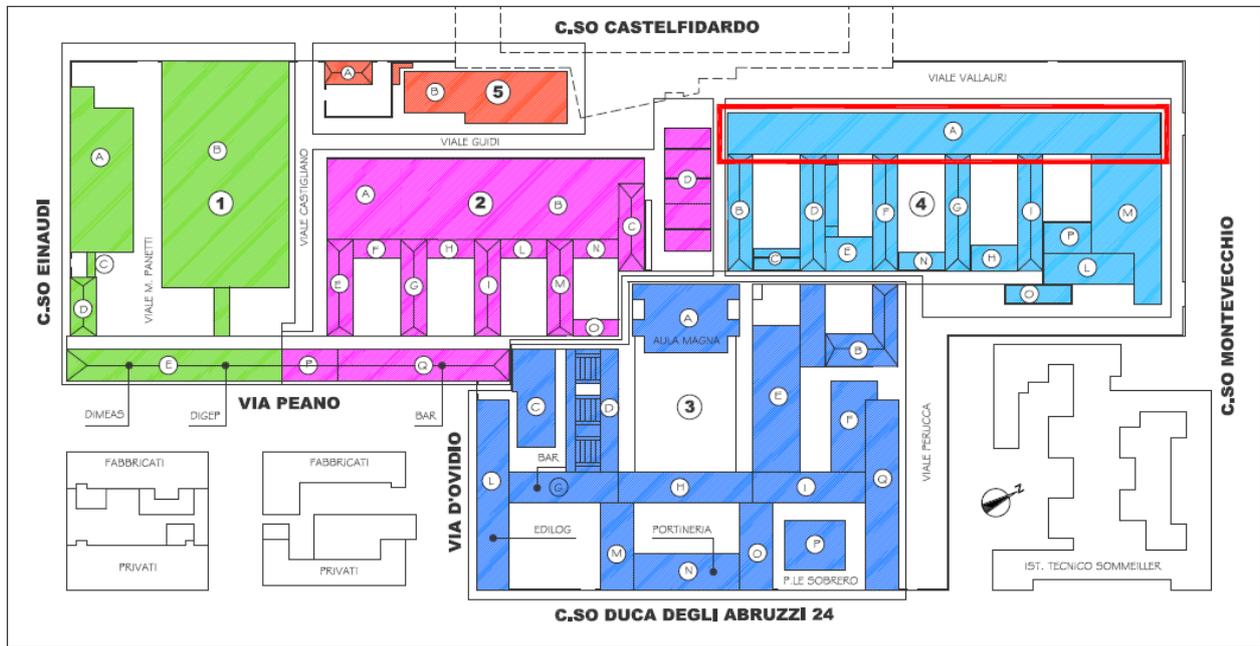


Figura 18 – Dati climatici relativi alla posizione dell'edificio 4A [7]

La stazione di rilevazione dei dati climatici invernali è la stazione di Bauducchi nel comune di Moncalieri, a sud di Torino.

## Descrizione dell'edificio

Lo stabile è situato nel settore nord-ovest dell'università, disposto parallelamente a Corso Castelfidardo, con il lato Nord affacciato su corso Montevecchio.



PLANIMETRIA DI INQUADRAMENTO - AREA DI INTERVENTO  
SCALA 1:1.000

Figura 19 – Planimetria della sede centrale del Politecnico di Torino con disposizione e nomi dei fabbricati [5]

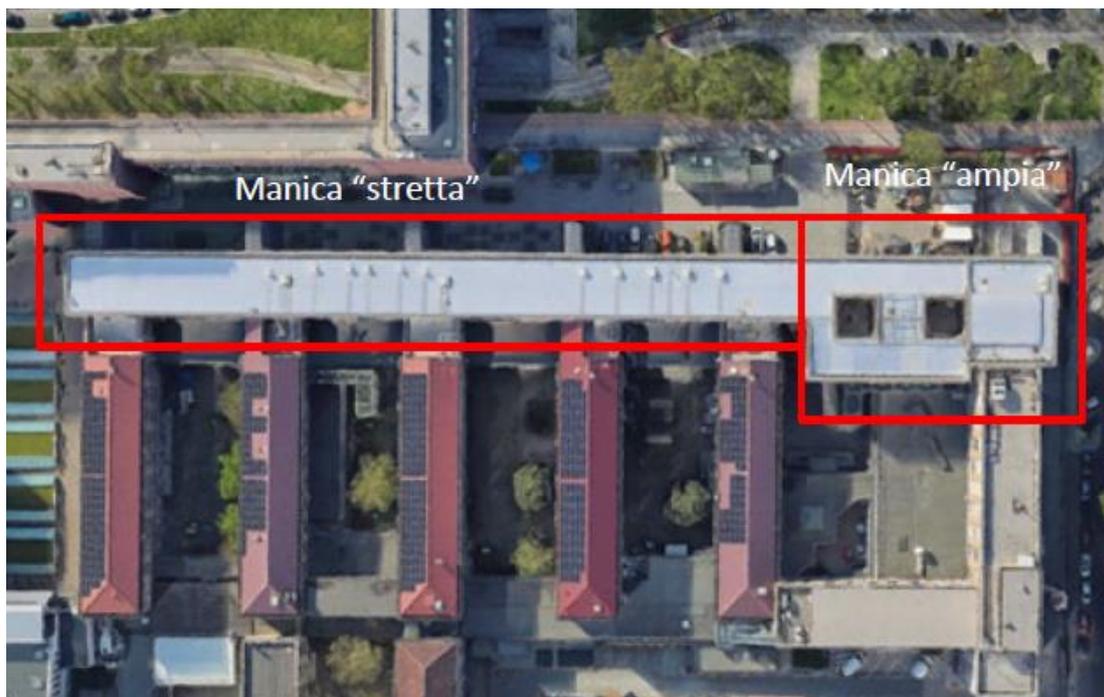


Figura 20 – Vista satellitare dell'edificio 4A

Allo stato attuale l'edificio è dunque costituito da un piano in parte seminterrato, quattro piani fuori terra e un piano sottotetto non abitabile e non riscaldato dove sono collocate le dorsali distributive degli impianti meccanici. L'altezza complessiva è di circa 17 metri, la lunghezza si attesta sui 180 metri ed è possibile identificare due sezioni:

- una manica a pianta rettangolare, denominata “manica stretta”, con dimensioni 132 x 12 m;
- una manica a pianta rettangolare, denominata “manica ampia” con dimensioni 44 x 22 m.

La superficie totale del fabbricato 4A è di 11.334,12 m<sup>2</sup> ed ha un volume complessivo di 42.288,36 m<sup>3</sup>.



*Figura 21 – Dettaglio della manica stretta e della manica ampia dell'edificio 4A*

Nella struttura trovano sede diversi spazi dedicati ai dipartimenti del Politecnico e, più precisamente, il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), il Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT) e il Dipartimento Energia (DENERG). Questi sono suddivisi come descritto di seguito:

- Piano seminterrato, manica stretta → laboratori didattici e di ricerca del DIATI e del DISAT, magazzini e locali tecnici.
- Piano seminterrato, manica ampia → laboratori del DENERG, magazzini e locali tecnici.
- Piano terra manica stretta → laboratori didattici e di ricerca del DIATI e DISAT, uffici del DIATI, biblioteca DISAT, magazzini.
- Piano terra, manica ampia → laboratori didattici e di ricerca del DENERG, due uffici dello stesso dipartimento, cabina elettrica.
- Primo piano, manica stretta → sala riunioni DIATI e DISAT, laboratori ricerca DIATI e DISAT, uffici, magazzini.
- Primo piano, manica ampia → il laboratorio DENERG del primo piano si sviluppa per un'altezza tale da occupare anche il secondo piano.
- Secondo piano, manica stretta → uffici e laboratori di DISAT E DIATI.

- Secondo piano, manica ampia → uffici e laboratori del DENERG, sala riunioni; in mezzo alla pianta di questa sezione sono presenti due cortili aperti.
- Terzo piano → uffici DISAT e DIATI su tutto il piano.
- Quarto piano → sottotetto non abitabile che ospita solo le dorsali degli impianti meccanici.

Al secondo piano e ai piani superiori la manica stretta e la manica ampia sono collegate tra loro grazie alla sopraelevazione realizzata nel 1992.

L'edificio viene classificato E.2 in base alla destinazione d'uso secondo l'art. 3 del DPR 412/93 e dunque rientra nella categoria "Edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorparabili agli effetti dell'isolamento termico".

### Descrizione dell'involucro

#### Facciate e coperture

L'edificio è caratterizzato da una facciata massiccia rivestita in klinker, i prospetti esterni sul lato ovest mostrano un aspetto unitario, chiuso e monolitico con numerose finestre di piccola dimensione dove i pieni prevalgono sui vuoti. Un alto porticato conferisce all'edificio la sensazione di sollevamento dal terreno.



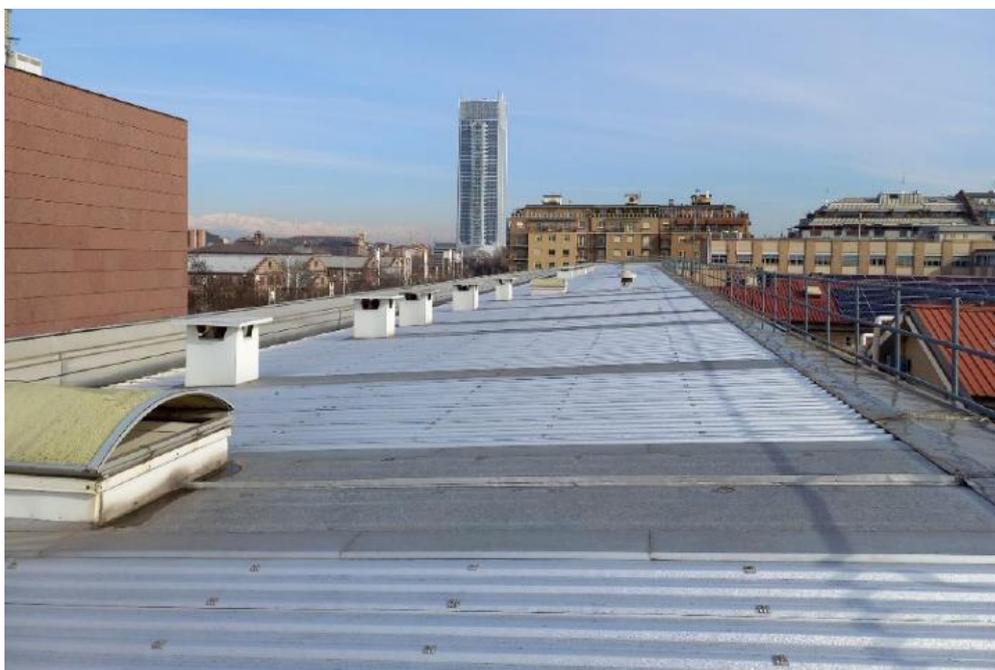
*Figura 22 – Foto della parete ovest dell'edificio 4A su Corso Castelfidardo [5]*

Sul lato est i fronti interni sono invece aperti con fitte logge completamente vetrate per gli studi dei docenti.



*Figura 23 - Foto della parete est dell'edificio 4A su loggia interna [5]*

Il locale sottotetto è realizzato con una carpenteria in acciaio zincato con una copertura in lamiera grecata semplice a falda unica nella manica stretta e a falda doppia nella restante parte di copertura; la pendenza si attesta sul 9%. L'altezza è molto ridotta tanto che in alcuni punti raggiunge un minimo di 70 cm, il che rende poco agevoli i lavori di manutenzione in questi spazi. Le strutture sono in carpenteria metallica con travi reticolari appoggiate alla soletta.



*Figura 24 – Dettaglio della copertura dell'edificio 4A [5]*



*Figura 25 – Dettaglio del sottotetto dell'edificio 4A [5]*

Il tetto piano degli avancorpi lato cortile è costituito da una soletta in laterizio e travetti non calpestabile, rivestito con guaina bituminosa

### Pareti e solai

Le strutture del fabbricato originario così come quelle della sopraelevazione sono state realizzate in cemento armato, con orizzontamenti in laterocemento e/o lastre predalles.

Le pareti lungo il perimetro sono del tipo a cassavuota, costituite da mattoni forati intermezzati da un'intercapedine non ventilata; nell'intermezzo sono inoltre presenti alcuni pluviali e ulteriori tubazioni a servizio degli impianti.

Sono state identificate cinque tipologie di pareti verticali che racchiudono i locali dell'edificio. Nella Tabella 1 sono riportate le caratteristiche di ciascuno, in particolare: spessore, trasmittanza termica, temperatura esterna invernale di progetto e verifica termoigrometrica.

Tabella 1 – Elenco degli elementi verticali dell'edificio con spessori e valori di trasmittanza termica [3][5]

Codice	Tipo	Descrizione	Spessore [mm]	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]	Temperatura esterna di progetto [°C]	Verifica termo-igrometrica
M1	T	SDF_Pareti perimetrali	380	1,154	- 8,0	
M2	G	SDF_Parete controterra	381	0,248	- 8,0	
M3	D	SDF_Parete verso le scale	300	0,330	-	-
M4	D	SDF_Parete divisoria interna 1	110	2,186	-	-
M5	D	SDF_Parete divisoria interna 2	230	1,084	-	-

La tipologia delle pareti presenti è definita come:

- T → da locale climatizzato verso esterno;
- G → da locale climatizzato verso terreno;
- D → divisorio interno alla zona climatizzata.

M1 – Pareti Perimetrali → separano gli ambienti interni climatizzati dall'esterno e sono presenti in tutti i piani e lungo l'intero perimetro. Allo stato attuale la verifica termoigrometrica non è superata e dunque necessitano di intervento.

M2 – Parete Controterra → la parete in questione è collocata al piano seminterrato e divide l'ambiente interno climatizzato dal terreno circostante. Questo piano è sotto il livello stradale dal lato di Corso Castelfidardo e sui lati Nord e Sud. La verifica termoigrometrica è rispettata.

M3 – Parete verso le Scale → divisorio interno degli ambienti climatizzati, in particolare separa le scale di comunicazione tra piani dagli ambienti adiacenti. È impiegata in tutti i piani.

M4 – Parete Divisoria Interna 1 → divisorio interno prevalentemente impiegato e presente in tutto l'edificio. La parete è stata utilizzata per dividere i locali climatizzati presenti.

M5 – Parete Divisoria Interna 2 → altra tipologia di divisorio interno meno impiegato rispetto al muro M4 e differente per spessore e composizione interna.

Le pareti descritte sono di seguito analizzate per mostrare in dettaglio la stratigrafia di ciascuna. Le proprietà termofisiche dei materiali riportati nelle varie tabelle sono state estratte dal database di Edilclima, basato sulla norma UNI 10351:2021.

- M1 – Pareti perimetrali

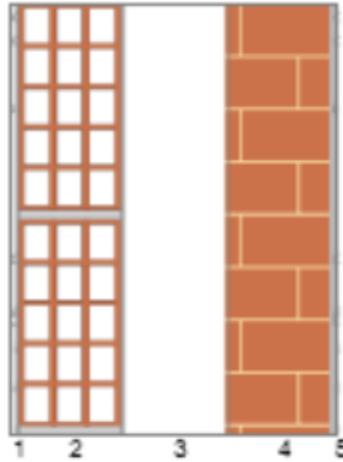


Figura 26 – Stratigrafia parete perimetrale (M1)

Tabella 2 – Proprietà termofisiche degli strati della parete perimetrale (M1) [3][5]

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di calce e gesso	10	0,700	0,014	1400	1,00	10
2	Mattone forato	120	0,387	0,310	717	0,84	9
3	Intercapedine non ventilata	120	0,667	0,180	-	-	-
4	Mattone pieno	120	0,800	0,150	1800	0,84	9
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,900	0,011	1800	1,00	22

- M2 – Parete Controtterra

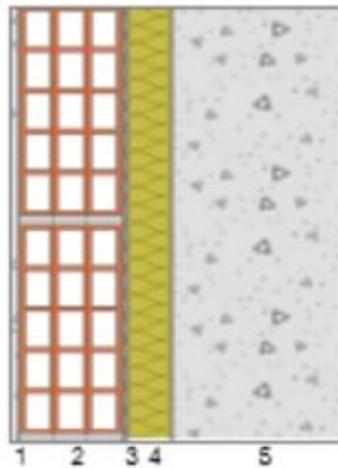


Figura 27 - Stratigrafia parete controtterra (M2)

Tabella 3 - Proprietà termofisiche degli strati della parete controtterra (M2) [3][5]

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso	10	0,570	0,018	1300	1,00	10
2	Mattone forato	120	0,387	0,310	717	0,84	9
3	Impermeabilizzazione con bitume	1	0,170	0,006	1200	1,00	188000
4	Polistirene espanso sint. in lastre	50	0,040	1,250	25	1,45	44
5	C.l.s. di sabbia e ghiaia	200	2,150	0,093	2400	1,00	96

- M3 – Parete Verso le Scale

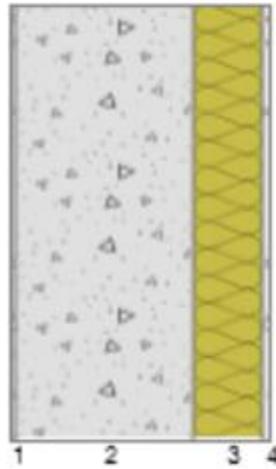


Figura 28 - Stratigrafia parete verso le scale (M3)

Tabella 4 - Proprietà termofisiche degli strati della parete verso le scale (M3) [3]/[5]

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso	10	0,400	0,025	1000	1,00	10
2	C.I.s. in genere	200	0,730	0,274	1600	1,00	96
3	Polistirene espanso, estruso con pelle	80	0,033	2,424	35	1,45	60
4	Cartongesso in lastre	10	0,210	0,048	700	1,00	10

- M4 – Parete divisoria interna 1

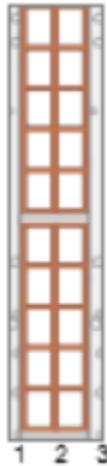


Figura 29 - Stratigrafia parete divisoria 1 (M4)

Tabella 5 - Proprietà termofisiche degli strati della parete divisoria 1 (M4) [3]/[5]

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,8	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio pareti interne	80	0,5	0,160	1400	1,00	7
3	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,8	0,019	1600	1,00	10

- M5 – Parete divisoria interna 2

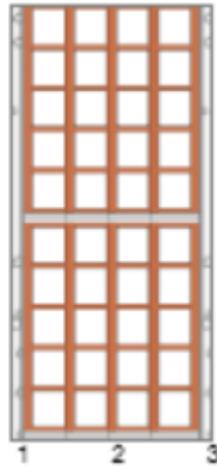


Figura 30 - Stratigrafia parete divisoria 2 (M5)

Tabella 6 - Proprietà termofisiche degli strati della parete divisoria 2 (M5) [3][5]

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,80	0,019	1600	1,00	10
2	Muratura in laterizio alveolato	200	0,32	0,625	870	1,00	5
3	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,80	0,019	1600	1,00	10

Sono state identificate quattro tipologie di solai a separazione dei piani dell'edificio. Nella Tabella 7 sono riportate le caratteristiche e in particolare: spessore, trasmittanza termica, temperatura esterna invernale di progetto e verifica termoigrometrica.

Tabella 7 - Elenco dei solai dell'edificio con spessori e valori di trasmittanza termica [3]/[5]

Codice	Tipo	Descrizione	Spessore [mm]	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]	Temperatura esterna di progetto [°C]	Verifica termoigrometrica
P1	G	SDF_Solaio contro terra	610	0,251	-8,0	✓
P2	D	SDF_Solaio interpiano	453	0,541	-	-
P3	T	SDF_Solaio su porticato lato Ovest	330	1,439	-8,0	✗
P4	T	SDF_Solaio sottotetto	450	0,577	-8,0	✗

La tipologia dei solai presenti è definita come:

- T → da locale climatizzato verso esterno;
- G → da locale climatizzato verso terreno;
- D → divisorio interno alla zona climatizzata.

P1 – Solaio Controterra → divisorio presente solamente nel piano seminterrato, separa il terreno dai locali climatizzati.

P2 – Solaio interpiano → il solaio in questione è impiegato come divisorio interno tra i differenti piani dello stabile e separa solamente ambienti climatizzati.

P3 – Solaio sul Porticato → il solaio è presente al secondo piano ed è il soffitto del porticato collocato sul lato Ovest; esso è dunque la struttura che separa i locali climatizzati presenti al di sopra del porticato dall'ambiente esterno. La verifica termoigrometrica non è rispettata ed è quindi necessario un intervento.

P4 – Solaio Verso Tetto → solaio dell'ultimo piano climatizzato che lo divide dal locale sottotetto non climatizzato. La struttura non rispetta i requisiti minimi per la trasmittanza termica e dunque è necessario un intervento.

Analogamente a quanto riportato per le pareti verticali le proprietà termofisiche dei materiali sono state estratte dal database di Edilclima, basato sulla norma UNI 10351:2021. Nelle prossime pagine sono mostrate e analizzate le stratigrafie dei differenti solai presenti all'interno dell'edificio.

- P1 – Solaio controterra nel piano seminterrato

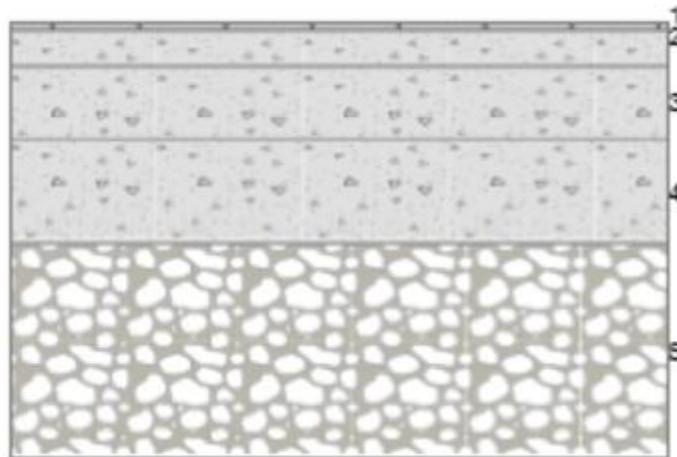


Figura 31 - Stratigrafia solaio controterra (P1)

Tabella 8 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio controterra (P1) [3][5]

N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Piastrelle in ceramica	10	1,30	0,008	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	50	0,90	0,056	1800	0,88	30
3	C.I.s. di argilla espansa	100	0,94	0,106	1500	1,00	96
4	C.I.s. di sabbia e ghiaia	150	2,15	0,070	2400	1,00	96
5	Ghiaia grossa senza argilla	300	1,20	0,250	1700	1,00	5

- P2 – Solaio interpiano

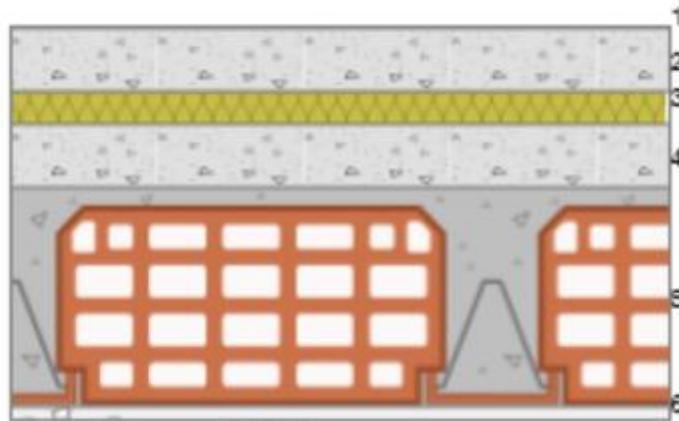


Figura 32 - Stratigrafia solaio interpiano (P2)

Tabella 9 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio interpiano (P2) [3][5]

N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Linoleum	3	0,17	0,018	1200	1,40	1000
2	Sottofondo di cemento magro	70	0,90	0,078	1800	0,88	30
3	Polistirene espanso sint. in lastre	40	0,04	0,976	20	1,45	44
4	C.I.s. armato	70	2,30	0,030	2300	1,00	130
5	Soletta in laterizio	250	0,66	0,379	1100	0,84	7
6	Intonaco di calce e gesso	20	0,70	0,029	1400	1,00	10

- P3 – Solaio sul Porticato

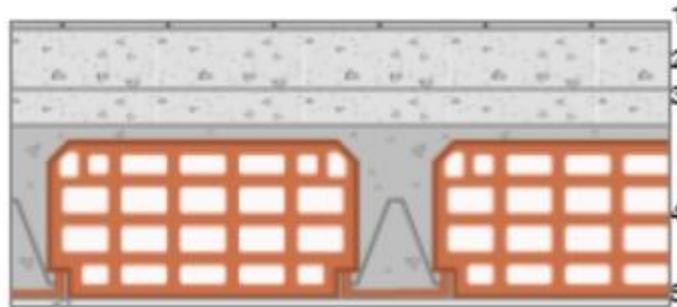


Figura 33 - Stratigrafia solaio sul porticato (P3)

Tabella 10 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio sul porticato (P3) [3][5]

N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Piastrelle in ceramica	10	1,30	0,008	2300	0,84	9999999
2	Sottofondo di cemento magro	70	0,70	0,100	1600	0,88	20
3	C.I.s. di sabbia e ghiaia	40	1,26	0,032	2000	1,00	96
4	Soletta in laterizio	200	0,66	0,303	1100	0,84	7
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,90	0,011	1800	1,00	22

- P4 – Solaio Verso Tetto

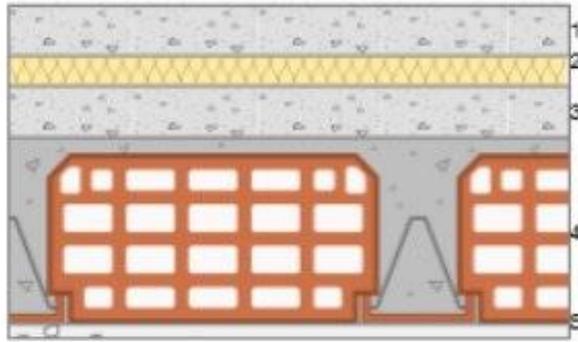


Figura 34 - Stratigrafia solaio verso il tetto (P4)

Tabella 11 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio verso il tetto (P4) [3]/[5]

N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Sottofondo di cemento magro	70	0,90	0,078	1800	0,88	30
2	Polistirene espanso sint. in lastre	40	0,04	0,976	20	1,45	44
3	C.I.s. armato	70	2,30	0,030	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio	250	0,66	0,379	1100	0,84	7
5	Intonaco di calce e gesso	20	0,70	0,029	1400	1,00	10

La copertura dell'ultimo piano è realizzata in lamiera grecata semplice e divide il locale sottotetto non climatizzato dall'ambiente circostante; la sua stratigrafia è mostrata in Figura 35:

- S1 – Copertura del locale sottotetto



Figura 35 - Stratigrafia copertura del sottotetto (S1)

Tabella 12 - Proprietà termofisiche degli strati della copertura del sottotetto (S1) [3]/[5]

N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduktività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Acciaio	40	52,0	0,001	7800	0,45	9999999
2	Barriera vapore in bitume puro	1	0,17	0,006	1050	1,00	50000

### Serramenti

L'edificio presenta numerosi serramenti che variano per geometria: sulla facciata Ovest, nei piani primo, secondo e terzo sono presenti finestre piccole e quadrate con dimensione 80x80 cm che conferiscono alla parte superiore dell'edificio un aspetto chiuso e monolitico. Sullo stesso lato, sotto l'alto porticato, finestre di grandi dimensioni permettono un grande afflusso luminoso sui laboratori collocati al pian terreno ma differiscono per geometria dalla manica stretta a quella ampia. Sul lato Est i serramenti sono di media-grande dimensione e di diversa tipologia in quanto variano per forma. Per quanto riguarda i materiali utilizzati, tutti i serramenti sono di tipologia a vetro singolo mentre i telai sono prevalentemente in PVC ad eccezione dei finestroni al pian terreno che essendo di più vecchia costruzione sono in metallo. Allo stato di fatto sono presenti tende e veneziane esterne su alcune finestre del lato Est.

I principali parametri tecnici dei serramenti sono di seguito riassunti:

- Trasmissanza termica del serramento  $U_w = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Trasmissanza termica del vetro  $U_g = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nella Tabella 13 sono riassunti i componenti finestrati dell'edificio con le dimensioni e i valori di trasmittanza termica associati.

Tabella 13 – Elenco dei serramenti dell'edificio con relative dimensioni e valori di trasmittanza termica [5]

Codice	Tipo	Descrizione	Larghezza [cm]	Altezza [cm]	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]
W1	T	SDF_Serramento 80x80 P1-2-3	80	80	2,2
W2	T	SDF_Serramento 265x219	265	219	2,2
W3	T	SDF_Serramento 265x219_2	265	219	2,2
W4	T	SDF_Serramento Laboratorio Chimica	240	306	2,2
W5	T	SDF_Serramento Laboratorio Chimica Alluminio	270	480	2,2
W6	T	SDF_Serramento Laboratori prospetto Est	270	225	2,2
W7	T	SDF_Serramento prospetto Est	350	250	2,2
W8	T	SDF_Serramento prospetto Est loggiato	265	265	2,2
W9	T	SDF_Serramento prospetto Est_3	180	265	2,2
W10	T	SDF_Serramento prospetto Nord	270	270	2,2
W11	T	SDF_Serramento prospetto Ovest	220	220	2,2
W12	T	SDF_Serramento prospetto Est_ST	255	123	2,2
W13	T	SDF_Serramento prospetto Est_ST	255	247	2,2

La tipologia dei serramenti presenti è definita come:

- T → da locale climatizzato verso esterno.



Figura 36 – Dettaglio di componenti trasparenti presenti nell'edificio 4A [5]

### Impianti di climatizzazione

All'interno dell'edificio sono presenti i servizi di riscaldamento e di raffrescamento, entrambi gestiti con un impianto centralizzato, oltre alla ventilazione dei laboratori per garantire un corretto ricambio d'aria e alla fornitura di acqua calda sanitaria, la cui produzione è combinata con il sistema di riscaldamento.

### Generazione

La climatizzazione estiva della sede centrale è soddisfatta da diversi gruppi frigoriferi per una potenza complessiva di 5 MW a servizio dell'intero Politecnico. Due macchine frigorifere con potenza di 668,8 e 913,7 kW sono invece a servizio del gruppo di fabbricati noto come TO\_CEN 04, di cui fa parte l'edificio 4A. Queste macchine sono alimentate tramite energia elettrica e di seguito sono riportate alcune caratteristiche e prestazioni:

- Produttore: EMICON
- Anno di installazione: 2016
- Fluido refrigerante: R134a
- Potenza frigo nominale = 615 kW
- Indice di efficienza energetica  $EER = 3,2$

La potenza frigorifera nominale a servizio del fabbricato è stata stimata sulla base delle volumetrie servite in quanto non vi è alcun dispositivo per la contabilizzazione dei consumi del singolo edificio.

La climatizzazione invernale è soddisfatta tramite la rete di teleriscaldamento di Torino, progettata e gestita da IREN Energia, attraverso una sottostazione dove l'energia termica della rete cittadina è trasmessa al circuito dell'impianto di riscaldamento dell'edificio. La potenza utile nominale è di 918,6 kW.

### Distribuzione

La distribuzione principale, costituita da due dorsali, è collocata nel sottotetto e lungo di essa si trovano i numerosi stacchi che, tramite le colonne montanti, permettono di servire i numerosi terminali collocati sui diversi piani dell'edificio. La rete in copertura è realizzata in acciaio con un isolamento in lana minerale e finitura superficiale in nastratura in PVC (isogenopac). Ogni stacco è sezionato con valvole a farfalla o a sfera filettate su quelli con diametro minore. La rete di distribuzione, realizzata nel 1992, attualmente risulta obsoleta e dunque necessita di una sostituzione.



*Figura 37 – Dettaglio delle dorsali di distribuzione collocate nel sottotetto [5]*



Figura 38 – Dettaglio degli stacchi della rete di distribuzione nel sottotetto [5]



Figura 39 – Dettaglio dei montanti verticali della rete di distribuzione nell'intradosso delle pareti [5]

### Terminali

I locali adibiti a servizi igienici sono serviti da una rete di radiatori a funzionamento continuo in cui circola acqua con una temperatura di mandata fissa a 70 °C. Nel resto dell'edificio una rete di ventilconvettori idronici a due tubi con inversione stagionale in centrale permette sia il riscaldamento sia il raffrescamento dei locali. Durante la climatizzazione invernale nei ventilconvettori circola acqua ad una temperatura media di 45 °C mentre in modalità estiva la temperatura è di 7 °C. Il funzionamento di questi terminali è di tipo ON-OFF e la loro regolazione è manuale tramite i comandi di bordo.



Figura 41 – Dettaglio ventilconvettore [5]



Figura 40 – Dettaglio ventilconvettore [5]



*Figura 42 – Dettaglio ventilconvettore [5]*



*Figura 43 – Dettaglio radiatore [5]*

### Impianto di ventilazione

Nei laboratori del dipartimento di chimica sono presenti estrattori per la ventilazione degli spazi che tramite condotti verticali permettono lo sfogo dell'aria al di sopra della copertura.



*Figura 44 – Dettaglio della cappa di estrazione della ventilazione [5]*

## 5. Metodo di calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio

Partendo dall'analisi dello stato di fatto del fabbricato risulta fondamentale studiare prima di tutto le prestazioni energetiche attuali. Questo passaggio permette di comprendere al meglio le aree dove si può intervenire, ottimizzando i consumi e migliorando il confort degli ambienti interni.

Nel presente lavoro di tesi è stato scelto di calcolare le prestazioni energetiche dell'edificio oggetto di studio utilizzando il metodo dinamico orario, secondo la norma tecnica UNI EN ISO 52016-1:2018. Tale norma rappresenta un'evoluzione della UNI EN ISO 13790:2008 da cui deriva la specifica tecnica UNI/TS 11300-1:2014, attualmente in vigore in Italia per i calcoli di legge come la verifica dei requisiti minimi e la certificazione energetica, e basata su un approccio di calcolo mensile. Il metodo dinamico orario offre una maggiore accuratezza rispetto al metodo mensile ma al momento è impiegato solamente per la diagnosi energetica o la progettazione avanzata, in quanto non richiesto dalla normativa vigente.

La UNI EN ISO 52016-1:2018 permette di calcolare, su base oraria e per un periodo annuale, i seguenti parametri:

- il carico termico sensibile per riscaldamento e raffrescamento;
- il carico latente per umidificazione e deumidificazione;
- la temperatura interna, comprensiva di temperatura dell'aria, temperatura media radiante e temperatura operativa;
- il carico di progetto sensibile per riscaldamento e raffrescamento;
- il carico di progetto latente per umidificazione e deumidificazione.

Il metodo orario è finalizzato a esaminare l'effetto dinamico delle variazioni orarie e giornaliere delle condizioni meteo e delle attività interne sui sistemi di riscaldamento e raffrescamento. In particolare, il calcolo della temperatura interna di una stanza o di una zona avviene risolvendo, su base oraria, un sistema di equazioni che descrive lo scambio termico tra l'ambiente esterno e quello interno, attraverso gli elementi opachi e trasparenti dell'involucro edilizio.

Questo metodo si distingue per la capacità di analizzare separatamente i flussi di calore attraverso i vari componenti edilizi, esposti a diverse condizioni ambientali, come la copertura e il pavimento controterra, senza doverli aggregare in un unico calcolo generale. Questo approccio supera un limite dei tradizionali metodi di analisi energetica, che tendevano a semplificare i vari flussi termici combinandoli in un unico valore per ridurre il carico computazionale e per la mancanza di dati specifici. Il metodo orario, al contrario, consente di mantenere separate le caratteristiche termiche di ciascun elemento costruttivo, modellando con maggiore precisione l'interazione dinamica tra ciascun elemento e l'ambiente esterno.

### Dati di input

Per poter applicare il metodo dinamico orario, la UNI EN ISO 52016-1:2018 richiede prima di tutto la disponibilità di dati climatici dettagliati per ogni ora, tra cui:

- Temperatura dell'aria esterna della località in esame ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Il contenuto di umidità dell'aria esterna ( $\text{kg}/\text{kg}$  di aria secca);
- L'irradianza solare oraria, sia diretta che diffusa, misurata su un piano orizzontale e su superfici inclinate orientate rispetto i quattro punti cardinali ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- La velocità del vento ( $\text{m}/\text{s}$ ).

Successivamente, per ogni zona termica climatizzata dell'edificio e per ogni intervallo orario, devono essere definiti diversi parametri relativi all'utilizzo della zona stessa e agli impianti presenti. Questi parametri includono:

- il set-point della temperatura interna per riscaldamento (in  $^{\circ}\text{C}$ ) e per raffrescamento (in  $^{\circ}\text{C}$ );
- la potenza disponibile dell'impianto per riscaldamento (in  $\text{W}$ ) e per raffrescamento (in  $\text{W}$ );
- il flusso di ventilazione in ingresso ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- gli apporti interni complessivi divisi tra il calore generato dagli occupanti (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ), dalle apparecchiature (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ) e dall'illuminazione (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Questi dati permettono di descrivere in dettaglio il comportamento energetico di ogni zona condizionata, tenendo in considerazione i contributi specifici legati alla climatizzazione, alla ventilazione e agli apporti di calore interni.

### Algoritmo di calcolo

Questo metodo considera ogni strato costruttivo in modo distinto, utilizzando un modello resistivo-capacitivo in cui le "resistenze" rappresentano le resistenze termiche degli strati e le "capacità" le relative capacità termiche.

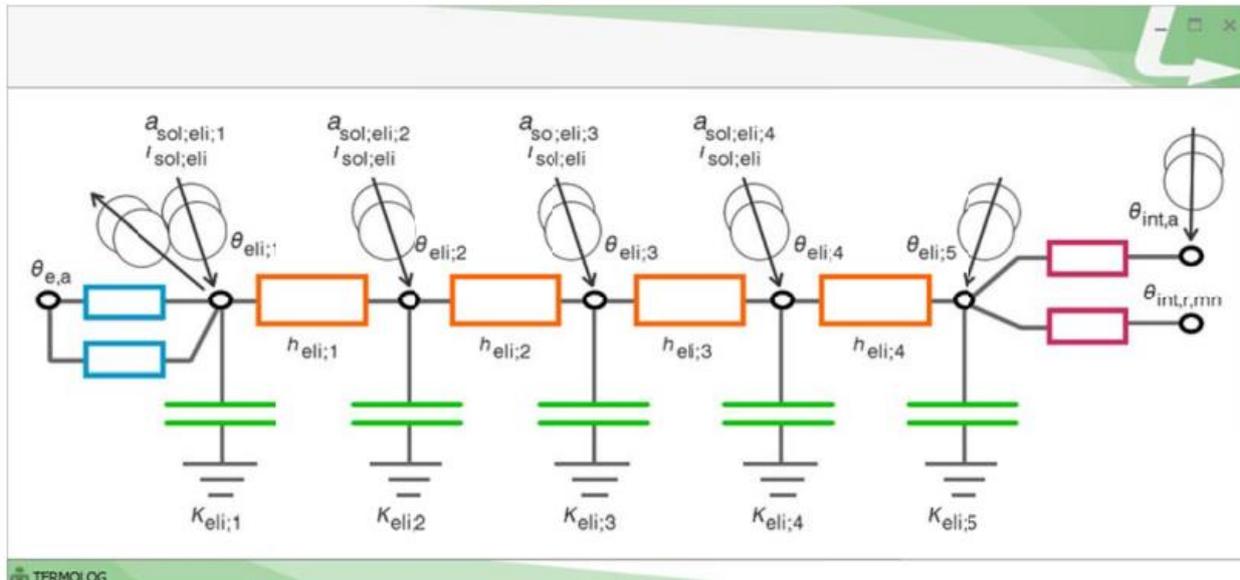


Figura 45 – Schematizzazione del modello a parametri concentrati RC (resistenza capacità) [8]

Il modello, illustrato in modo schematico nella Figura 45, mostra:

- 5 nodi per le temperature e i flussi di calore;
- 4 resistenze termiche che rappresentano la capacità di ciascun strato di opporsi al flusso di calore;
- 5 condensatori che indicano la capacità di accumulo termico degli strati.

A questa struttura di base si aggiungono ulteriori nodi e resistenze:

- 1 nodo per la temperatura dell'aria interna nella zona termica;
- 1 nodo per la temperatura dell'aria esterna;
- 2 resistenze convettive, che regolano il passaggio di calore tra i diversi ambienti;
- 2 resistenze radiative, che rappresentano lo scambio di calore tramite irraggiamento.

Il processo di calcolo poi si sviluppa in più passaggi:

1. Si calcola la temperatura operativa interna, assumendo che non ci siano impianti in funzione, e si confronta con i valori di set-point per il riscaldamento e il raffrescamento. Se la temperatura è nel range desiderato, l'impianto non viene attivato;
2. Se necessario, si calcolano le potenze di riscaldamento o raffrescamento per raggiungere la temperatura di set-point;
3. Si verifica se la potenza disponibile dell'impianto di riscaldamento o raffrescamento è sufficiente per coprire il fabbisogno energetico calcolato nel passaggio precedente;
4. Se la potenza non è adeguata, si ricalcola la temperatura operativa interna, che potrebbe non trovarsi più nel range di set-point, e si determinano le temperature dei nodi delle strutture;

5. Infine, si calcola il carico termico necessario per il riscaldamento o il raffrescamento.

Per calcolare le temperature dei nodi delle strutture, l'algoritmo richiede la risoluzione di un sistema di equazioni di bilancio energetico, considerando sia la zona nel suo insieme che i singoli elementi costruttivi, l'analisi e la risoluzione di questi bilanci termici richiedono l'uso di software capaci di gestire un complesso sistema matriciale.

#### Software EDILCLIMA

Il Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 oltre a definire le modalità di applicazione del metodo di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, ne stabilisce anche gli strumenti necessari per il corretto calcolo. Gli strumenti e i software sono validati dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) e devono garantire un'accuratezza elevata nei calcoli degli indici di prestazione energetica, con uno scostamento massimo di  $\pm 5\%$  rispetto ai corrispondenti parametri determinati con l'applicazione dello strumento nazionale di riferimento. Tale garanzia viene fornita tramite una dichiarazione del CTI dopo una verifica del rispetto dell'accuratezza.

Un esempio di software conforme a tali requisiti è EC700 di Edilclima, validato dal CTI e inserito nel Registro dello Strumento Nazionale. Questo software supporta calcoli energetici per gli edifici utilizzando sia il metodo mensile che quello dinamico orario e permette di realizzare diagnosi energetiche, progettare soluzioni integrate e produrre attestati di prestazione energetica.

Il software costituisce l'elemento di calcolo base e, grazie all'integrazione con fogli di calcolo Excel, consente di assolvere a tutti gli obiettivi posti dalla presente tesi.

## 6. Zonizzazione dell'edificio

Il metodo di calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio definito nella norma UNI EN ISO 52016:2018 prevede che i calcoli siano eseguiti separatamente per le diverse zone termiche dell'immobile, che possono essere tra loro accoppiate o meno. La norma inoltre fornisce alcune indicazioni per la valutazione delle zone termiche.

### Definizione delle zone termiche

Una zona termica è definita come parte dell'ambiente climatizzato mantenuta a temperatura e, possibilmente, umidità costante attraverso l'impiego della stessa tipologia di impianti e di regolazione durante la climatizzazione. La suddivisione dell'intero edificio in zone termiche può essere eseguita secondo vari criteri, solitamente è consigliato includere in una zona i locali con condizioni di utilizzo e di tipologia di climatizzazione simile. Nell'edificio sotto studio sono state identificate 26 zone termiche, le cui caratteristiche sono riassunte nella Tabella 14.

Tabella 14 – Elenco delle zone termiche climatizzate con relative dimensioni

Zona	Descrizione	Superficie in pianta netta [m <sup>2</sup> ]	Volume lordo [m <sup>3</sup> ]	Superficie disperdente lorda [m <sup>2</sup> ]	Rapporto di forma S/V [m <sup>-1</sup> ]
1	ZONA LAB ST OVEST	213,33	1012,27	492,56	0,49
2	ZONA COMUNE ST	930,18	4318,68	1600,62	0,37
3	ZONA LAB ST EST	653,6	2977,63	953,53	0,32
4	ZONA SERVIZI ST	17,74	86,22	23,05	0,27
5	ZONA LAB PT OVEST	827,8	5308,14	698,86	0,13
6	ZONA LAB PT EST	442,36	2838,8	275,47	0,1
7	ZONA UFFICI PT EST	291,73	1949,88	358,08	0,18
8	ZONA COMUNE PT	754,51	4875,83	355,95	0,07
9	ZONA SERVIZI PT	19,61	134,08	21,47	0,16
10	ZONA COMUNE P1	570,36	2057,4	459,04	0,22
11	ZONA SERVIZI P1	42,2	160,58	37,72	0,23
12	ZONA LAB P1 EST	590,89	2024,79	263,96	0,13
13	ZONA UFFICI P1 OVEST	106,6	378,13	80,91	0,21
14	ZONA UFFICI P1 EST	199,93	715,56	148,31	0,21

15	ZONA COMUNE P2	772,65	2757,65	539,47	0,2
16	ZONA LAB P2 EST	490,71	1697,66	247,97	0,15
17	ZONA SERVIZI P2	57,53	221,83	49,89	0,22
18	ZONA UFFICI P2 OVEST	339,91	1228,07	295,67	0,24
19	ZONA UFFICI NORD P2	192,48	691,47	155,09	0,22
20	ZONA UFFICI P2 EST	353,51	1247,6	230,71	0,18
21	ZONA COMUNE P3	682,65	2429,35	441,3	0,18
22	ZONA SERVIZI P3	65,67	260,73	78,88	0,3
23	ZONA UFFICI NORD P3	30,58	109,45	22,43	0,2
24	ZONA UFFICI P3 OVEST	432,34	1570,46	381,54	0,24
25	ZONA UFFICI P3 EST	586,58	2093,76	452,34	0,22
26	ZONA UFFICI PT OVEST	100,39	662,24	104,31	0,16

In allegato è presente un foglio A3 che riporta le planimetrie dei cinque piani dell'edificio dove sono messe in evidenza le differenti zone termiche.

La suddivisione è stata realizzata considerando:

- Tipologia di utilizzo degli ambienti → sono stati identificati locali per uffici, laboratori, servizi e zone comuni (scale, corridoi e sale riunioni).
- I differenti piani dell'edificio → seminterrato (ST), piano terra (PT) e i tre piani fuori terra (P1, P2 e P3).
- La differente esposizione dei locali → principalmente EST e OVEST in quanto l'edificio ha una forma stretta e lunga.

Al di sopra del terzo piano è presente un sottotetto non climatizzato in cui sono presenti le condotte per gli impianti. Tale locale è stato modellato come zona non climatizzata e in Tabella 15 sono riportate le caratteristiche.

Tabella 15 – Zona termica non climatizzata con le relative dimensioni

Descrizione	Superficie Utile [m <sup>2</sup> ]	Volume Netto [m <sup>3</sup> ]	Fattore di Correzione $b_{tr,u}$
ZONA SOTTOTETTO	2085,2	2482	0,8

### Dati di input delle zone termiche

In ciascuna zona termica è necessario definire un profilo orario in cui vengono definiti i seguenti parametri:

- Set point di temperatura invernale;
- Set point di temperatura estiva;
- Set point ridotto per utilizzo invernale ed estivo in condizioni di utilizzo parziale;
- Profilo di occupazione delle zone;
- Profilo dell'andamento della temperatura durante i giorni feriali e festivi;
- Apporti interni dovuti a persone, illuminazione, apparecchiature.

Il software Edilclima include un database con profili orari e valori suggeriti sulla base del tipo di utilizzo degli ambienti. Per rendere il modello dell'edificio più veritiero possibile, questi profili sono stati adattati in fase di modellazione e calibrazione secondo le informazioni a disposizione e attraverso l'analisi e il confronto dei consumi simulati e reali.

I valori di set point di temperatura utilizzati sono:

*Tabella 16 – Temperature di set point impostate per il riscaldamento e il raffrescamento*

	RISCALDAMENTO	RAFFRESCAMENTO
Set point di temperatura	19,5 °C	27 °C
Set point ridotto di temperatura	16 °C	/

Gli apporti interni sono stati definiti in funzione delle condizioni d'uso:

*Tabella 17 – Apporti interni per i locali dell'edificio*

APPORTI INTERNI [W/m <sup>2</sup> ]		
Zona	Persone	Apparecchiature/ Illuminazione
ZONA LABORATORI	4,7	12
ZONA UFFICI	4,7	12
ZONA LOCALI COMUNI	3,6	15
ZONA SERVIZI	3,6	15

Questi dati, così come i fattori di occupazione dei locali e i fattori di utilizzo degli apporti interni sensibili, sono definiti dalle norme ISO 18523-1:2016 e UNI EN 16798-1:2019.

La Figura 46 riporta il profilo orario di occupazione e il profilo di temperatura utilizzato per i giorni feriali dal lunedì al venerdì in tutte le zone climatizzate.

Ore del giorno	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Media
OCUPAZIONE																									
focc [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,60	0,60	0,70	0,70	0,40	0,60	0,70	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
TEMPERATURA																									
θH,int [°C]	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	-
θC,int [°C]	-	-	-	-	-	-	-	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	-	-	-	-	-	-	-
UMIDITA'																									
UR,HU,int [%]	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	-
UR,DHU,int [%]	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	-
APPORTI INTERNI SENSIBILI																									
φint,P [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	2,82	2,82	3,29	3,29	1,88	2,82	3,29	3,29	2,82	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18
fint,A [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,60	0,60	0,70	0,70	0,40	0,60	0,70	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
φint,A [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,20	9,60	9,60	11,20	11,20	6,40	9,60	11,20	11,20	9,60	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00
fint,L [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,60	0,60	0,70	0,70	0,40	0,60	0,70	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
φint,L [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
APPORTI INTERNI LATENTI																									
Gwv,P [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	2,12	2,12	2,47	2,47	1,41	2,12	2,47	2,47	2,12	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88
Gwv,A [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 46 – Profilo orario di occupazione e di temperatura definito per i giorni dal lunedì al venerdì

La Figura 47 riporta il profilo orario utilizzato per i sabati in tutte le zone climatizzate.

Ore del giorno	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Media
OCUPAZIONE																									
focc [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TEMPERATURA																									
θH,int [°C]	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	-
θC,int [°C]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UMIDITA'																									
UR,HU,int [%]	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	-
UR,DHU,int [%]	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	-
APPORTI INTERNI SENSIBILI																									
φint,P [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fint,A [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
φint,A [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fint,L [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
φint,L [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
APPORTI INTERNI LATENTI																									
Gwv,P [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gwv,A [(g/h)/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 47 - Profilo orario di occupazione e di temperatura definito per il sabato

Per i giorni festivi è stata considerato lo spegnimento totale degli impianti di climatizzazione.

Nel corso dell'anno sono previsti periodi di chiusura dell'Ateneo che sono stati presi in considerazione per il funzionamento degli impianti. In particolare, è previsto lo spegnimento di tali durante il periodo natalizio e durante la settimana di Ferragosto.

Per quanto riguarda la ventilazione, questa rappresenta un aspetto importante da considerare nella modellazione in quanto è sempre necessario mantenere una qualità dell'aria interna adatta al tipo di utilizzo dei locali. Impostando su Edilclima la destinazione d'uso dei singoli locali, il software

procede a calcolare in automatico sulla base dello standard UNI 10339:1995 la portata d'aria necessaria.

Nel fabbricato 4A, la ventilazione è controllata meccanicamente solamente nei laboratori mentre in tutti i restanti locali la ventilazione è naturale considerando un ricambio d'aria dovuto all'apertura delle finestre.

Nella Figura 48 si riporta un esempio di locale con ventilazione naturale:

**Ventilazione**

Ventilazione  Naturale  Meccanica  Ibrida

Metodo di calcolo *i*

Categoria edificio

Sottocategoria

Portata d'aria esterna Qop  10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> / s pers

Indice di affollamento ns  pers / m<sup>2</sup>

fve.t  *i*

**Portate di aria esterna di riferimento**

Potenza invernale	qve.0_p,H	<input type="text" value="61,12"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="0,44"/>	Vol/h
Energia invernale	qve.0_e,H	<input type="text" value="36,06"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="0,26"/>	Vol/h
Energia estiva	qve.0_e,C	<input type="text" value="36,06"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="0,26"/>	Vol/h

**Calcolo orario**

Portata d'aria	qve.0	<input type="text" value="36,06"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="0,26"/>	Vol/h
----------------	-------	------------------------------------	-------------------	-----------------------------------	-------

Figura 48 – Parametri relativi alla ventilazione naturale

Nella Figura 49 si riporta un esempio di laboratorio con ventilazione meccanica:

**Ventilazione**

Ventilazione  Naturale  Meccanica  Ibrida

Metodo di calcolo *i*

Categoria edificio

Sottocategoria

Portata d'aria esterna Qop  10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> / s pers

Indice di affollamento ns  pers / m<sup>2</sup>

fve.t  *i*

**Portate di aria esterna di riferimento**

Potenza invernale	qve.0_p,H	<input type="text" value="136,68"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h
Energia invernale	qve.0_e,H	<input type="text" value="136,68"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h
Energia estiva	qve.0_e,C	<input type="text" value="136,68"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h

**Calcolo orario**

Portata d'aria	qve.0	<input type="text" value="136,68"/>	m <sup>3</sup> /h	<input type="text" value="1,48"/>	Vol/h
----------------	-------	-------------------------------------	-------------------	-----------------------------------	-------

Figura 49 - Parametri relativi alla ventilazione forzata nei laboratori

## 7. Analisi dei consumi e calibrazione del modello

La calibrazione è il processo in cui i parametri di input della simulazione sono regolati in modo preciso e specifico in modo da ottenere una corrispondenza più stretta possibile tra i risultati simulati tramite il software e quelli osservati reali.

La modellazione dell'edificio, eseguita sul programma Edilclima, include numerose variabili che possono essere non note e quindi affette da incertezza come, ad esempio, le specifiche dell'involucro edilizio, i profili di occupazione, le temperature di set point degli impianti e gli apporti termici. Questi parametri in una fase iniziale vengono dunque ipotizzati ma successivamente possono essere modificati e perfezionati per incrementare l'affidabilità del modello realizzato e per ottenere risultati più accurati. I risultati ottenuti dal software vengono confrontati con i dati effettivi di consumo dell'edificio ad ogni simulazione e il processo continua fino al raggiungimento dell'accuratezza desiderata. Nel caso analizzato, i dati reali a disposizione sono quelli relativi ai consumi di energia per il riscaldamento e per il raffrescamento dell'anno 2023.

### Consumi attuali dell'edificio 4A

Nella Tabella 18 sono riportati i dati mensili di consumo di energia relativi al teleriscaldamento; l'impianto in questione è al servizio dell'intera sede centrale del Politecnico e non essendo presente un sistema di contabilizzazione dei consumi sui singoli edifici si è deciso di procedere con una valutazione sulla base del rapporto delle volumetrie.

Volume netto totale della sede centrale = 468.191,11 m<sup>3</sup>

Volume netto totale dell'edificio 4A = 28.756,12 m<sup>3</sup>

→ Rapporto tra i volumi = 0,0614

Tabella 18 – Consumo attuale di energia per il riscaldamento [13]

	CONSUMO DI ENERGIA TERMICA – RISCALDAMENTO [kWh]	
	Sede Centrale Politecnico	Fabbricato 4A
Gennaio	2.011.000	123.515
Febbraio	1.566.000	96.183
Marzo	1.277.000	78.433
Aprile	304.000	18.672
Maggio	-	-
Giugno	-	-
Luglio	-	-
Agosto	-	-
Settembre	-	-
Ottobre	391.000	24.015
Novembre	1.369.000	84.083
Dicembre	2.104.000	129.227
TOTALE	9.022.000	554.128

Nella Tabella 19 sono riportati i dati mensili di consumo di energia elettrica del gruppo frigorifero CF3 del Politecnico per il raffrescamento; l'impianto in questione è al servizio del complesso di edifici nominato TO\_CEN04, che include anche l'edificio 4A sotto studio. Come nella situazione precedente avendo a disposizione le volumetrie si è optato per una valutazione del consumo del singolo edificio considerando il rapporto tra volumi.

Volume netto totale del complesso TO\_CEN04 = 101.853,20 m<sup>3</sup>

Volume netto totale dell'edificio 4A = 28.756,12 m<sup>3</sup>

→ Rapporto tra i volumi = 0,2823

Tabella 19 - Consumo attuale di energia per il raffrescamento [13]

	CONSUMO ENERGIA – RAFFRESCAMENTO		
	ENERGIA ELETTRICA [kWh]	ENERGIA FRIGORIFERA [kWh]	
	Complesso TO_CEN 04	Complesso TO_CEN 04	Fabbricato 4A
Maggio	1290	4127	1165
Giugno	25.312	80.999	22.868
Luglio	70.672	226.152	63.849
Agosto	46.404	148.492	41.924
Settembre	43.151	138.082	38.984
TOTALE	186.828	597.851	168.791

### Calibrazione del modello

Noti i consumi reali dell'edificio, è possibile procedere con la calibrazione andando a modificare il modello realizzato sul software. L'obiettivo, come descritto in precedenza, è ottenere dei consumi simulati più simili possibili alla realtà in modo da rappresentare al meglio il comportamento energetico dell'edificio.

L'ASHRAE Guideline 14-2023 descrive due procedure che possono essere impiegate per verificare l'accuratezza della calibrazione dei modelli energetici di edifici:

- Tecniche di confronto grafico;
- Tecniche di confronto statistico.

Il primo metodo consente una visualizzazione grafica delle prestazioni dell'edificio tramite l'utilizzo della firma energetica, grafico in cui sono messi in correlazione i consumi energetici e le condizioni climatiche esterne. Il secondo metodo invece, tramite un approccio analitico, consente di validare la calibrazione effettuata per mezzo del calcolo di due indici:

- Hourly Mean Bias Error index (MBE) → è l'errore percentuale utilizzato per valutare quanto il consumo energetico previsto dal modello corrisponda ai dati reali misurati su base mensile o annuale.

$$MBE (\%) = \frac{\sum_{periodo} (S - M)_{intervallo}}{\sum_{periodo} M_{intervallo}} \times 100\%$$

S → Consumo energetico simulato

M → Consumo energetico misurato

Tale indice può essere affetto da errori compensativi tra i valori positivi e negativi dei diversi intervalli di tempo e dunque è necessario un secondo indice:

- Coefficient of the Root Mean Square Error (CV(RMSE)) → è l'errore percentuale che rappresenta una misura normalizzata della variabilità tra i dati misurati e quelli simulati; minore è il valore, migliore è la calibrazione.

$$CV(RMSE) (\%) = \frac{RMSE_{periodo}}{A_{periodo}} \times 100 \%$$

A → Media del consumo energetico misurato in un determinato periodo

RMSE → Errore quadratico medio (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{intervallo}^2}{n_{intervallo}}}$$

n → Numero di intervalli di tempo nel periodo considerato

Considerando un calcolo con un intervallo di tempo mensile, i limiti imposti ai valori dei due indici per ritenere il modello calibrato devono essere:

- MBE compreso tra + 5% e - 5%
- CV(RMSE) ≤ 15%

La calibrazione del modello dell'edificio oggetto di studio è stata eseguita partendo dal metodo grafico e successivamente è stata validata attraverso il calcolo degli indici.

Nella Figura 50 viene riportata la firma energetica per il riscaldamento con la rappresentazione dei consumi dell'edificio in relazione alla temperatura media esterna mensile. Il grafico mostra una serie di punti che descrivono come l'edificio si comporti dal punto di vista dei consumi energetici rispetto alla variazione delle condizioni climatiche durante l'anno. I punti in blu rappresentano i dati misurati, noti tramite le bollette, mentre i punti in arancione sono i dati ottenuti dalla simulazione tramite Edilclima. Tramite un'interpolazione lineare dei punti si possono ottenere due linee in cui:

- L'inclinazione è determinata da tutti i termini del bilancio energetico che dipendono dalla differenza tra temperatura interna ed esterna.
- Il valore costante dipende dagli apporti termici e dall'efficienza degli impianti.

L'obiettivo di questo approccio è ottenere la sovrapposizione delle due linee, ovvero ridurre la deviazione dei risultati simulati da quelli reali. Nella Figura 50 è rappresentato il grafico ottenuto alla fine del processo di calibrazione.

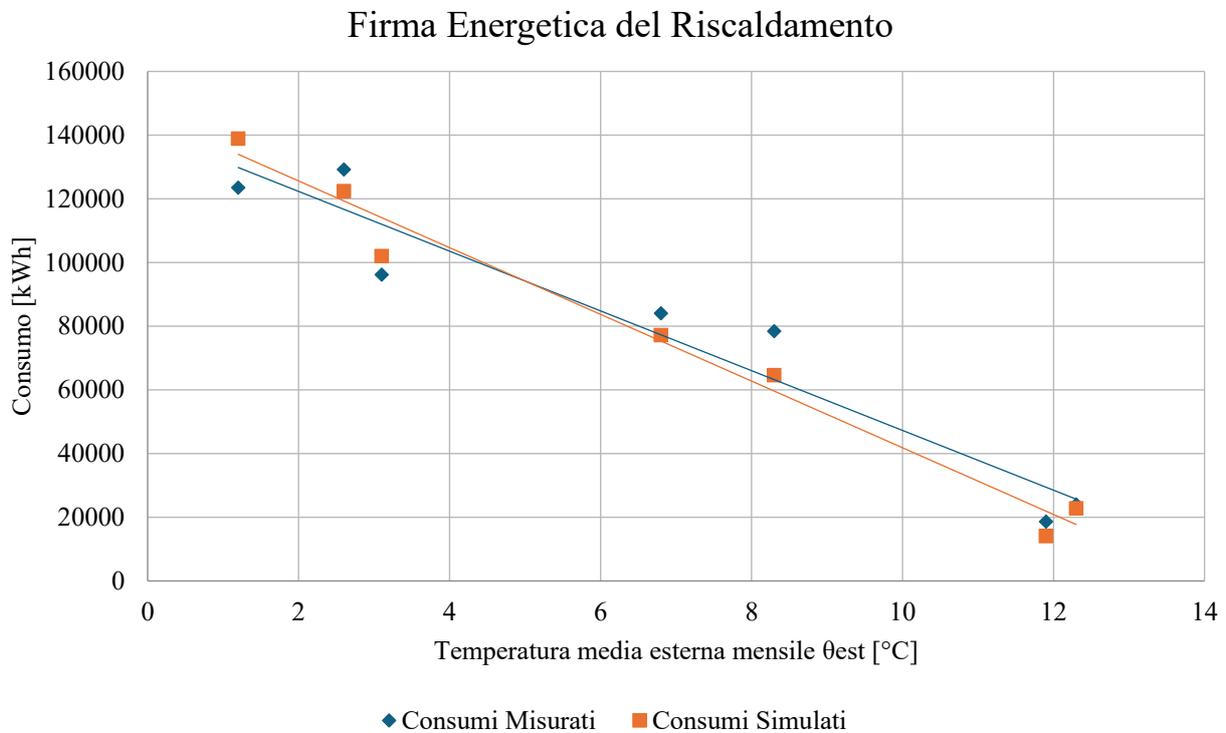


Figura 50 – Firma energetica per il riscaldamento post-calibrazione

Questo metodo è basato su un'osservazione visiva e se da un lato offre un facile e rapido metodo di confronto, dall'altro può risultare meno accurato di altre strategie. Per questo motivo si è optato per il calcolo analitico dei coefficienti MBE e CV(RMSE) in modo da verificare l'accuratezza della calibrazione tramite il confronto dei valori ottenuti con i limiti imposti dalle linee guida dell'ASHRAE.

Nella Tabella 20 sono riportati i valori dei consumi mensili e i risultati dei coefficienti calcolati. Sia l'MBE sia il CV(RMSE) rispettano i limiti imposti e, dunque, il modello può essere considerato calibrato dal punto di vista del riscaldamento.

Tabella 20 – Indici per la calibrazione del modello energetico (Riscaldamento)

	RISCALDAMENTO					
	T <sub>est</sub> [°C]	Consumo Misurato (M) – [kWh]	Consumo Simulato (S) – [kWh]	MBE [-]	RMSE [kWh]	CV(RMSE) [-]
Gennaio	1,2	123.515	138.877	-2,19%	9082,36	11,47%
Febbraio	3,1	96.183	101.994			
Marzo	8,3	78.433	64.618			
Aprile	11,9	18.672	14.095			
Ottobre	12,3	24.015	22.821			
Novembre	6,8	84.083	77.178			
Dicembre	2,6	129.227	122.389			

Lo stesso procedimento è stato eseguito per il raffrescamento e nella Tabella 21 sono riassunti i risultati mensili. Anche in questo caso i coefficienti rispettano i limiti e il modello può essere considerato definitivamente calibrato.

Tabella 21 - Indici per la calibrazione del modello energetico (Raffrescamento)

	RAFFRESCAMENTO					
	T <sub>est</sub> [°C]	Consumo Misurato (M) – [kWh]	Consumo Simulato (S) – [kWh]	MBE [-]	RMSE [kWh]	CV(RMSE) [-]
Giugno	22,1	22.868	29.111	-3,52%	6100,00	14,56%
Luglio	23,6	63.849	65.906			
Agosto	22,6	41.924	47.896			
Settembre	19,1	38.985	30.620			

## Risultati della diagnosi energetica

In seguito al processo di calibrazione del modello, la simulazione ha riportato i seguenti risultati:

- Fabbisogno di Energia Primaria → si riferisce all'energia ottenuta direttamente dalle fonti primarie senza essere soggetta a nessun processo di trasformazione o conversione

Tabella 22 – Fabbisogno di energia primaria allo stato attuale

	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]
RISCALDAMENTO	490.339	5.916	496.255
RAFFRESCAMENTO	133.254	32.118	165.372
Globale	623.593	38.034	661.627

$E_{P,nren}$  → Energia primaria non rinnovabile

$E_{P,ren}$  → Energia primaria rinnovabile

$E_{P,tot}$  → Energia primaria totale

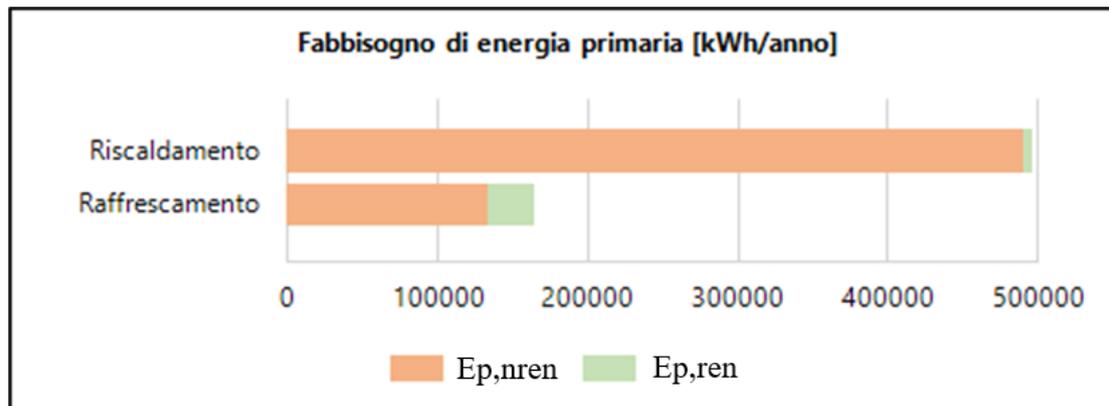


Figura 51 – Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e raffrescamento

- Indice di Prestazione Energetica → esprime il fabbisogno di energia primaria in relazione alla superficie utile di riferimento

Tabella 23 – Indici di prestazione energetica allo stato attuale

	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
RISCALDAMENTO	50,21	0,61	50,82
RAFFRESCAMENTO	13,64	3,29	16,93
Globale	63,85	3,90	67,75

$EP_{nren}$  → Indice di prestazione energetica non rinnovabile

$EP_{ren}$  → Indice di prestazione energetica rinnovabile

$EP_{tot}$  → Indice di prestazione energetica totale

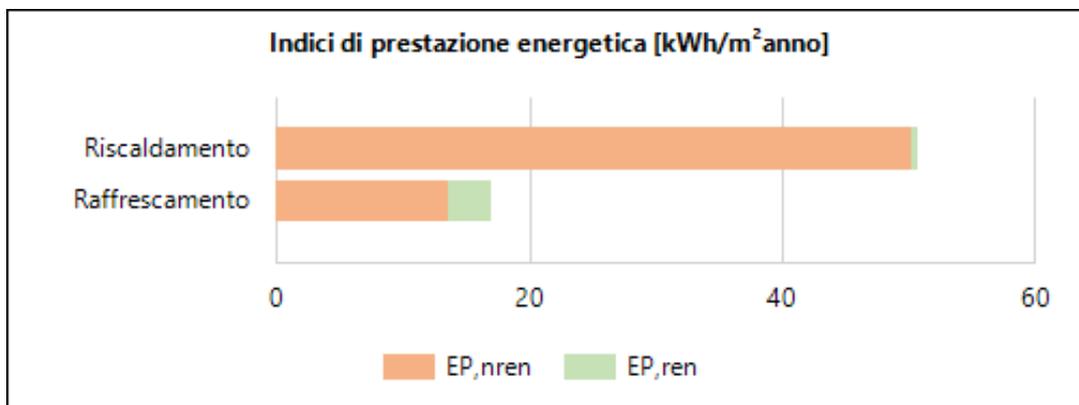


Figura 52 – Indici di prestazione energetica per il riscaldamento e raffrescamento

➤ Emissioni di CO<sub>2</sub> per vettore energetico e servizio

Tabella 24 – Consumo dei vettori energetici ed emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte allo stato attuale

	Vettore energetico	Consumo Annuo	Emissioni CO <sub>2</sub> Annue
RISCALDAMENTO	Teleriscaldamento	542.882 kWh <sub>t</sub>	162.865 kg
	Energia Elettrica	12.588 kWh <sub>el</sub>	5.791 kg
RAFFRESCAMENTO	Energia Elettrica	68.336 kWh <sub>el</sub>	31.434 kg

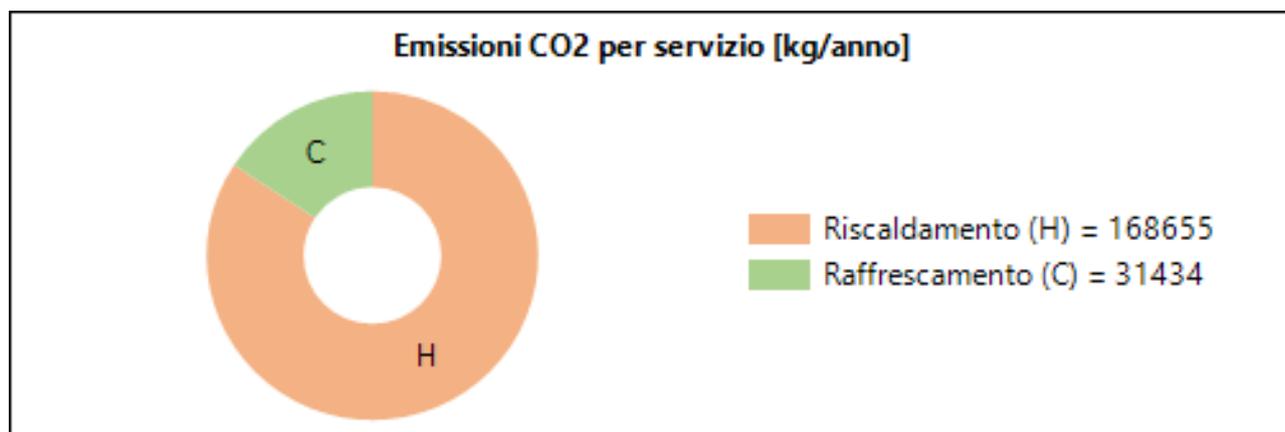
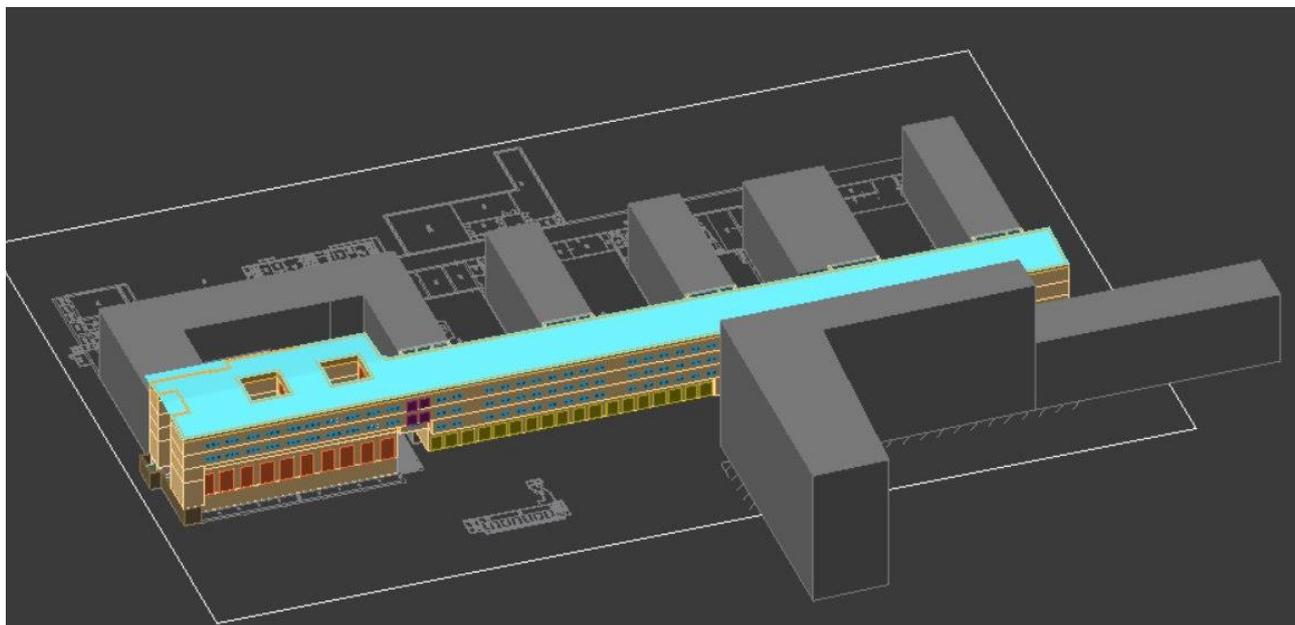


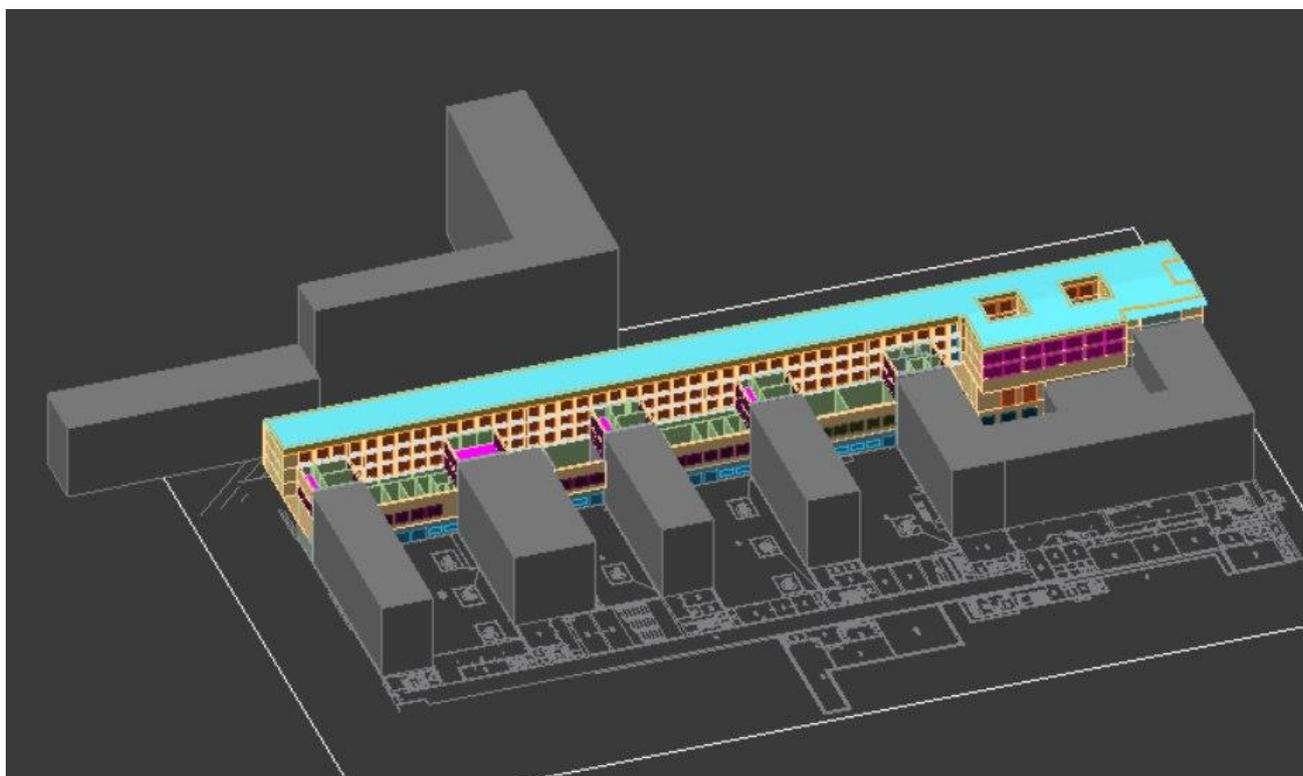
Figura 53 – Emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dal riscaldamento e raffrescamento

### Rendering 3D del modello su Edilclima

Di seguito, in Figura 54 e Figura 55, sono riportate le rappresentazioni 3D dell'edificio oggetto di studio realizzato su Edilclima alla conclusione della fase di modellazione.



*Figura 54 – Vista assometrica nord-ovest del modello dell'edificio 4A realizzato su Edilclima*



*Figura 55 - Vista assometrica sud-est del modello dell'edificio 4A realizzato su Edilclima*

## 8. Efficientamento energetico degli impianti di climatizzazione

### Introduzione

Nel corso dei decenni gli edifici sono stati oggetto di una continua evoluzione delle tecniche costruttive affiancata da un significativo cambiamento dell'architettura. L'estetica dei più moderni edifici è ben distante da quella che si ritrova in palazzi del secolo scorso e ciò si ripercuote anche nel modo di realizzare la struttura vera e propria. Oggi si preferisce l'utilizzo di pareti leggere con spessori ridotti rispetto al passato perché sono più convenienti economicamente, di più facile realizzazione e alleggeriscono in generale il peso complessivo dell'edificio. Questa scelta, tuttavia, comporta una notevole riduzione di massa e quindi della capacità termica degli edifici – capacità di immagazzinare energia – che, in questo modo, risultano più esposti alle oscillazioni termiche durante i vari giorni e stagioni dell'anno. Inoltre, si tendono ad utilizzare finestre di grandi dimensioni che in alcuni casi diventano delle vere e proprie pareti divisorie tra ambiente interno ed esterno. Se dal punto di vista dell'illuminazione naturale si ottiene un grande vantaggio, al tempo stesso le radiazioni solari penetrano più facilmente alterando l'ambiente interno con il rischio di provocare surriscaldamenti nei giorni più caldi. Tutte queste caratteristiche rendono la presenza degli impianti di climatizzazione sempre più fondamentale negli edifici e questo implica spendere più energia per mantenere le corrette condizioni negli ambienti e il benessere degli occupanti.

Attualmente, grazie all'intervento di regolamentazioni, la tendenza è di progettare e costruire nuovi edifici capaci di ridurre al minimo i consumi energetici, cercando di azzerare le richieste di energia dall'esterno, sfruttando al massimo le energie rinnovabili e garantendo al tempo stesso condizioni di comfort ottimali all'interno. Negli edifici esistenti l'efficientamento energetico è un obiettivo da perseguire per ridurre i consumi e i costi ma soprattutto per limitare l'impatto sull'ambiente. Il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti rappresentano la maggior fonte di consumo energetico negli edifici. Nel 2019 Assoimmobiliare ha effettuato con ENEA uno studio per analizzare i consumi energetici degli edifici adibiti ad uffici in Italia basato su un campione di 123 diagnosi energetiche presentate dalle imprese più grandi ed energivore. I risultati hanno evidenziato che i consumi per la climatizzazione dell'aria sono prevalenti, circa il 57% del totale, seguiti dai consumi degli apparecchi FEM, il 25%, e infine dall'illuminazione per il 17%. Queste percentuali sono pressoché invariate al variare delle dimensioni degli edifici.

Investire nella riqualificazione e nell'ottimizzazione degli impianti termici tramite l'impiego di soluzioni più efficienti rappresenta un passo importante verso una maggiore sostenibilità e risparmio energetico, vista la sempre più importante rilevanza di questi all'interno del sistema edificio. Tuttavia, prima di investire in nuovi sistemi più performanti, è necessario comprendere al meglio sia le caratteristiche e sia il comportamento dell'edificio nelle diverse condizioni climatiche in modo da garantire una corretta progettazione e massimizzare i benefici dell'intervento.

### Impianti termici

Gli impianti di climatizzazione, secondo la norma UNI 10339:1995, sono “sistemi che effettuano il controllo continuativo delle condizioni termiche, igrometriche, di qualità e di movimento dell'aria

comprese entro i limiti richiesti per assicurare il benessere alle persone”. Il ruolo chiave di questi sistemi è di raggiungere, mantenere e controllare nel tempo le condizioni di benessere termoigrometrico all’interno degli edifici per un agevole svolgimento delle attività degli occupanti. I parametri che possono essere controllati sono numerosi ma i più importanti sono la temperatura, l’umidità relativa e la qualità dell’aria.

Il consumo energetico degli edifici è influenzato in maniera significativa dai sistemi adottati per garantire la qualità degli ambienti interni. Servizi quali riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e ventilazione devono essere progettati e gestiti in maniera ottimale per soddisfare il comfort degli occupanti, creando un ambiente sano e produttivo. È dimostrato come un ambiente con bassi standard di qualità comporti costi più elevati in termini di perdita di produttività ma anche per il fatto che gli occupanti sono più propensi a prendere azioni per migliorare l’ambiente interno, a discapito dei consumi di energia, come ad esempio l’apertura delle finestre.

### Sottosistemi degli impianti

Un impianto di riscaldamento o raffrescamento è costituito da due sezioni:

- Generazione → dal punto di consegna dell’energia attraverso il confine dell’edificio fino al punto di consegna dell’energia termica alla rete di distribuzione dell’edificio. Comprende quindi i sottosistemi che trasformano l’energia dei vettori energetici in energia termica utile da fornire agli utilizzatori.
- Utilizzazione → dal punto di consegna dell’energia alla rete di distribuzione fino al punto di emissione dell’energia termica. È compreso il sottosistema di distribuzione, di regolazione e di emissione, talvolta è presente il sottosistema di accumulo.

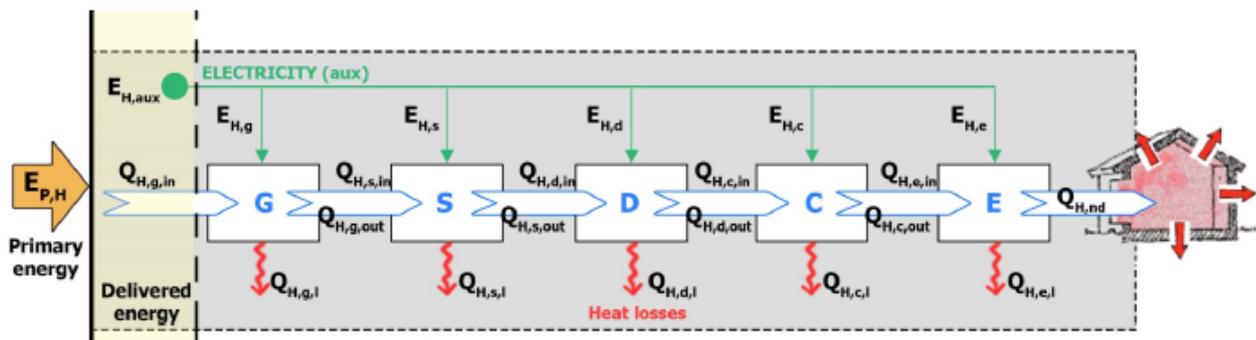


Figura 56 – Flussi energetici relativi ai sottosistemi degli impianti termici (Generation, Storage, Distribution, Control, Emission) [18]

L’efficientamento energetico degli impianti di riscaldamento e raffrescamento può essere dunque eseguito con interventi mirati sui singoli sottosistemi che lo compongono. Ciascuno di questi presenta varie alternative che devono essere attentamente valutate considerando le esigenze, il lato economico, l’impatto dell’intervento e altri fattori che nell’insieme evidenziano la soluzione migliore al caso studiato. Solitamente gli interventi di riqualificazione energetica che causano un maggior risparmio

di energia riguardano la generazione e il sottosistema di regolazione ma è bene studiare tutto l'impianto, specialmente in edifici di grandi dimensioni dove anche un piccolo miglioramento in termini di efficienza può portare a grandi benefici.

Di seguito sono analizzati in dettaglio i quattro sottosistemi, evidenziando lo stato attuale e considerando diverse soluzioni di intervento per l'edificio oggetto di studio in modo da comprendere meglio i vantaggi, svantaggi e altre problematiche connesse.

### Sottosistema di generazione

Il sistema di generazione rappresenta il cuore dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento in quanto è il responsabile della produzione dell'energia termica e frigorifera necessaria a soddisfare il fabbisogno dell'edificio. A seconda delle esigenze e delle fonti energetiche a disposizione esistono diverse tecnologie che possono essere utilizzate:

- La combustione tramite la tradizionale caldaia;
- Il trasferimento di energia tra due sorgenti a diversa temperatura impiegando una pompa di calore;
- La conversione diretta come nel caso dei collettori solari che convertono le radiazioni solari in energia termica;
- Sistemi di cogenerazione e trigenerazione;
- Teleriscaldamento e teleraffrescamento.

Attualmente il riscaldamento dell'edificio è soddisfatto tramite l'allacciamento alla rete del teleriscaldamento della città di Torino. Gli impianti di cogenerazione di Moncalieri e di Torino Nord producono simultaneamente energia elettrica ed energia termica a partire dalla combustione del gas. Tramite il recupero del calore di scarto delle centrali è possibile alimentare la rete del teleriscaldamento con acqua surriscaldata che viene mandata fino alle sottostazioni di scambio termico presso gli utenti finali oppure stoccato in punti strategici della rete. Grazie alla cogenerazione è possibile ottimizzare l'uso del combustibile con una riduzione dei consumi e delle emissioni rispetto alla produzione separata di energia elettrica e calore. Le alte efficienze raggiunte, grazie allo sfruttamento del calore di scarto, rendono il sistema più sostenibile rispetto ai metodi più tradizionali e per questo motivo il teleriscaldamento sta assumendo un ruolo sempre più centrale nel perseguire gli obiettivi di sviluppo sostenibile. Il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) presentato dal governo italiano alla commissione europea nel 2020 riconosce appunto il ruolo strategico del teleriscaldamento per la riduzione delle emissioni e l'aumento dell'efficienza energetica e ne promuove un maggiore sfruttamento e diffusione.

Per quanto riguarda il raffrescamento, l'edificio è servito da un gruppo frigorifero di recente installazione, caratterizzato da elevate prestazioni. L'alta efficienza è dovuta alla presenza di un compressore che utilizza cuscinetti magnetici sostituendo la classica lubrificazione a olio e riuscendo così a minimizzare l'attrito e quindi le perdite di energia.

Una soluzione alternativa al teleriscaldamento e che non prevede la combustione di gas per la produzione di calore è la pompa di calore alimentata da energia elettrica. I vantaggi principali sono:

- la capacità di funzionamento sia in regime estivo e sia invernale;

- la possibilità di sfruttare diverse sorgenti in base alla disponibilità (l'aria esterna, l'acqua di falda o superficiale o il terreno sfruttando l'energia geotermica);
- l'energia elettrica può essere prodotta da fonti rinnovabili rendendo la generazione sostenibile e riducendo le emissioni anche a zero.

Nel caso dell'edificio 4A del Politecnico di Torino si è scelto tuttavia di non intervenire sul sottosistema di generazione per i seguenti motivi:

- Il teleriscaldamento è considerato una scelta efficiente e sostenibile per la fornitura di calore;
- Il gruppo frigorifero per il raffrescamento è di recente installazione e presenta alte efficienze e prestazioni;
- L'intera sede centrale dell'ateneo è allacciata alla rete del teleriscaldamento;
- Il gruppo frigorifero a servizio dell'edificio 4A produce energia frigorifera anche per altri fabbricati della sede adiacenti.

Per i motivi elencati l'attenzione è stata concentrata sull'efficientamento energetico degli altri componenti dell'impianto senza modificare il lato generazione.

#### Sottosistema di distribuzione

La rete di distribuzione dell'impianto permette la trasmissione del calore dal generatore fino ai sistemi di emissione attraverso la circolazione del fluido termovettore. Si distinguono due tipologie di impianto: i circuiti idraulici dove il fluido utilizzato è acqua e i circuiti aerulici in cui la trasmissione avviene tramite la movimentazione dell'aria in canali di ventilazione. L'impianto può avere diverse configurazioni in base al tipo di edificio e alle esigenze di climatizzazione. Per garantire e controllare la circolazione del fluido nei condotti sono presenti componenti ausiliari come pompe e ventilatori. La coibentazione delle tubature in questo impianto ricopre un ruolo fondamentale sull'efficienza dell'intero sistema ed è fondamentale cercare di ridurre al minimo le perdite con isolamenti adeguati.

Nell'edificio analizzato, la rete di distribuzione, comune sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento, è costituita da due dorsali principali collocate nel sottotetto che alimentano, tramite stacchi, le colonne montanti verticali. Il fluido termovettore utilizzato è l'acqua che segue pertanto un percorso dall'alto verso il basso scendendo dalla copertura verso i numerosi terminali distribuiti sui cinque piani del fabbricato per soddisfare il fabbisogno termico nei locali. L'impianto è a due tubi, con una mandata e un ritorno separati, dai quali sono realizzati gli attacchi per i singoli terminali. Questa configurazione permette una distribuzione più uniforme del calore nei singoli terminali rispetto alla soluzione monotubo ed è particolarmente adatta per sistemi centralizzati in edifici di grandi dimensioni come quello analizzato. La rete è realizzata con tubazioni in acciaio, con un isolamento in lana minerale e una finitura superficiale in nastratura PVC. Gli stacchi sono costituiti da valvole a farfalla o a sfera che regolano il passaggio del fluido.

L'attuale rete di distribuzione risulta obsoleta, pertanto si prevede la sostituzione delle tubazioni principali, dei vari stacchi e delle colonne verticali con il rifacimento dell'isolamento termico. Quest'ultimo risulta particolarmente importante essendo la rete in copertura e negli intermezzi delle pareti esterne, esposta quindi a dispersioni termiche notevoli. Il DPR 412/93 specifica lo spessore minimo di isolante che deve essere applicato alle tubazioni per la distribuzione del calore in cui circola

un fluido caldo. Lo spessore varia in base alla conduttività termica utile dell'isolante e al diametro esterno del condotto.

Nella Figura 57 è riportato un estratto di una tavola del progetto di riqualificazione degli impianti relativa al locale sottotetto; in questa sono riportate in grigio le dorsali attualmente presenti e in blu le nuove dorsali che le sostituiranno. Il tetto sarà anche rialzato di circa un metro per permettere un accesso più agevole per eventuali ispezioni e manutenzioni.

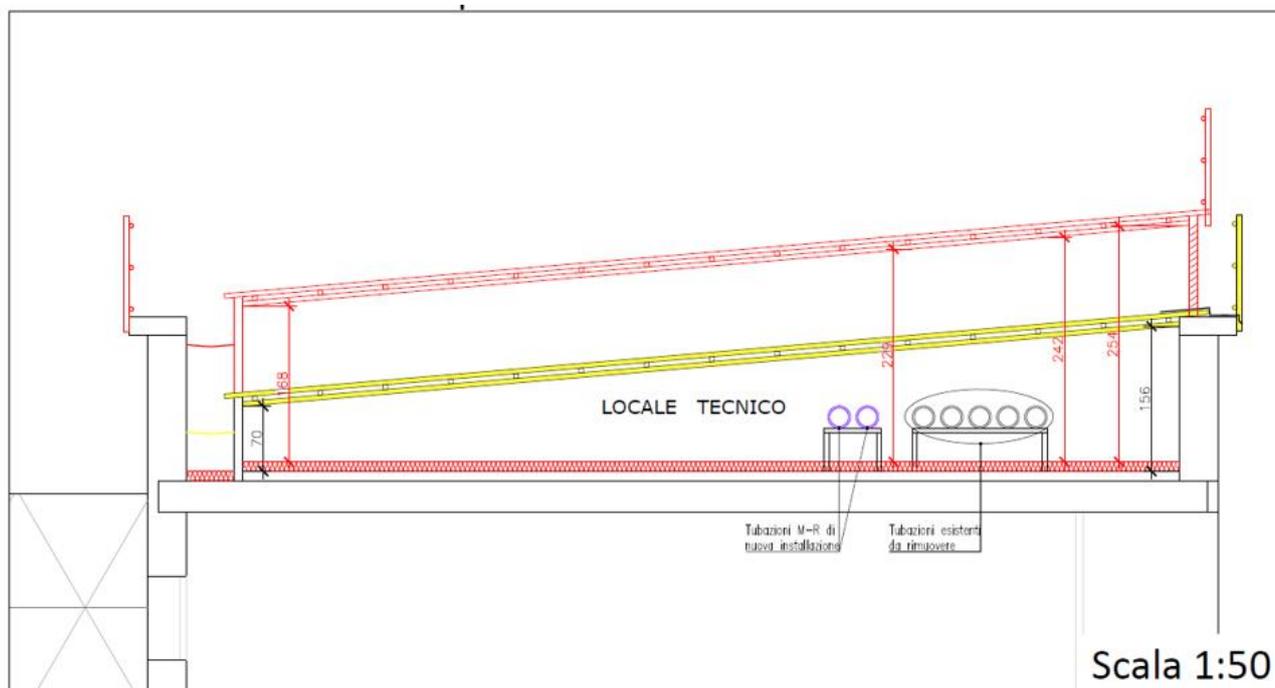


Figura 57 – Sezione del sottotetto con particolare relativo al progetto di rialzo della copertura e sostituzione delle dorsali [5]

La Figura 58, estratta dal progetto dei nuovi impianti di distribuzione nel sottotetto, mostra tramite una vista dall'alto le nuove dorsali (le due linee orizzontali) con gli stacchi di collegamento (le linee verticali) per alimentare i montanti che scendono verso il basso, servendo i diversi piani dell'edificio.

## FABBRICATO 4A - Piano Sottotetto

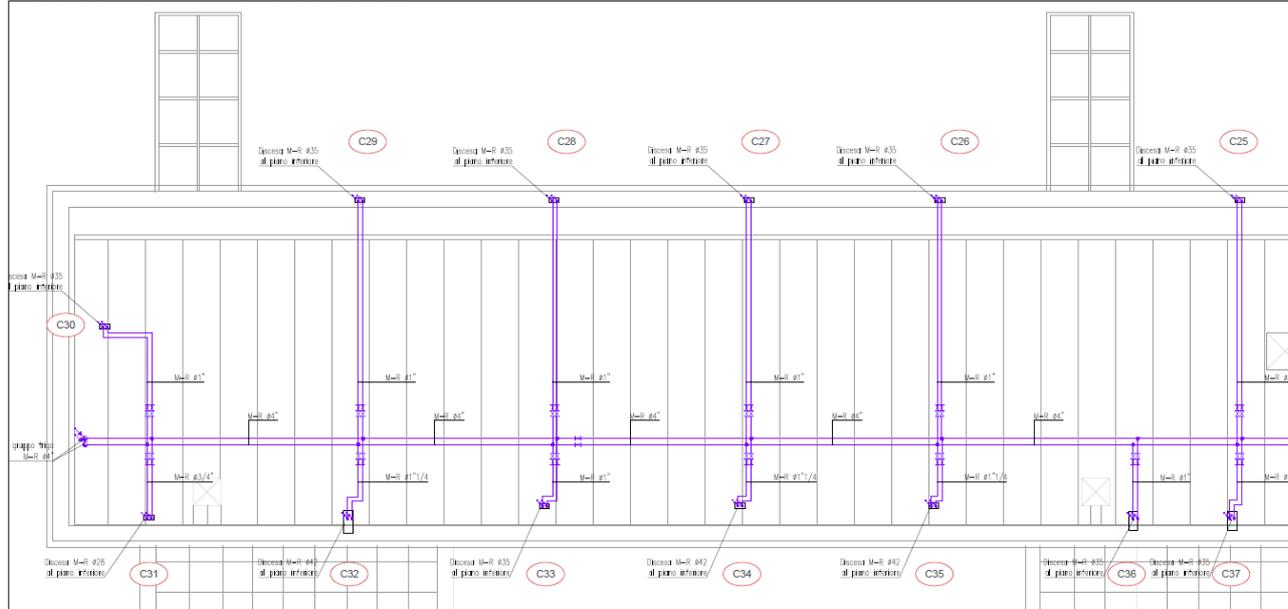


Figura 58 – Estratto della tavola relativa al progetto per l'installazione delle nuove dorsali principali e gli stacchi per i montanti verticali (piano sottotetto) [5]

### Sottosistema di regolazione

Il sistema di regolazione rappresenta il cervello dell'intero impianto. Questo permette di raggiungere le condizioni termoigrometriche desiderate e di mantenerle adattando il funzionamento in base alle diverse condizioni trovate nell'edificio.

Il sistema di regolazione della temperatura è una componente fondamentale per l'impianto di riscaldamento e raffrescamento in quanto è necessario adattare la potenza del sistema di emissione per ottenere la temperatura desiderata in un dato ambiente. L'obiettivo è di garantire agli occupanti il corretto comfort termico e allo stesso tempo ottimizzare l'efficienza per ridurre gli sprechi di energia e i costi. Per ottenere questi risultati è quindi importante una corretta progettazione e installazione delle componenti prendendo in considerazione le necessità effettive degli utilizzatori, le condizioni climatiche, le caratteristiche dell'edificio, gli apporti interni ed altri numerosi fattori.

La regolazione è fondamentale per assicurare:

- Efficienza energetica → un sistema ben progettato può ridurre i consumi energetici evitando sprechi e costi aggiuntivi, andando a adattare la potenza emessa sulla base delle reali esigenze termiche.
- Comfort termico → permette di mantenere la temperatura stabile e uniforme negli ambienti con la possibilità di personalizzare il comfort nei diversi spazi dell'edificio.
- Riduzione dei costi → un impianto ottimizzato permette di abbattere i consumi e ridurre i costi operativi e di manutenzione.

Esistono diverse tipologie di regolazione disponibili in commercio che permettono di intervenire sulla temperatura interna dei singoli ambienti e delle zone, sulla temperatura di mandata del fluido termovettore impiegato ma anche una loro combinazione è possibile:

- **Regolazione manuale:** regolazione basilare in cui l'utente va manualmente ad agire e regolare la potenza di emissione. Ad esempio, in alcuni ventilconvettori è possibile regolare la potenza emessa del terminale o la velocità dell'aria in uscita tramite manopole dedicate.
- **Solo climatica:** tenendo in considerazione le condizioni climatiche esterne il sistema va a modulare la temperatura di mandata del fluido termovettore impiegato nell'impianto. Un sensore viene installato all'esterno dell'edificio, posizionato a nord e lontano da fonti di calore per non alterare la misurazione, e rileva in modo continuo la temperatura atmosferica. L'informazione viene successivamente utilizzata dalla centralina che, tramite una curva climatica preimpostata, adatta la temperatura di mandata del fluido termovettore. Questo è reso possibile dall'intervento sulla portata del gas o sulla potenza del bruciatore in caso di caldaia oppure con una valvola di miscelazione.

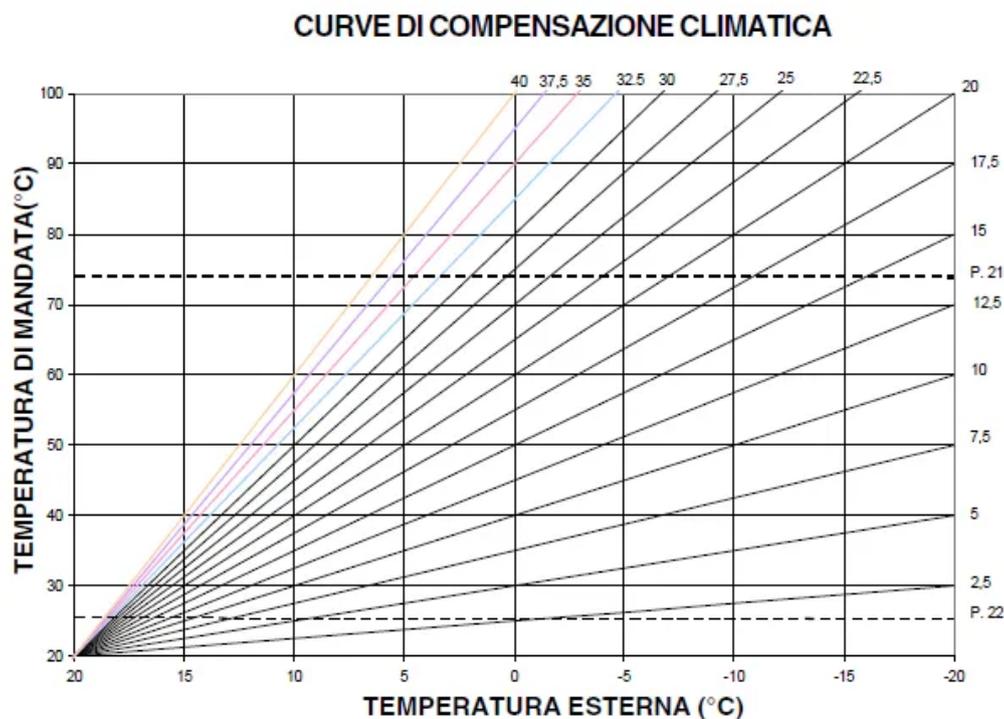


Figura 59 – Esempio di curve di compensazione climatica [9]

Esistono diverse curve in base alla temperatura desiderata all'interno dei locali. La temperatura esterna durante la giornata varia e quindi anche le dispersioni verso l'ambiente esterno cambiano. Quando la temperatura si abbassa, il sistema va a incrementare la temperatura del fluido secondo la curva per compensare le maggiori dispersioni e per mantenere una temperatura interna più costante. Allo stesso modo, quando la temperatura esterna è più elevata, le dispersioni sono minori ed è quindi possibile impiegare una temperatura di mandata ridotta, risparmiando così sul consumo di energia. La centralina, dunque, grazie ad un dialogo tra sensore e generatore permette un'ottimizzazione dell'impianto di climatizzazione. La curva climatica solitamente è preimpostata ma può essere adattata alle caratteristiche dell'edificio e alle esigenze dell'utente.

Questo sistema, tuttavia, presenta dei limiti in quanto non sono presenti sensori di temperatura interna degli ambienti e, considerando che ognuno di essi ha dispersioni differenti, non tiene conto delle reali esigenze di ciascun locale. Si potrebbe avere una potenza di emissione troppo elevata o troppo ridotta creando un discomfort termico.

- Solo per singolo ambiente: il sistema permette di controllare la temperatura in modo indipendente per ogni locale dell'edificio senza un coordinamento centralizzato. Tale regolazione si basa su termostati e valvole termostatiche applicate ai singoli terminali. I sensori sono in grado di adattare la potenza termica in base alla temperatura percepita fino a raggiungere il livello desiderato. Nel caso di radiatori, la valvola agisce modulando il flusso di acqua calda, mentre nel caso del ventilconvettore esso interviene sulla velocità della ventola o sul flusso di fluido. Questa regolazione permette di regolare in modo autonomo il comfort termico in ciascuna stanza, permettendo anche di avere temperature differenti in diversi locali e zone dell'edificio. L'assenza di un coordinamento tra gli ambienti, tuttavia, non va ad ottimizzare l'efficienza complessiva dell'impianto e le esigenze di un ambiente possono essere in contrasto con le necessità degli altri.
- Per singolo ambiente + climatica: questa regolazione è una combinazione dei precedenti due casi spiegati. Va a sopperire agli svantaggi di entrambi, permettendo un miglior comfort termico nei singoli locali rispetto alla sola climatica ma in contemporanea ottimizza l'efficienza dell'intero impianto andando a considerare anche la temperatura esterna.
- Solo di zona: l'edificio viene diviso in più zone e ciascuna di esse è dotata di un termostato ambiente installato in un locale di riferimento per tale zona. La suddivisione è importante in quanto rende più o meno efficiente questo tipo di regolazione. Solitamente gli ambienti vengono suddivisi in base al tipo di esposizione (zona sud, zona nord) e al differente utilizzo (zona uffici nel caso di edifici pubblici oppure zona giorno e zona notte nel caso di edifici residenziali). In questo modo è possibile accorpere diversi locali con apporti solari e apporti interni simili, impostando poi una strategia di regolazione della temperatura adeguata ai vari ambienti inclusi. Il termostato agisce su una valvola di zona regolando la potenza emessa dai terminali ma è necessario considerare che la regolazione viene effettuata solamente considerando il locale analizzato e dunque le temperature negli altri spazi possono essere differenti da quelle desiderate soprattutto se differenti sono gli apporti e il tipo di occupazione. Una scelta corretta del locale di riferimento è dunque cruciale in questa tipologia di regolazione e permette di ottimizzare l'impianto, risparmiando sui consumi, e di raggiungere un adeguato comfort termico. Prendere in considerazione il locale sbagliato può al contrario avere effetti negativi sugli occupanti e sull'efficienza del sistema.
- Per zona + climatica: regolazione che combina il controllo di zona, sopra spiegato, con la regolazione climatica. Una migliore ottimizzazione può essere raggiunta in questo modo.

Vi è in aggiunta la possibilità di scelta tra diversi metodi di funzionamento per il sistema di emissione:

- ON/OFF: sistema di regolazione più semplice e meno costoso che consiste in un funzionamento acceso/spento senza alcun tipo di modulazione. Un sensore misura la temperatura interna dell'ambiente e la confronta con il valore di set point impostato; nel caso

in cui la temperatura sia al di sotto o al di sopra del valore desiderato, il sistema attiva il riscaldamento o raffreddamento fino al raggiungimento del set point, per poi spegnere del tutto l'impianto. Il funzionamento, dunque, è ciclico composto da continue accensioni e spegnimenti delle pompe, caldaie, ventole e altri componenti. Solitamente per evitare funzionamenti intermittenti con troppa frequenza vi è una banda di tolleranza chiamata banda di isteresi, in questo modo anche l'usura dei componenti è ridotta. Ad esempio, considerando il sistema di riscaldamento con ventilconvettore con una banda di  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e con il set point impostato a  $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se la temperatura scende sotto i  $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  il sistema si attiva e funziona a pieno regime fino a un valore di  $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  per poi disattivarsi. I vantaggi sono sicuramente una maggiore semplicità e convenienza economica a discapito tuttavia del comfort, per la maggiore fluttuazione della temperatura, e dei consumi in quanto quando il sistema è attivo funziona alla massima potenza.

- Modulazione con banda proporzionale  $0,5\text{-}1\text{-}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ : in questo caso la regolazione dell'impianto avviene con una modulazione della potenza emessa in proporzione dello scostamento (errore) della temperatura misurata in ambiente rispetto dal valore di set point. In maniera continua viene calcolata la differenza tra i due valori e in base a questa si agisce modulando gradualmente la potenza. Più il valore misurato si avvicina a quello desiderato e più la potenza emessa diminuisce gradualmente. Vi è una banda proporzionale entro cui tale modulazione avviene ( $0,5, 1$  oppure  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mentre al di fuori di questo intervallo il sistema opera al 100% della potenza.

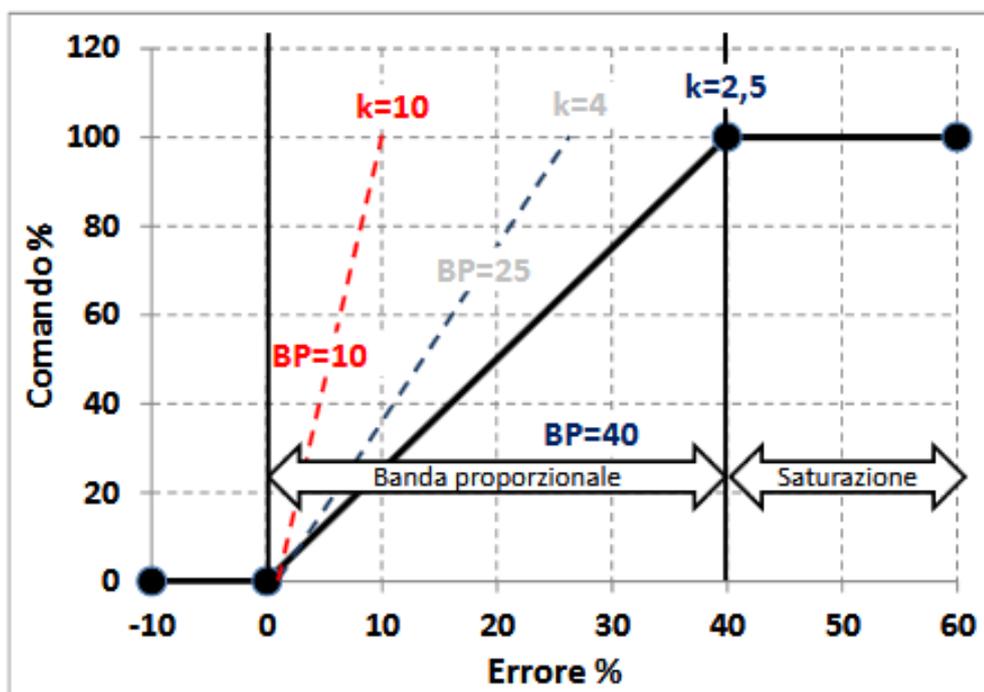


Figura 60 – Esempio di banda proporzionale [10]

Come si osserva in Figura 60, viene definita l'ampiezza dell'errore per cui viene comandata la massima potenza di uscita (40% di errore nel caso in figura). Questa si chiama appunto banda proporzionale (BP): all'interno di questa banda ad ogni valore di scostamento è indicato il valore percentuale della potenza di emissione del sistema. Man mano che l'errore si riduce

verso zero, la potenza di emissione diminuisce dal 100% allo 0%. Al di fuori della banda, quindi oltre il massimo valore di errore, la potenza è al 100%. L'azione proporzionale è istantanea e non ha memoria, dipende quindi dall'errore in quel preciso momento.

Tale sistema è più avanzato rispetto al semplice ON/OFF e permette di ottenere un miglior comfort, mantenendo la temperatura più vicina al set point con meno fluttuazioni, e un maggiore risparmio energetico vista la possibilità di lavorare a potenze inferiori di quella massima. La banda, tuttavia, deve essere scelta nel modo corretto perché un intervallo più stretto mantiene la temperatura più vicina a quella desiderata ma al tempo stesso causa maggiori attivazioni dell'impianto con cicli molto frequenti che possono diventare molto simili ad un funzionamento ON/OFF; una banda più larga invece comporta una regolazione più graduale con una minore sollecitazione dell'impianto ma si avrà maggiore discostamento dal set point.

- Regolazione PI/PID: queste tecniche sono più avanzate e vengono integrate nella regolazione con modulazione. Vi può essere l'introduzione di un'azione integrale (PI), in cui il controllo utilizza lo storico dei valori di temperatura ambiente misurati, e l'introduzione di un'azione derivativa (PID), da aggiungere a quella integrale, in cui si considera una previsione della variazione del valore e in questo modo è possibile velocizzare la reazione del sistema.

Allo stato attuale la regolazione dei terminali presenti nell'edificio avviene manualmente tramite i comandi di bordo dei ventilconvettori con sui si regola la velocità dell'aria in uscita dal terminale e la potenza riscaldante o raffrescante. Alcuni ambienti del fabbricato sono dotati di radiatori, non muniti di valvole termostatiche in grado di modulare la potenza di emissione.

L'intervento su questo sottosistema mira a un maggior controllo della temperatura considerando le reali esigenze degli utenti e dell'ambiente in cui è collocato il sistema di emissione. Diverse tipologie e strategie di regolazione sono state elencate e analizzate e ognuna presenta dei vantaggi e svantaggi che devono essere approfonditi tramite delle simulazioni per scegliere la soluzione ottimale. Questo studio sarà eseguito nel capitolo successivo. Vi è in aggiunta la possibilità di un'integrazione con un sistema BMS (Building Management System) per una gestione più intelligente: analizzando in tempo reale differenti parametri come occupazione, temperatura, umidità, si può agire sulla potenza del sistema di emissione per garantire le condizioni ambientali corrette ma con una gestione che punti anche all'ottimizzazione dell'intero sistema. Una regolazione automatica e modulante può infatti risultare più efficiente se ben progettata migliorando il comfort termico e riducendo i consumi e i costi. Il sistema permette inoltre l'implementazione di logiche come la programmazione oraria, una regolazione differenziata in base a diverse zone e ambienti dell'edificio garantendo maggiore efficienza e sostenibilità.

### Sottosistema di emissione

Il sistema di emissione è la parte terminale dell'impianto e permette lo scambio termico tra il fluido termovettore e l'aria dell'ambiente, trasferendo calore in inverno o sottraendolo nel periodo estivo. Esistono diverse tecnologie che si distinguono in base al tipo di fluido utilizzato e al meccanismo di scambio termico. Vi sono sistemi ad acqua, ad aria ed elettrici, sistemi che sfruttano maggiormente la convezione, altri in cui lo scambio avviene principalmente per irraggiamento, sistemi ad alta

temperatura e impianti a bassa temperatura. Ciascun sistema presenta aspetti positivi e negativi relativi all'efficienza di emissione, il controllo della temperatura e umidità nell'aria, il ricircolo di polveri e contaminanti ed altri numerosi aspetti. I terminali più diffusi sono i radiatori, i ventilconvettori, i pannelli radianti e le bocchette di ventilazione. Un fattore da considerare nella progettazione dell'impianto riguarda l'abbinamento con il generatore in quanto alcuni terminali sono maggiormente indicati con determinati sistemi di produzione di energia. Un esempio sono i radiatori che non sono particolarmente consigliati in coppia con la pompa di calore, la quale opera con una maggiore resa a temperature inferiori e dunque potrebbe subire un calo di efficienza e prestazioni.

Allo stato attuale nell'edificio 4A sono presenti i ventilconvettori in quasi tutto il fabbricato mentre i radiatori sono situati solo in alcuni locali. In generale, i terminali installati sono abbastanza datati e ormai poco efficienti, alcuni di questi presentano parti mancanti e altri sono collocati in posizioni non più ottimali. La sostituzione è dunque necessaria oltre ad un ripensamento della loro collocazione in maniera da distribuire il calore in modo ottimale e con maggiore efficienza.

I radiatori sono sistemi alimentati con acqua ad alta temperatura e trasmettono calore all'ambiente tramite la convezione e l'irraggiamento. I principali vantaggi di questo sistema sono:

- Costo contenuto.
- Semplicità di installazione.
- Il funzionamento è silenzioso.
- La manutenzione è più facile.
- La durata della vita è molto estesa.

Tuttavia, presentano alcune criticità:

- Richiedono una temperatura di mandata del fluido termovettore più elevata rispetto ai ventilconvettori; ciò comporta maggiori dispersioni lungo il condotto di distribuzione oltre a maggiori consumi nella generazione.
- La temperatura all'interno degli ambienti risulta poco uniforme in quanto il calore tende a salire verso l'alto creando una stratificazione del calore.
- Il comfort termico è difficile da raggiungere in quanto in prossimità del terminale il calore è elevato mentre nei punti più distanti la potenza scaldante è minore.
- Possono funzionare solo in modalità riscaldamento.
- La pulizia risulta più complessa e questo aspetto può incidere sull'efficienza di emissione.
- A causa dei moti convettivi generati, favoriscono la circolazione di polveri e altre sostanze inquinanti nell'aria.
- Non vi è la possibilità di controllare l'umidità e questi sistemi tendono a rendere l'aria dell'ambiente secca.
- Creano dei vincoli per il posizionamento dell'arredamento a causa del loro funzionamento e ingombro.

I ventilconvettori sono invece sistemi che lavorano con acqua a bassa temperatura e funzionano tramite la convezione forzata dell'aria dell'ambiente attraverso uno scambiatore in cui si ha la trasmissione del calore. I principali vantaggi di questo sistema sono:

- La temperatura di mandata è inferiore rispetto ai radiatori con un maggior risparmio in termini di consumi e con minori dispersioni.
- Possono funzionare sia in modalità riscaldamento sia per il raffrescamento.

- Possono regolare l'umidità dell'ambiente durante il funzionamento estivo tramite la deumidificazione.
- La regolazione può avvenire anche tramite il controllo della velocità della ventola e quindi rende il controllo più semplice.
- La temperatura all'interno dell'ambiente risulta più omogenea e dunque il comfort termico è maggiore.
- Bassa inerzia del sistema.
- Maggiore velocità nel riscaldare e nel raffrescare gli spazi rispetto ad altri sistemi.
- Sono dotati di filtri attraverso cui l'aria viene purificata da polveri e altre particelle.
- Esistono diverse tipologie di ventilconvettore che rendono più versatile l'installazione (a parete, a soffitto, a pavimento), ottimizzando l'utilizzo degli spazi e riducendone quindi l'ingombro.

Gli aspetti negativi sono i seguenti:

- Possono seccare l'aria durante il funzionamento invernale.
- A potenze elevate sono più rumorosi in quanto dotati di una ventola per la convezione forzata.
- La manutenzione è fondamentale in quanto i filtri devono essere puliti e sostituiti spesso; una scarsa pulizia può creare un ambiente insalubre.
- La movimentazione dell'aria è maggiore e ciò comporta lo spostamento di polveri e altre particelle oltre ad un certo discomfort nei pressi del terminale.
- Costi di installazione più elevati.
- Il liquido condensa deve essere raccolto e smaltito.

Un'ulteriore soluzione per il sistema di emissione sono i pannelli radianti a pavimento, a parete o a soffitto che trasmettono calore tramite irraggiamento. I grandi vantaggi di questo impianto sono:

- Migliore distribuzione del calore negli ambienti con una temperatura più omogenea rispetto agli altri sistemi.
- Risparmio sui consumi in quanto la temperatura di mandata del fluido termovettore è più bassa.
- Non crea ingombri e può essere installato in pavimenti, soffitti, pareti, rendendolo più flessibile.

La loro installazione, tuttavia, risulta più complessa in un fabbricato già esistente e considerando l'idea di mantenere operativo l'edificio durante i lavori di efficientamento, questa soluzione non rientra tra le migliori opzioni. La soluzione ottimale risulta la sostituzione di tutti i terminali presenti nell'edificio con ventilconvettori più performanti e che possano consentire un maggior controllo e regolazione della temperatura.

La Figura 61 riporta il particolare dell'allaccio del ventilconvettore al montante verticale della distribuzione, con una rappresentazione dei collegamenti idrici ed elettrici.

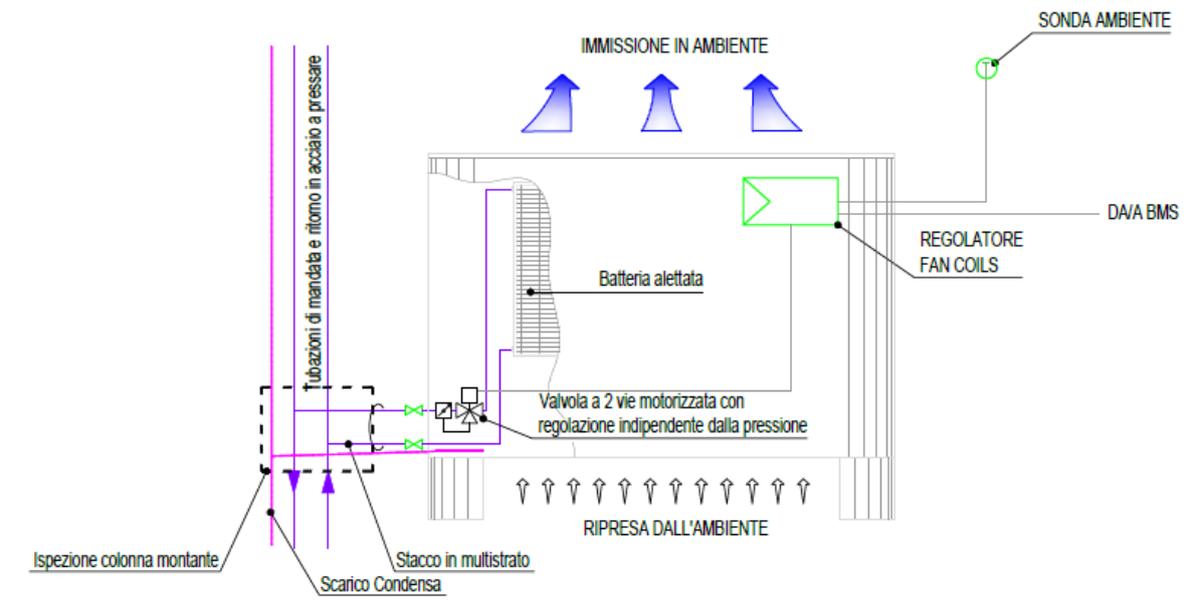


Figura 61 – Particolare estratto dalla tavola di progetto relativa agli allacci del ventilconvettore a mobiletto [5]

L'estratto in Figura 62 mostra il posizionamento dei nuovi ventilconvettori a pavimento e a soffitto con i relativi allacci nel primo piano dell'edificio.

#### FABBRICATO 4A - Piano Primo

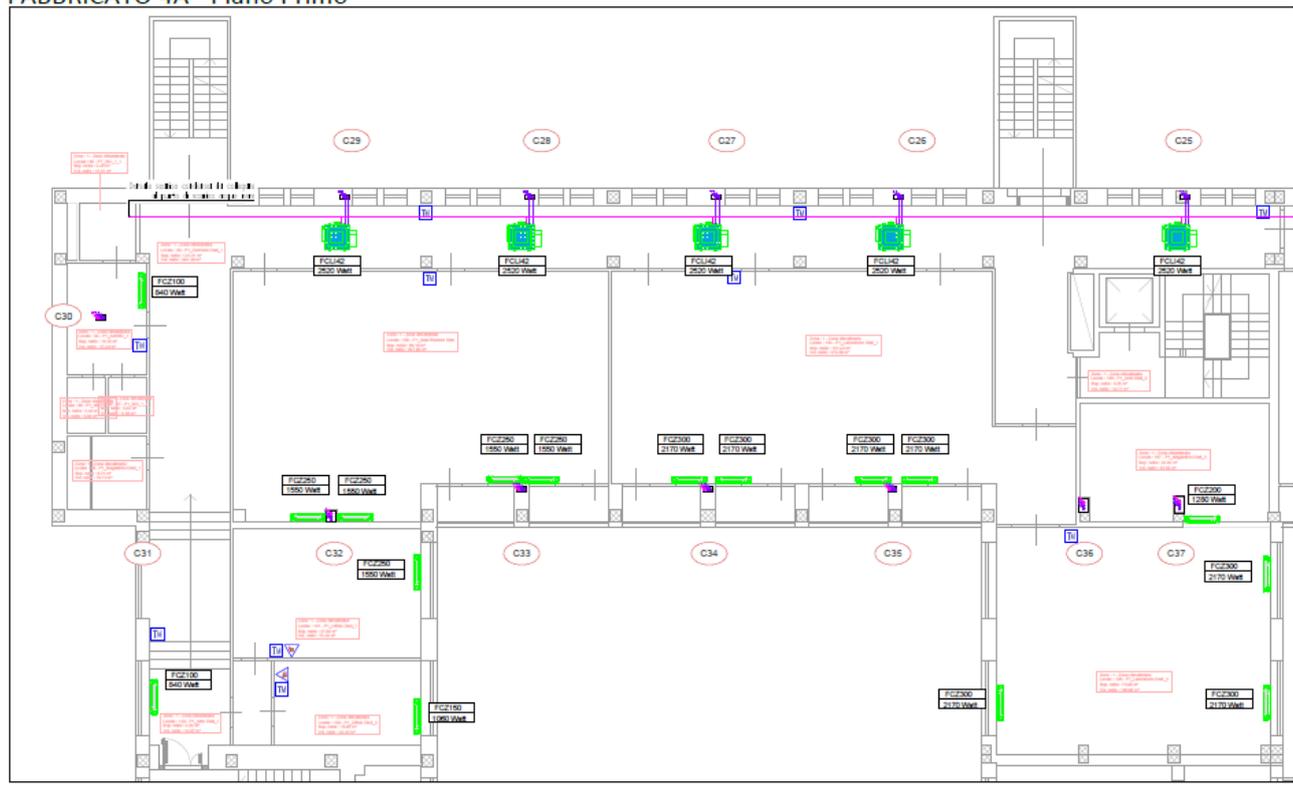


Figura 62 – Particolare estratto dalla tavola di progetto relativa al collocamento dei nuovi ventilconvettori a pavimento e a soffitto [5]

## Building Management System (BMS)

Un aspetto che può massimizzare i benefici della riqualificazione energetica degli impianti è l'introduzione di sistemi avanzati che gestiscano e controllino l'intero sistema da una posizione in cui siano in grado di osservare tutto ciò che avviene all'interno dell'edificio. L'efficientamento energetico dei singoli componenti dell'impianto rappresenta un buon punto di partenza ma se si introduce anche un monitoraggio e una regolazione intelligente dei parametri di funzionamento si può trasformare un edificio, anche efficiente ma tradizionale, in un edificio smart. Con questo concetto si vuole intendere un edificio capace di gestire in maniera intelligente tutti i suoi servizi, dalla climatizzazione all'illuminazione, dalla sicurezza alla gestione energetica, garantendo il miglior comfort e riducendo i consumi. Tutto questo è possibile grazie all'integrazione di sistemi intelligenti centralizzati.

Il Building Management System (BMS) è un sistema di controllo centralizzato e automatizzato che se integrato in un edificio può gestire e monitorare i diversi impianti presenti, al fine di ottimizzare l'efficienza energetica, migliorare il comfort degli occupanti, garantire la sicurezza e ridurre i costi operativi e di manutenzione. Il sistema può intervenire sugli impianti di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, sui sistemi di sicurezza, sull'impianto antincendio e altri ancora.

Il BMS impiega numerosi sensori distribuiti in tutto l'edificio che raccolgono e inviano dati in tempo reale al centro di controllo, rendendo possibile il continuo monitoraggio di parametri come la temperatura, l'umidità, la qualità dell'aria, l'occupazione dei locali ma anche di allarmi e stato di funzionamento dei componenti. Tutti i dati vengono quindi raccolti e analizzati da hardware e software che hanno il compito di prendere decisioni in maniera autonoma e intervenire, se necessario, tramite attuatori per risolvere un determinato problema, per ripristinare le condizioni ottimali in un certo ambiente o per altri motivi. Il grande vantaggio di un sistema BMS è l'abilità di supervisionare l'intero edificio, avendo il controllo di numerosi parametri, con la possibilità di intervenire in maniera mirata senza la sovrapposizione e l'interferenza di più impianti. Ad esempio, può agire sul sistema di riscaldamento in singole aree dell'edificio se la temperatura si abbassa oltre una soglia preimpostata, sulla ventilazione se la qualità dell'aria in un locale non soddisfa i requisiti, sull'illuminazione disattivandola laddove rileva la non presenza di occupanti. Questo sistema permette quindi di ottimizzare l'uso degli impianti e dell'energia in base alle reali esigenze dei locali e degli occupanti grazie al controllo centralizzato.

Nell'ottica di efficientamento energetico, di ottimizzazione e di sostenibilità questo tipo di tecnologia ricopre dunque un ruolo chiave perché permette la riduzione dei consumi energetici degli impianti, ne incrementa l'efficienza, riduce i costi e ottimizza la manutenzione essendo in grado di monitorare lo stato degli impianti e prevedere guasti o malfunzionamenti. I benefici sono anche per chi occupa i locali in quanto, essendo gli spazi continuamente monitorati, può godere in ogni momento di condizioni ottimali di temperatura, umidità, qualità dell'aria con ricadute positive sul lavoro o sulle diverse attività svolte.

I componenti principali di un sistema BMS sono:

- **Sensori** → sono usati per misurare i parametri di interesse come temperatura, umidità, occupazione, qualità dell'aria. I dati vengono poi trasmessi al centro di controllo che elabora le informazioni e prende decisioni.
- **Controllori** → il loro compito è di mettere in atto le modifiche decise dal centro di controllo, aggiustando ad esempio la velocità di immissione dell'aria o la potenza riscaldante.
- **Sistema di interfaccia** → l'interfaccia grafica è fondamentale per permettere al personale di interfacciarsi con il sistema, ricevendo così le informazioni riguardo lo stato dell'edificio e con la possibilità di intervenire con azioni manuali.
- **Rete di comunicazione** → la rete sui cui vengono trasmesse le informazioni dai sensori al centro di controllo e da questo ai controllori. La comunicazione può avvenire via cavo o wireless adottando diversi protocolli.

Il sistema BMS utilizzato dal Politecnico di Torino per l'automazione e l'ottimizzazione del funzionamento degli impianti su tutti i livelli è il sistema Desigo della Siemens. Questo si compone di numerosi dispositivi connessi tra di loro per il totale controllo dell'edificio.

### Desigo building automation system

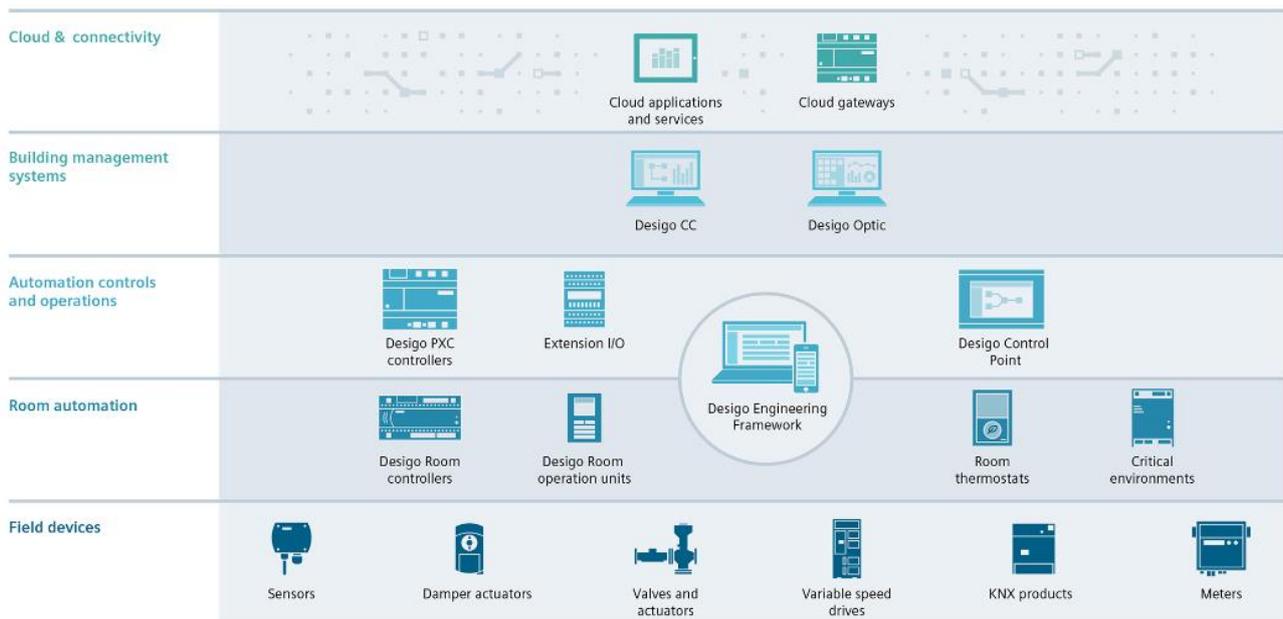


Figura 63 – Architettura del sistema BMS Desigo di Siemens

L'architettura del sistema BMS si articola su tre livelli principali, ciascuno con dei ruoli fondamentali per il corretto funzionamento:

- **Field level** → è il livello più basso dell'architettura e include tutti i componenti situati direttamente sul campo. Questi permettono l'interazione diretta tra il sistema e l'edificio, raccogliendo i dati relativi ai parametri ambientali ed eseguendo i comandi ricevuti dai livelli superiori. Tra i dispositivi appartenenti a questo livello si trovano i sensori, gli attuatori e le valvole.
- **Automation level** → è il livello intermedio e permette la comunicazione tra le altre due sezioni. Qui i dati provenienti dal campo vengono raccolti, elaborati e trasmessi al livello superiore per prendere decisioni al fine di ottimizzare il funzionamento degli impianti.

Vengono inoltre rilevate eventuali anomalie e guasti, inviando notifiche e allarmi di malfunzionamento.

- Management level → è il livello più alto in tutta la struttura e rappresenta il cervello dell'intero sistema BMS. È responsabile di supervisionare, monitorare e ottimizzare l'intero sistema di automazione dell'edificio. Attraverso un'interfaccia dedicata, gli operatori possono controllare il funzionamento e lo stato di tutti i sottosistemi connessi. I dati raccolti vengono analizzati per monitorare l'efficienza e le prestazioni energetiche degli impianti, segnalando guasti e anomalie e permettendo l'intervento tempestivo degli operatori. Infine, è in grado di impostare logiche di funzionamento per ridurre i consumi garantendo il massimo comfort negli ambienti.

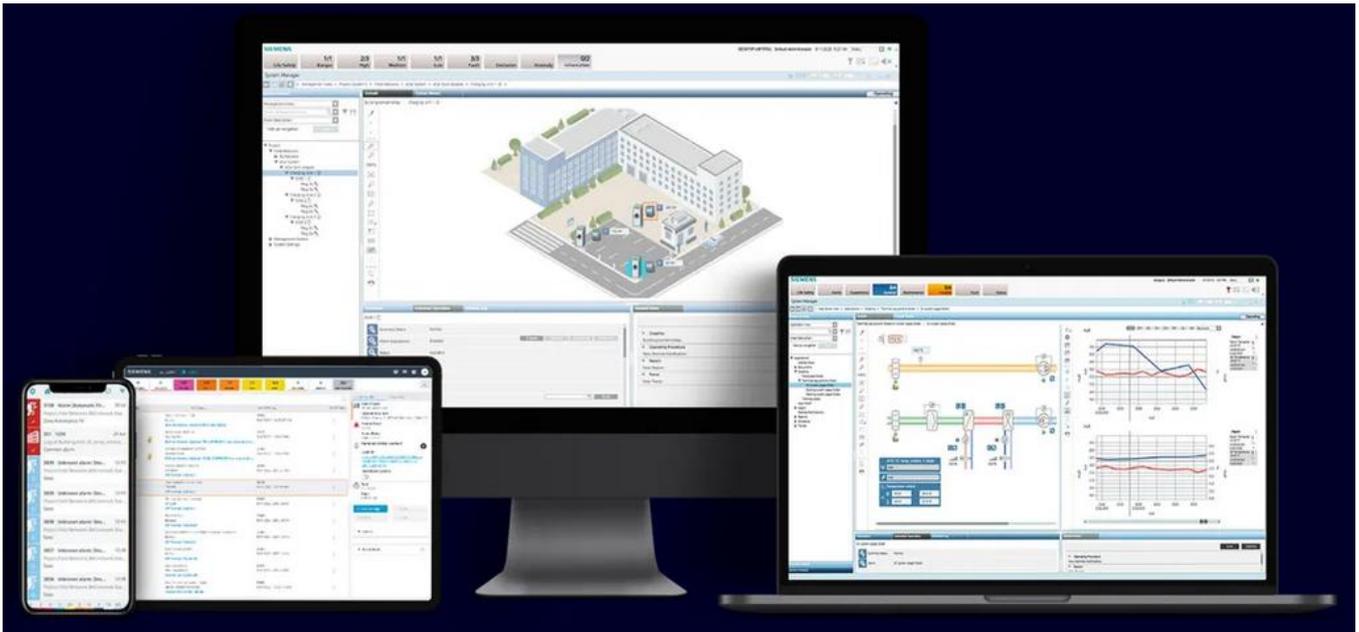


Figura 64 – Software di interfaccia del sistema Design (Siemens)

L'intero sistema può essere integrato con tecnologie cloud e soluzioni di connettività avanzate permettendo così il controllo dell'edificio e dei suoi impianti in tempo reale da remoto, utilizzando un qualsiasi dispositivo mobile o web. In questo modo anche la risposta a qualsiasi malfunzionamento è più rapida.

### Temperatura di set point nei locali

La riqualificazione energetica degli impianti consente di ridurre i consumi e le emissioni grazie a sistemi altamente efficienti. Tuttavia, un aspetto altrettanto cruciale è il comportamento degli occupanti, in quanto anche il sistema più avanzato può risultare poco efficace se abbinato a un utilizzo poco consapevole dell'energia. Su questo ambito si inserisce il lavoro del Green Team del Politecnico di Torino che si impegna non solo ad incrementare la sostenibilità nelle attività dell'Ateneo, ma anche a sensibilizzare e formare le persone, contribuendo così allo sviluppo di una società più consapevole e attenta alla riduzione dell'impatto ambientale.

Nel caso degli impianti di climatizzazione uno degli aspetti più rilevanti è la temperatura impostata all'interno dei locali durante la stagione del riscaldamento e del raffrescamento. Questo parametro incide particolarmente sui consumi energetici e anche solo un grado di differenza potrebbe consentire

un grande risparmio, soprattutto in edifici di grandi dimensioni. Allo stesso tempo, la temperatura è strettamente legata al comfort termico degli occupanti e, nel caso di uffici, questa può influenzare in maniera positiva o negativa la salute, il benessere e la produttività dei lavoratori.

Attualmente in Italia la normativa che definisce le temperature da mantenere negli uffici pubblici è il Decreto del Presidente della Repubblica del 16 aprile 2013 (D.P.R. 74/2013) che riporta il regolamento in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici. L'articolo 3, in particolare, definisce che la temperatura dell'aria deve:

- Non superare i 20 °C durante la climatizzazione invernale, con una tolleranza di + 2 °C, quindi per un massimo di 22 °C.
- Non essere inferiore a 26 °C durante la climatizzazione estiva, con una tolleranza di – 2 °C, quindi per un minimo di 24 °C.

Inoltre, stabilisce che il mantenimento di tali temperature deve avvenire con accorgimenti che non comportino lo spreco di energia. Queste disposizioni hanno come obiettivo la promozione dell'efficienza energetica e il comfort termico dei lavoratori.

Il Decreto-legge 34/2022, noto anche come Decreto Bollette, è stato introdotto il 27 aprile 2022 come risposta alla crisi energetica globale scaturita in seguito alle tensioni geopolitiche con la Russia. La novità principale riguardava la modifica dei limiti di temperatura per gli edifici pubblici per il periodo dal 1° maggio 2022 fino al 31 marzo 2023 al fine di ridurre i consumi termici degli edifici e di ottenere un risparmio. I nuovi limiti stabilivano una temperatura massima di 19 °C in inverno e minima di 27 °C in estate, entrambi mantenendo la tolleranza dei 2 °C. Attualmente questa legge non è più in vigore e pertanto valgono nuovamente i limiti imposti dal precedente Decreto.

Il Politecnico di Torino ha mantenuto i limiti di temperatura del Decreto-legge 34/2022 anche per la stagione invernale 2023/2024 e per la stagione estiva 2024 come impegno per l'emergenza climatica ed energetica. L'obiettivo di tale decisione, affiancata da altre iniziative di contenimento dei consumi, è quello di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> e limitare le spese energetiche di Ateneo visto il periodo di instabilità internazionale e sui prezzi dell'energia.

La temperatura negli uffici e in generale sui luoghi di lavoro, come detto in precedenza, è un aspetto molto importante tanto da essere inserito tra le norme sulla sicurezza del lavoro. L'OMS, Organizzazione Mondiale della Sanità, indica che la temperatura da garantire per un lavoro da ufficio, in cui si trascorre molto tempo seduti, dovrebbe rientrare in un intervallo tra i 18 e i 24 °C in periodo invernale. L'INAIL, Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro, restringe invece il range tra i 18 e i 22 °C. Entrambi definiscono come temperatura ideale i 19-20 °C. In estate invece la raccomandazione è di mantenere una differenza tra temperatura interna ed esterna di massimo 7 °C.

Nel prossimo capitolo sarà riportata un'indagine per evidenziare quanto la variazione della temperatura impostata nei locali dell'edificio possa impattare sui consumi e sulle emissioni del riscaldamento e del raffrescamento.

## 9. Analisi energetica degli interventi di efficientamento energetico

### Introduzione

Nel capitolo precedente sono state presentate le possibili soluzioni per l'efficientamento energetico degli impianti di climatizzazione attraverso un'analisi dei singoli sottosistemi, descrivendo gli aspetti più positivi e negativi. Per comprendere meglio gli effettivi miglioramenti in termini di consumo energetico è necessario eseguire delle simulazioni che tengono in considerazione anche la struttura e il comportamento dell'edificio. Questo studio è stato quindi eseguito utilizzando il software EC700 di Edilclima e utilizzando il modello dell'edificio 4A realizzato e spiegato in precedenza. In questo nuovo capitolo vengono riportati i risultati di alcuni tipi di intervento per confrontarli e identificare la miglior soluzione di efficientamento energetico dell'impianto esistente.

La prima analisi in particolare si è focalizzata sul sistema di emissione, svolgendo un confronto tra lo stato attuale e l'intervento di sostituzione dei terminali. Successivamente, considerando i nuovi terminali installati, l'indagine si è spostata sul sistema di regolazione per comparare i diversi metodi di controllo disponibili e stabilire quale sia il migliore per l'edificio analizzato.

Per quanto riguarda il sistema di distribuzione l'unico intervento possibile, dato lo stato della rete, include la sostituzione di tutti i condotti e l'installazione del nuovo isolamento termico per la riduzione delle dispersioni energetiche seguendo quanto stabilito dal DPR 412/93. Questo intervento è stato considerato come eseguito in tutte le analisi svolte, essendo obbligatorio per legge. Tuttavia, per sottolineare l'importanza del corretto isolamento dei condotti di distribuzione, è stata svolta un'indagine per evidenziare come variano le prestazioni dell'intero impianto con diverse condizioni di isolamento.

Per il sistema di generazione invece non è stato ritenuto necessario alcun tipo di intervento. Attualmente il fabbisogno energetico dell'edificio per il riscaldamento è soddisfatto tramite l'allaccio alla rete cittadina del teleriscaldamento mentre per il raffrescamento è presente un gruppo frigorifero. Si è optato per non intervenire su questo sottosistema in quanto il teleriscaldamento rappresenta già una scelta sostenibile ed efficiente mentre il gruppo frigorifero del raffrescamento è di recente installazione e presenta elevate efficienze e prestazioni.

## Dati analizzati

Viene proposto in Tabella 25 un elenco dei parametri analizzati per il confronto degli interventi.

Tabella 25 – Parametri analizzati nell’analisi energetica degli interventi

Parametro	Unità di misura	Descrizione
$E_{P,nren}$	kWh	Fabbisogno di energia primaria non rinnovabile
$E_{P,ren}$	kWh	Fabbisogno di energia primaria rinnovabile
$E_{P,tot}$	kWh	Fabbisogno di energia primaria totale
$EP_{nren}$	kWh/m <sup>2</sup>	Indice di prestazione energetica non rinnovabile
$EP_{ren}$	kWh/m <sup>2</sup>	Indice di prestazione energetica rinnovabile
$EP_{tot}$	kWh/m <sup>2</sup>	Indice di prestazione energetica totale
Consumo dei vettori energetici	kWh	Consumo di energia del teleriscaldamento e di energia elettrica
Emissioni di CO <sub>2</sub> dei vettori energetici	kg	Emissioni prodotte in seguito al consumo di energia del teleriscaldamento e di energia elettrica

Con il termine “energia primaria” si intende l’energia che non è stata soggetta ad alcun processo di conversione o di trasformazione. Nel caso degli impianti di climatizzazione dell’aria viene calcolata seguendo un ordine preciso:

1. Calcolo del fabbisogno energetico degli ambienti dell’edificio;
2. Calcolo dell’efficienza degli impianti in modo da determinare la quantità di energia da fornire all’impianto sottoforma di vettore energetico per soddisfare il fabbisogno energetico calcolato al punto 1;
3. Conversione dell’energia da fornire agli impianti in energia primaria.

L’ultimo punto considera sia l’energia in ingresso al sistema di generazione, sia l’energia elettrica per gli assorbimenti dei sistemi ausiliari, come pompe e ventilatori. Entrambi i fabbisogni vengono moltiplicati per il fattore di conversione, ovvero un coefficiente per la conversione dei vettori energetici in energia primaria. Questo si compone di una quota rinnovabile e una non rinnovabile ed è stabilito tenendo in considerazione diversi aspetti, tra cui il mix energetico nazionale, l’efficienza della produzione del vettore energetico, il contributo delle fonti rinnovabili. I fattori di conversione dei vettori energetici sono stati definiti nel Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 nell’Allegato 1 e vengono aggiornati sulla base dei dati forniti dal GSE.

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

Nella Tabella 26 sono riportati i fattori di conversione utilizzati per il teleriscaldamento, il cui dato è fornito da IREN per la città metropolitana di Torino, e per l’energia elettrica prelevata dalla rete, il cui dato è stato preso dal decreto.

Tabella 26 – Fattori di conversione in energia primaria [17]

Vettore Energetico	Teleriscaldamento	Energia elettrica prelevata dalla rete	Energia elettrica prodotta dal fotovoltaico
$f_{p,nren}$	0,858	1,950	0
$f_{p,ren}$	0	0,470	1
$f_{p,tot}$	0,858	2,420	1

## Interventi sugli impianti

### Analisi sottosistema di emissione

Allo stato di fatto nell'edificio sono installati alcuni radiatori, solamente in pochi locali, e i ventilconvettori, presenti nella maggior parte degli ambienti dell'edificio. Tutti i terminali sono datati e ormai poco efficienti e alcuni di questi sono collocati in posizioni non più ottimali.

La miglior scelta di intervento risulta l'installazione di nuovi ventilconvettori più performanti di quelli presenti, andando anche a sostituire i radiatori. I nuovi terminali permettono una maggiore regolazione e controllo delle condizioni ambientali dell'edificio e necessitano di un minor assorbimento di energia elettrica per il funzionamento.

I pannelli radianti a pavimento non sono stati considerati in quanto la loro installazione sarebbe decisamente invasiva e, considerando che l'obiettivo è di ridurre i tempi di intervento e di mantenere laddove possibile operativo il fabbricato, non risulta la soluzione adatta al caso studio.

Il confronto tra stato di fatto e intervento di sostituzione dei terminali è stato svolto sia per il riscaldamento e sia per il raffrescamento, considerando in entrambi i casi una regolazione manuale. I ventilconvettori scelti per l'intervento sono i seguenti:

Tabella 27 – Elenco dei ventilconvettori a pavimento necessari per l'intervento di sostituzione dei terminali

<u>Ventilconvettori per installazione a pavimento</u> Marchio: AERMEC		
Modello	Numero terminali da installare	
FCZ100	63	
FCZ200	79	
FCZ250	41	
FCZ300	44	
FCZ400	46	

Figura 65 – Ventilconvettore a pavimento AERMEC [11]

Tabella 28 – Elenco dei ventilconvettori a soffitto necessari per l'intervento di sostituzione dei terminali

Ventilconvettori per installazione a soffitto Marchio: AERMEC	
Modello	Numero terminali da installare
FCL32	30
FCL42	10



Figura 66 - Ventilconvettore a soffitto AERMEC [12]

### DATI PRESTAZIONALI

2 tubi

	FCZ100			FCZ150			FCZ200			FCZ250			FCZ300			FCZ350			FCZ400			FCZ450			FCZ500			FCZ550								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Prestazioni in riscaldamento 70 °C / 60 °C (1)																																				
Potenza termica	kW			1,45	2,00	2,40	1,55	2,19	2,65	2,02	2,95	3,70	2,20	3,18	4,05	3,47	4,46	5,50	3,77	4,92	6,15	4,32	5,74	7,15	4,57	6,29	7,82	5,27	7,31	8,50	5,82	8,34	9,75			
Portata acqua utenza	l/h			125	172	206	136	192	232	177	258	324	193	278	355	304	391	482	330	431	539	379	503	627	400	551	685	462	641	745	510	731	855			
Perdita di carico lato utenza	kPa			4	7	9	5	9	12	6	12	18	7	15	23	7	12	18	8	14	20	9	16	24	6	11	16	12	21	28	10	20	26			
Prestazioni in riscaldamento 45 °C / 40 °C (2)																																				
Potenza termica	kW			0,72	0,99	1,19	0,77	1,09	1,31	1,00	1,46	1,84	1,09	1,58	2,01	1,72	2,21	2,73	1,87	2,44	3,06	2,14	2,85	3,55	2,27	3,12	3,88	2,62	3,63	4,22	2,89	4,14	4,85			
Portata acqua utenza	l/h			126	173	207	134	189	229	174	254	319	190	274	350	299	385	475	325	425	531	373	495	617	394	543	675	455	631	734	502	720	842			
Perdita di carico lato utenza	kPa			4	7	10	5	9	12	6	12	18	8	15	22	8	12	18	8	14	20	10	16	24	6	11	16	12	21	28	10	20	26			
Prestazioni in raffreddamento 7 °C / 12 °C																																				
Potenza frigorifera	kW			0,65	0,84	1,00	0,80	1,06	1,27	0,89	1,28	1,60	1,06	1,55	1,94	1,68	2,17	2,65	1,89	2,46	3,02	2,20	2,92	3,60	2,41	3,21	4,03	2,68	3,69	4,25	2,91	4,13	4,79			
Potenza frigorifera sensibile	kW			0,51	0,69	0,83	0,57	0,80	0,97	0,71	1,05	1,33	0,79	1,20	1,52	1,26	1,65	2,04	1,33	1,76	2,18	1,59	2,14	2,67	1,69	2,30	2,90	1,94	2,73	3,18	2,07	2,98	3,49			
Portata acqua utenza	l/h			112	144	172	138	182	219	153	221	275	182	267	334	288	374	456	350	460	560	379	503	619	414	552	694	460	634	731	501	711	824			
Perdita di carico lato utenza	kPa			4	6	8	6	12	13	6	12	18	8	17	25	8	13	18	11	18	25	10	16	24	9	15	22	13	22	29	12	22	28			
Ventilatore																																				
Tipo	tipo																																			
Motore ventilatore	tipo																																			
Numero	1			1			1			1			2			2			2			2			2			2								
Portata aria	m <sup>3</sup> /h			110	160	200	110	160	200	140	220	290	140	220	290	260	350	450	260	350	450	330	460	600	330	460	600	400	600	720	400	600	720			
Potenza assorbita	W			19	29	35	19	29	35	25	29	33	25	29	33	25	33	44	25	33	44	30	43	57	30	43	57	38	52	76	38	52	76			
Collegamenti elettrici	V1 V2 V3			V1 V2 V3																																
Dati sonori ventilconvettori (3)																																				
Livello di potenza sonora	dB(A)			31,0	38,0	45,0	31,0	38,0	45,0	35,0	46,0	51,0	35,0	46,0	51,0	34,0	41,0	48,0	34,0	41,0	48,0	37,0	44,0	51,0	37,0	44,0	51,0	42,0	51,0	56,0	42,0	51,0	56,0			
Livello di pressione sonora	dB(A)			23,0	30,0	37,0	23,0	30,0	37,0	27,0	38,0	43,0	27,0	38,0	43,0	26,0	33,0	40,0	26,0	33,0	40,0	29,0	36,0	43,0	29,0	36,0	43,0	34,0	43,0	48,0	34,0	43,0	48,0			
Diametro raccordi																																				
Scambiatore principale	Ø			1/2"	1/2"			1/2"			1/2"			3/4"			3/4"			3/4"			3/4"			3/4"			3/4"							
Alimentazione																																				
Alimentazione	230V-50Hz																																			

Figura 67 – Dati prestazionali dei ventilconvettori a pavimento AERMEC [11]

## DATI PRESTAZIONALI

2 tubi

		FCL32			FCL36			FCL42			FCL62			FCL72			FCL82			FCL102			FCL122		
		1	2	3	1	2	3	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4
		L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
<b>Prestazioni in riscaldamento 70 °C / 60 °C (1)</b>																									
Potenza termica	kW	2,22	2,95	4,00	3,42	4,50	6,27	3,32	4,47	7,34	5,19	6,37	10,49	6,14	7,57	11,32	5,88	8,12	11,88	8,30	11,71	17,73	10,53	14,73	21,75
Portata acqua utenza	l/h	194	258	350	300	394	549	290	391	642	454	558	918	538	662	991	514	710	1039	726	1025	1551	921	1289	1903
Perdita di carico lato utenza	kPa	4	6	10	6	10	19	6	10	24	12	17	42	14	20	42	7	13	26	6	12	25	11	21	42
<b>Prestazioni in riscaldamento 45 °C / 40 °C (2)</b>																									
Potenza termica	kW	1,10	1,47	1,98	1,70	2,24	3,12	1,65	2,22	3,64	2,58	3,17	5,21	3,50	3,76	5,63	2,92	4,03	5,90	4,12	5,82	8,81	5,23	7,32	10,80
Portata acqua utenza	l/h	192	254	345	295	389	541	287	386	633	448	550	905	530	654	977	507	701	1025	716	1011	1530	909	1271	1877
Perdita di carico lato utenza	kPa	4	6	11	6	9	17	5	9	23	10	15	36	13	19	40	7	12	23	4	7	15	10	17	35
<b>Prestazioni in raffreddamento 7 °C / 12 °C</b>																									
Potenza frigorifera	kW	1,14	1,44	1,86	1,77	2,22	2,96	1,94	2,51	3,88	2,63	3,17	4,90	2,75	3,29	5,35	2,76	3,97	5,85	4,00	5,82	8,85	5,31	7,40	10,83
Potenza frigorifera sensibile	kW	0,97	1,22	1,48	1,37	1,75	2,36	1,36	1,79	3,09	1,83	2,23	3,73	1,84	2,29	3,99	1,86	2,69	4,05	2,89	4,22	6,51	3,99	5,63	8,30
Portata acqua utenza	l/h	200	253	327	308	387	516	337	437	679	458	551	856	484	571	938	482	695	1032	697	1012	1547	921	1292	1893
Perdita di carico lato utenza	kPa	4	7	10	6	9	15	7	11	25	12	16	36	13	18	43	7	14	28	7	13	28	10	19	38
<b>Ventilatore</b>																									
Tipo	tipo	Centrifugo			Centrifugo			Centrifugo			Centrifugo			Centrifugo			Centrifugo			Centrifugo			Centrifugo		
Motore ventilatore	tipo	Asincrono			Asincrono			Asincrono			Asincrono			Asincrono			Asincrono			Asincrono			Asincrono		
Numero	n°	1			1			1			1			1			1			1			1		
Portata aria	m <sup>3</sup> /h	300	410	600	300	410	600	260	360	700	380	500	880	400	520	900	460	680	1100	560	830	1350	750	1100	1750
Livello di potenza sonora (3)	dB(A)	35,0	38,0	46,0	35,0	38,0	46,0	35,0	38,0	53,0	41,0	47,0	61,0	44,0	49,0	60,0	39,0	43,0	50,0	40,0	45,0	54,0	44,0	50,0	60,0
Potenza assorbita	W	21	31	45	21	31	45	-	32	75	26	37	83	50	58	110	45	80	150	50	80	155	55	105	175
<b>Diametro raccordi</b>																									
Tipo	tipo	Gas - F			Gas - F			Gas - F			Gas - F			Gas - F											
Scambiatore principale	Ø	3/4"			3/4"			3/4"			3/4"			3/4"			3/4"			3/4"			3/4"		
<b>Scambiatore di calore a pacco alettato</b>																									
Contenuto acqua scambiatore principale	l	0,6			0,8			0,8			1,3			1,3			2,6			4,0			4,0		
<b>Alimentazione</b>																									
Alimentazione		230V~50Hz			230V~50Hz			230V~50Hz			230V~50Hz			230V~50Hz			230V~50Hz			230V~50Hz			230V~50Hz		

(1) Aria ambiente 20 °C b.s.; Acqua (in/out) 70 °C/60 °C

(2) Aria ambiente 20 °C b.s.; Acqua (in/out) 45 °C/40 °C; EUROVENT

(3) Aermec determina il valore della potenza sonora sulla base di misure effettuate in accordo con la normativa UNI EN 16583:15, nel rispetto della certificazione Eurovent.

Figura 68 - Dati prestazionali dei ventilconvettori a soffitto AERMEC [12]

Per il calcolo del fabbisogno di energia primaria, il software si basa sulla specifica tecnica UNI TS 11300-2:2019 per il riscaldamento e sulla UNI TS 11300-3:2010 per il raffreddamento. Il rendimento dei sistemi di emissione è definito da tali specifiche in base alla tipologia, all'altezza dei locali e al carico termico medio annuo. I valori sono mostrati nelle Figure 69, 70 e 71.

Tipologia di terminale	Carico termico medio annuo <sup>a)</sup> [W/m <sup>3</sup> ]		
	<= 4	4-10	>10
Radiatori su parete esterna isolata <sup>b)</sup>	0,98	0,97	0,95
Radiatori su parete interna	0,96	0,95	0,92
Ventilconvettori <sup>c)</sup> (valori riferiti a $t_{media}$ acqua = 45 °C)	0,96	0,95	0,94

Figura 69 – Estratto della UNI TS 11300-2:2019 relativo ai rendimenti di emissione dei terminali installati in locali con altezza fino a 4 m per il riscaldamento

Descrizione	Carico termico (W/m <sup>3</sup> )								
	<4			4 - 10			>10		
	Altezza del locale								
	6	10	14	6	10	14	6	10	14
Radiatori su parete esterna isolata <sup>1)</sup>	0,96	0,94	0,92	0,95	0,93	0,91	0,93	0,91	0,89
Radiatori su parete interna	0,94	0,92	0,90	0,93	0,91	0,89	0,90	0,88	0,86
Ventilconvettori <sup>2)</sup> (valori riferiti a temperatura media acqua = 45 °C)	0,94	0,92	0,90	0,93	0,91	0,89	0,92	0,90	0,88

Figura 70 - Estratto della UNI TS 11300-2:2019 relativo ai rendimenti di emissione dei terminali installati in locali con altezza oltre a 4 m per il riscaldamento

Terminale di erogazione	Rendimento di emissione
Ventilconvettori idronici	0,98

Figura 71 – Estratto della UNI TS 11300-3:2010 relativo ai rendimenti di emissione dei terminali per il raffrescamento

- Risultati per il riscaldamento

Tabella 29 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento

Analisi del fabbisogno energetico - Riscaldamento						
	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	490.339	5.916	496.255	50,21	0,61	50,82
Sostituzione terminali	483.284	4.215	487.499	49,49	0,43	49,92

La sostituzione dei terminali consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria totale di 8756 kWh, passando da 496.255 kWh a 487.499 kWh, corrispondente ad un calo dell'1,76%. L'indice di prestazione energetica totale si è ridotto di 0,9 kWh/m<sup>2</sup>, passando da 50,82 kWh/m<sup>2</sup> a 49,92 kWh/m<sup>2</sup>. Sono diminuite sia le quote da energia rinnovabile, sia da energia non rinnovabile.

Tabella 30 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento

Consumi ed emissioni - Riscaldamento				
	Consumo teleriscaldamento [kWh]	Consumo energia elettrica [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> teleriscaldamento [kg]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	542.882	12.588	162.865	5.791
Sostituzione terminali	542.880	8.969	162.864	4.126

I nuovi ventilconvettori sono più efficienti rispetto ai terminali attualmente presenti; questo si rispecchia nel consumo di energia elettrica che si riduce particolarmente, circa del 28,7%, passando da una richiesta di 12.588 kWh a 8969 kWh, in quanto l'assorbimento elettrico è inferiore nonostante la domanda di energia termica dei locali resti costante. Inoltre, avendo sostituito i radiatori con i ventilconvettori, la richiesta di energia termica dal teleriscaldamento si riduce, anche se in maniera molto contenuta, e questo è dovuto al fatto che i radiatori sono presenti solo in pochi ambienti dell'edificio. In generale, considerando sia il teleriscaldamento e sia l'energia elettrica, l'intervento di sostituzione dei terminali consente di ridurre le emissioni totali di CO<sub>2</sub> di circa 1,67 tonnellate.

- Risultati per il raffrescamento

Tabella 31 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento

Analisi del fabbisogno energetico - Raffrescamento						
	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	133.254	32.118	165.372	13,64	3,29	16,93
Sostituzione terminali	130.120	31.362	161.482	13,32	3,21	16,54

Anche per il raffrescamento si osserva una riduzione di energia primaria totale richiesta, pari a 3890 kWh di risparmio, corrispondente a una variazione del - 2,35%, passando dagli attuali 165.372 kWh a 161.482 kWh. L'indice di prestazione energetica totale si riduce di 0,39 kWh/m<sup>2</sup>, passando da 16,93 kWh/m<sup>2</sup> a 16,54 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabella 32 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento

Consumi ed emissioni - Raffrescamento		
	Consumo energia elettrica [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	68.336	31.434
Sostituzione terminali	66.728	30.695

I nuovi ventilconvettori permettono una riduzione dei consumi elettrici di 1608 kWh e un calo delle emissioni di CO<sub>2</sub> di 0,74 tonnellate.

In conclusione, dopo la seguente indagine, si può affermare che la sola sostituzione dei terminali comporta una riduzione dei consumi e delle emissioni abbastanza contenuta ma tale intervento è fondamentale in quanto con i nuovi terminali vi è una maggior possibilità di regolazione e di tipologia di funzionamento che saranno analizzati nel prossimo studio.

## Analisi sottosistema di regolazione

Allo stato attuale la regolazione dei ventilconvettori è manuale, risultando quindi poco efficiente, mentre i radiatori non sono dotati di valvole termostatiche.

La possibilità di regolare meglio la potenza in uscita dai terminali è fondamentale per ottimizzare i consumi ed esistono varie opzioni (regolazione climatica, per singolo ambiente, per zona oppure una combinazione tra di loro) e diverse scelte anche per il funzionamento del sistema (ON/OFF, con banda modulante). Per individuare la soluzione ottimale al nostro caso studio è necessaria un'analisi approfondita eseguendo delle simulazioni e confrontando i risultati ottenuti. La scelta più efficace risulta essere quella che consente di ridurre al minimo i consumi di energia primaria, in modo da limitare al massimo la richiesta di energia elettrica e termica, garantendo al contempo il corretto livello di climatizzazione dei locali dell'edificio. In tutte le simulazioni svolte è stata considerata la presenza dei nuovi terminali, analizzati al punto precedente. I risultati sono riportati e analizzati nei paragrafi seguenti, separando lo studio per il riscaldamento da quello per il raffrescamento.

I rendimenti delle diverse tipologie di regolazione sono definiti dalla specifica tecnica UNI TS 11300-2:2019 per il riscaldamento e dalla UNI TS 11300-3:2010 per il raffrescamento.

- Risultati per il riscaldamento

Tipo di regolazione	Caratteristiche della regolazione	Sistemi ad elevata inerzia termica		
		Sistemi a bassa inerzia termica Radiatori, convettori, strisce radianti ed aria calda	Pannelli integrati nelle strutture edilizie e disaccoppiati termicamente	Pannelli annegati nelle strutture edilizie e non disaccoppiati termicamente
Solo Climatica (compensazione con sonda esterna) $K = (0,6 \eta_u \gamma)^{0,9}$		K = 1	K = 0,98	K = 0,94
Solo di zona	On-off	0,93	0,91	0,87
	P banda prop. 2 °C	0,94	0,92	0,88
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,95	0,91
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,96	0,92
	PI o PID	0,99	0,97	0,93
Solo per singolo ambiente	On off	0,94	0,92	0,88
	P banda prop. 2 °C	0,95	0,93	0,89
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
Zona + climatica	On off	0,96	0,94	0,92
	P banda prop. 2 °C	0,96	0,95	0,93
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,96	0,94
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,97	0,95
	PI o PID	0,995	0,98	0,96
Per singolo ambiente + climatica	On off	0,97	0,95	0,93
	P banda prop. 2 °C	0,97	0,96	0,94
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	PI o PID	0,995	0,99	0,97

Figura 72 – Estratto della UNI TS 11300-2:2019 relativo ai rendimenti di regolazione per il riscaldamento

Analizzando il riscaldamento è stato svolto un confronto tra diverse tipologie di regolazione possibili:

- Regolazione manuale;
- Regolazione solo climatica;
- Regolazione per singolo ambiente;
- Regolazione per singola zona;
- Regolazione per singolo ambiente + climatica;
- Regolazione per singola zona + climatica.

Tabella 33 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento

Analisi del fabbisogno energetico - Riscaldamento							
	Tipo di regolazione	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	Manuale ON/OFF	490.339	5.916	496.255	50,21	0,61	50,82
Sostituzione terminali	Manuale ON/OFF	483.284	4.215	487.499	49,49	0,43	49,92
	Solo climatica	454.343	4.125	458.468	46,52	0,42	46,94
	Singolo ambiente	395.589	3.943	399.532	40,51	0,40	40,91
	Singola zona	399.671	3.955	403.626	40,93	0,41	41,34
	Singolo ambiente + Climatica	383.846	3.906	387.752	39,30	0,40	39,70
	Singola zona + Climatica	387.679	3.918	391.597	39,70	0,40	40,10

La regolazione migliore permette di ottenere il minor fabbisogno di energia primaria, garantendo al tempo stesso le corrette condizioni di comfort negli ambienti. Da questo studio emerge che la regolazione per singolo ambiente accoppiata con la regolazione climatica sia la scelta migliore. La regolazione climatica, infatti, tiene in considerazione le condizioni climatiche esterne all'edificio e modifica la temperatura del fluido termovettore in base ad esse, permettendo di ottenere un risparmio di energia. La regolazione per singolo ambiente consente invece di ottimizzare l'uso dell'energia in quanto tiene conto del reale fabbisogno del locale analizzato, monitorando le condizioni di temperatura e umidità.

Questa combinazione di regolazioni consente di ottenere una riduzione di energia primaria totale richiesta di 108.503 kWh rispetto allo stato attuale dell'edificio, passando da 496.255 kWh a 387.752 kWh, corrispondente ad un taglio del 21,86%. Al tempo stesso l'indice di prestazione energetica totale scende di 11,12 kWh/m<sup>2</sup>, passando da 50,82 kWh/m<sup>2</sup> a 39,70 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabella 34 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento

Consumi ed emissioni - Riscaldamento					
	Regolazione	Consumo teleriscaldamento [kWh]	Consumo energia elettrica [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> teleriscaldamento [kg]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	Manuale ON/OFF	542.882	12.588	162.865	5.791
Sostituzione terminali	Manuale ON/OFF	542.880	8.969	162.864	4.126
	Solo climatica	509.588	8.778	152.876	4.038
	Singolo ambiente	441.994	8.389	132.598	3.859
	Singola zona	446.691	8.416	134.007	3.871
	Singolo ambiente + Climatica	428.484	8.311	128.545	3.823
	Singola zona + Climatica	432.894	8.337	129.868	3.835

La riduzione si osserva anche nei consumi dei vettori energetici e nelle emissioni: la regolazione per singolo ambiente + climatica permette di ridurre i consumi di energia termica dal teleriscaldamento di 114.398 kWh, passando da 542.882 kWh a 428.484 kWh, e i consumi di energia elettrica di 4277 kWh, passando da 12.588 kWh a 8311 kWh. La riduzione, dunque, è notevole e per quanto riguarda le emissioni totali, si assiste a un calo del 21,5%, ovvero viene evitata la produzione di 36,3 tonnellate di CO<sub>2</sub>.

Le regolazioni per singolo ambiente e per singola zona offrono la possibilità di considerare anche alcune sotto regolazioni legate al metodo di funzionamento:

- Funzionamento ON/OFF;
- Funzionamento con banda di modulazione pari a 0,5 °C;
- Funzionamento con banda di modulazione pari a 1 °C;
- Funzionamento con banda di modulazione pari a 2 °C;
- Funzionamento PI o PID.

Queste sotto regolazioni sono state analizzate in abbinamento al miglior metodo di regolazione emerso nella precedente indagine, ovvero quella per singolo ambiente + climatica.

Tabella 35 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento

Analisi del fabbisogno energetico - Riscaldamento							
Regolazione	Sotto regolazione	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Manuale (Stato attuale)	ON/OFF	490.339	5.916	496.255	50,21	0,61	50,82
Singolo ambiente + climatica	ON/OFF	383.846	3.906	387.752	39,30	0,40	39,70
	Banda proporzionale 0,5 °C	376.413	3.883	380.296	38,54	0,40	38,94
	Banda proporzionale 1 °C	380.092	3.895	383.987	38,92	0,40	39,32
	Banda proporzionale 2 °C	383.846	3.906	387.752	39,30	0,40	39,70
	PI o PID	374.602	3.877	378.479	38,36	0,40	38,76

Il funzionamento PI/PID risulta essere il migliore in quanto si ottiene il minor fabbisogno di energia primaria. Questo regola la modulazione della potenza in uscita considerando sia lo storico dei dati, sia alcune previsioni, garantendo il mantenimento della temperatura il più vicino possibile al set point impostato. La regolazione per singolo ambiente + climatica, abbinata al funzionamento PI/PID, consente nel complesso una riduzione di energia primaria totale pari a 117.776 kWh rispetto allo stato attuale, passando da 496.255 kWh a 378.479 kWh, con un taglio del 23,73%. L'indice di prestazione energetica totale diminuisce di 12,06 kWh/m<sup>2</sup>, passando da 50,82 kWh/m<sup>2</sup> a 38,76 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabella 36 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento

Consumi ed emissioni - Riscaldamento					
Regolazione	Sotto regolazione	Consumo teleriscaldamento [kWh]	Consumo energia elettrica [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> teleriscaldamento [kg]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Manuale (Stato attuale)	ON/OFF	542.882	12.588	162.865	5.791
Singolo ambiente + Climatica	ON/OFF	428.484	8.311	128.545	3.823
	Banda proporzionale 0,5 °C	419.933	8.262	125.980	3.800

	Banda proporzionale 1 °C	424.165	8.286	127.250	3.812
	Banda proporzionale 2 °C	428.484	8.311	128.545	3.823
	PI o PID	417.849	8.250	125.355	3.795

La regolazione per singolo ambiente + climatica, con il funzionamento PI/PID, permette la riduzione di 125.033 kWh di energia termica dal teleriscaldamento, passando da 542.882 kWh a 417.849 kWh, e di 4338 kWh di energia elettrica, passando da 12.588 kWh a 8250 kWh. Tutto questo comporta una diminuzione delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> pari a 39,5 tonnellate, con una riduzione del 23,4%.

In conclusione, la miglior soluzione per il riscaldamento risulta essere la regolazione per singolo ambiente + climatica, in abbinamento ad un funzionamento PI/PID.

- Risultati per il raffrescamento

Sistema di controllo	Tipologia di regolazione	Rendimento di regolazione
Regolazione centralizzata	Regolazione ON-OFF	0,84
	Regolazione modulante	0,90
Controllori zona	Regolazione ON-OFF	0,93
	Regolazione modulante (banda 2 °C)	0,95
	Regolazione modulante (banda 1 °C)	0,97
Controllo singolo ambiente	Regolazione ON-OFF	0,94
	Regolazione modulante (banda 2 °C)	0,96
	Regolazione modulante (banda 1 °C)	0,98

Figura 73 - Estratto della UNI TS 11300-3:2010 relativo ai rendimenti di regolazione per il raffrescamento

Per quanto riguarda il raffrescamento, sono state confrontate diverse tipologie di regolazione:

- Regolazione centralizzata;
- Regolazione di zona;
- Regolazione per singolo ambiente.

Per ciascuna di queste sono state analizzate anche alcune sotto regolazioni possibili che riguardano il metodo di funzionamento:

- Funzionamento ON/OFF;
- Funzionamento con modulazione (banda di 1 °C);
- Funzionamento con modulazione (banda di 2 °C).

Tabella 37 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento

Analisi del fabbisogno energetico - Raffrescamento								
	Regolazione	Sotto regolazione	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	Centralizzata	ON/OFF	133.254	32.118	165.372	13,64	3,29	16,93
Sostituzione terminali	Centralizzata	ON/OFF	130.120	31.362	161.482	13,32	3,21	16,54
		Modulante	121.445	29.271	150.716	12,44	3,00	15,44
	Controllo di zona	ON/OFF	117.528	28.327	145.855	12,03	2,90	14,93
		Modulante banda 2 °C	115.054	27.731	142.785	11,78	2,84	14,62
		Modulante banda 1 °C	112.681	27.159	139.840	11,54	2,78	14,32
	Controllo singolo ambiente	ON/OFF	116.278	28.026	144.304	11,91	2,87	14,78
		Modulante banda 2 °C	113.855	27.442	141.297	11,66	2,81	14,47
		Modulante Banda 1 °C	111.531	26.882	138.413	11,42	2,75	14,17

Anche per il raffrescamento la miglior scelta è rappresentata dalla regolazione che permette di avere il minimo fabbisogno di energia primaria, garantendo sempre il corretto comfort negli ambienti dell'edificio. Dall'analisi eseguita la regolazione migliore risulta essere quella per singolo ambiente abbinata ad un funzionamento con banda di modulazione di 1 °C. Questa strategia di regolazione permette di ridurre la richiesta di energia primaria totale di 26.959 kWh rispetto allo stato attuale, passando da 165.372 kWh a 138.413 kWh, pari a un taglio del 16,3% del consumo. L'indice di prestazione energetica totale si è ridotto di 2,76 kWh/m<sup>2</sup>, passando da 16,93 kWh/m<sup>2</sup> a 14,17 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabella 38 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento

Consumi ed emissioni - Raffrescamento				
	Regolazione	Sotto regolazione	Consumo energia elettrica [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	Centralizzata	ON/OFF	68.336	31.434
Sostituzione terminali	Centralizzata	ON/OFF	66.728	30.695
		Modulante	62.280	28.649
	Controllo di zona	ON-OFF	60.271	27.725
		Modulante Banda 2°C	59.002	27.141
		Modulante Banda 1°C	57.785	26.581
	Controllo singolo ambiente	ON/OFF	59.629	27.430
		Modulante Banda 2°C	58.387	26.858
		Modulante Banda 1°C	57.196	26.310

Per quanto riguarda il consumo di energia elettrica, la scelta di una regolazione per singolo ambiente con banda di modulazione di 1°C permette la riduzione di 11.140 kWh nella richiesta di elettricità rispetto alla situazione attuale, passando da 68.336 kWh a 57.196 kWh, ed evitando così l'emissione di 5,12 tonnellate di CO<sub>2</sub>.

In conclusione, la miglior opzione per il raffrescamento risulta essere la regolazione per singolo ambiente in abbinamento ad un funzionamento con banda di modulazione di 1 °C.

#### Analisi isolamento termico della distribuzione

Per quanto riguarda il sistema di distribuzione dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento, l'intervento previsto mira alla sostituzione di tutte le tubature e al rifacimento dell'isolamento termico. I condotti sono collocati nel sottotetto e all'interno delle pareti esterne e di conseguenza sono particolarmente soggetti alle variazioni di temperatura esterna. Un corretto isolamento permette di ridurre le perdite quando scorre acqua ad alta temperatura e di questo beneficia l'intero sistema, in quanto raggiunge un'efficienza complessiva maggiore. Per dimostrare l'importanza di tale intervento sono stati considerati diversi livelli di isolamento:

- Insufficiente → L'isolamento è gravemente deteriorato o non presente;
- Medio → L'isolamento è con materiali vari non fissati stabilmente da uno strato protettivo;
- Discreto → L'isolamento di spessore non necessariamente conforme alle prescrizioni del DPR 412/93, ma eseguito con cura e protetto da uno strato di gesso, plastica o alluminio;

- Secondo DPR 412/93 → L'isolamento presenta uno spessore conforme alle prescrizioni del decreto.

In particolare il DPR 412/93 tratta questo argomento nell'Allegato B "Isolamento delle reti di distribuzione del calore negli impianti termici" dove stabilisce che "Le tubazioni delle reti di distribuzione dei fluidi caldi in fase liquida o vapore degli impianti termici devono essere coibentate con materiale isolante il cui spessore minimo è fissato dalla seguente tabella (Tabella 39) in funzione del diametro della tubazione espresso in mm e della conduttività termica utile del materiale isolante espressa in  $W/m^{\circ}C$  alla temperatura di  $40^{\circ}C$ ."

Tabella 39 – Spessori minimi dell'isolamento per i condotti di distribuzione definiti dal DPR 412/93

Conduttività termica utile dell'isolante [ $W/m^{\circ}C$ ]	Diametro esterno della tubazione [mm]					
	< 20	Da 20 a 39	Da 40 a 59	Da 60 a 79	Da 80 a 99	> 100
0,030	13	19	26	33	37	40
0,032	14	21	29	36	40	44
0,034	15	23	31	39	44	48
0,036	17	25	34	43	47	52
0,038	18	28	37	46	51	56
0,040	20	30	40	50	55	60
0,042	22	32	43	54	59	64
0,044	24	35	46	58	63	69
0,046	26	38	50	62	68	74
0,048	28	41	54	66	72	79
0,050	30	44	58	71	77	84

Considerando i diversi livelli di isolamento il fabbisogno energetico e le emissioni dell'intero edificio variano. In Tabella 40 sono riassunti i risultati delle simulazioni per il servizio di riscaldamento.

Tabella 40 – Consumi energetici ed emissioni generate per diversi gradi di isolamento termico della rete di distribuzione

Isolamento	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	Consumo teleriscaldamento [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> totali [kg]
Insufficiente	393.429	40,29	435.272	134.377
Medio	385.407	39,46	425.923	131.572
Discreto	380.377	38,95	420.060	129.813
Secondo DPR 412/93	378.479	38,76	417.849	129.150

Prendendo come riferimento il livello di isolamento previsto dal DPR 412/93, le variazioni sono state calcolate e riportate in Tabella 41.

Tabella 41 – Variazione dei consumi e delle emissioni rispetto all'isolamento richiesto dal DPR 412/93

Isolamento	Variazione consumo teleriscaldamento [kWh]	Variazione emissioni CO <sub>2</sub> totali [kg]
Insufficiente	+ 17.423	+ 5.227
Medio	+ 8.074	+ 2.422
Discreto	+ 2.211	+ 663

Questa indagine mette dunque in evidenza come l'isolamento deteriorato, attualmente presente sui condotti di distribuzione, possa avere un'influenza negativa sull'intero sistema se non venisse sostituito. Un livello insufficiente di isolamento, infatti, richiede 17,4 MWh di energia da teleriscaldamento in più rispetto al livello previsto dalla normativa, equivalenti all'emissione di circa 5,2 tonnellate di CO<sub>2</sub> in più.

#### Analisi temperatura di set point

Dopo aver identificato le migliori opzioni per l'efficientamento energetico sono stati condotti alcuni studi relativi all'impatto della scelta della temperatura di set point per la climatizzazione dei locali.

Attualmente in Italia il D.P.R. 74/2016 definisce le temperature limite per gli uffici pubblici, ovvero:

- 20 °C (22 °C considerando la tolleranza di +2 °C) per il riscaldamento;
- 26 °C (24 °C considerando la tolleranza di -2 °C) per il raffrescamento.

Il Decreto-legge 34/2022 introduceva nuovi limiti come risposta alla crisi energetica globale del 2022, corrispondenti a 19 °C per il riscaldamento e 27 °C per il raffrescamento, sempre considerando una tolleranza di 2 °C. Tale norma non è più attiva ma il Politecnico di Torino ha mantenuto questi nuovi limiti anche per gli anni 2023 e 2024. L'analisi eseguita ha studiato la variazione dei consumi energetici in risposta al cambiamento di temperatura impostata ed è stata svolta considerando un range dai 18 ai 21 °C per il periodo invernale e dai 25 ai 28 °C per il periodo estivo, mettendo in evidenza (righe in azzurro) la scelta di temperature dell'Ateneo.

- Risultati per il riscaldamento

Tabella 42 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento

Analisi del fabbisogno energetico - Riscaldamento						
Temperatura	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
18 °C	324.450	3.352	327.802	33,22	0,34	33,56
18,5 °C	339.904	3.514	343.418	34,81	0,36	35,17
19 °C	356.734	3.690	360.424	36,53	0,38	36,91
19,5 °C	374.602	3.877	378.479	38,36	0,40	38,76
20 °C	393.921	4.080	398.001	40,34	0,42	40,76
20,5 °C	413.787	4.288	418.075	42,37	0,44	42,81
21 °C	434.144	4.501	438.645	44,46	0,46	44,92

Tabella 43 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento

Consumi ed emissioni - Riscaldamento				
Temperatura	Consumo Teleriscaldamento [kWh]	Consumo Energia Elettrica [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> Teleriscaldamento [kg]	Emissioni CO <sub>2</sub> Energia Elettrica [kg]
18 °C	361.939	7.132	108.582	3.276
18,5 °C	379.168	7.476	113.750	3.436
19 °C	397.929	7.852	119.379	3.610
19,5 °C	417.849	8.250	125.355	3.795
20 °C	439.387	8.681	131.816	3.995
20,5 °C	461.534	9.123	138.460	4.200
21 °C	484.229	9.577	145.269	4.411

Analizzando i risultati si osserva che, come atteso, il fabbisogno di energia primaria, i consumi dei vettori energetici e le emissioni aumentano man mano che la temperatura impostata nei locali viene

incrementata. In media la variazione di questi parametri corrisponde ad un + 5% per ogni mezzo grado di incremento e ad un + 10% per ogni grado in più impostato.

Ponendo l'attenzione sui dati relativi alla scelta del Politecnico di Torino si osserva che, rispetto alla temperatura limite della normativa di 20 °C, la decisione di impostare il set point ridotto a 19 °C permette all'edificio sotto studio:

- Una riduzione pari a 37.577 kWh nel fabbisogno di energia primaria totale, passando da una richiesta di 398.001 kWh a 360.424 kWh;
- Una riduzione pari a 41.458 kWh nel consumo di energia termica dal teleriscaldamento;
- Una riduzione pari a 829 kWh nel consumo di energia elettrica;
- Una riduzione complessiva di 12,8 tonnellate di CO<sub>2</sub> emesse.

- Risultati per il raffrescamento

*Tabella 44 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento*

Analisi del fabbisogno energetico - Raffrescamento						
Temperatura	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
25 °C	146.602	35.335	181.937	15,01	3,62	18,63
25,5 °C	137.428	33.124	170.552	14,07	3,39	17,46
26 °C	128.487	30.969	159.456	13,16	3,17	16,33
26,5 °C	119.828	28.882	148.710	12,27	2,96	15,23
27 °C	111.531	26.882	138.413	11,42	2,75	14,17
27,5 °C	103.544	24.957	128.501	10,60	2,56	13,16
28 °C	95.981	23.134	119.115	9,83	2,37	12,20

Tabella 45 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento

Consumi ed emissioni - Raffrescamento		
Temperatura	Consumo energia elettrica [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
25 °C	75.180	34.583
25,5 °C	70.476	32.419
26 °C	65.891	30.310
26,5 °C	61.450	28.267
27 °C	57.196	26.310
27,5 °C	53.099	24.426
28 °C	49.221	22.642

Analizzando i risultati si osserva che, come atteso, il fabbisogno di energia primaria, i consumi dei vettori energetici e le emissioni aumentano man mano che la temperatura impostata nei locali viene ridotta. In media la variazione di questi parametri corrisponde ad un + 6,5% per ogni mezzo grado di riduzione e ad un + 13% per ogni grado in meno impostato.

Ponendo l'attenzione sui dati relativi alla scelta del Politecnico di Torino si osserva che, rispetto alla temperatura limite della normativa di 26 °C, la decisione di impostare il set point rialzato a 27 °C permette all'edificio sotto studio:

- Una riduzione pari a 21.043 kWh nel fabbisogno di energia primaria totale, passando da 159.456 kWh a 138.413 kWh;
- Una riduzione pari a 8695 kWh nel consumo di energia elettrica;
- Una riduzione di 4 tonnellate di CO<sub>2</sub> emesse.

La scelta della temperatura come detto in precedenza influisce sul comfort degli occupanti e dovrebbe tenere in considerazione il tipo di attività svolta. Nel caso dell'edificio analizzato la maggior parte degli spazi è adibita a uffici e quindi si tratta di attività sedentarie. In conclusione, si può affermare che è sicuramente una scelta sostenibile optare per il mantenimento di una temperatura più bassa in inverno o più elevata in estate per un maggior risparmio ma bisognerebbe valutare attentamente il livello di comfort dei lavoratori trovando di conseguenza il giusto compromesso.

#### Impianto di climatizzazione abbinato ai sensori di presenza

I sensori di occupazione rappresentano un'opportunità per una ulteriore riduzione dei consumi dell'edificio. Questi sono in grado di rilevare la presenza o l'assenza di occupanti nell'ambiente in cui sono installati e possono mandare segnali per attivare o disattivare vari dispositivi. Solitamente sono molto diffusi in abbinamento all'illuminazione in modo da disattivarla in assenza di persone per

risparmiare energia elettrica. I sensori di occupazione, tuttavia, possono anche essere integrati nei sistemi di climatizzazione attraverso il Building Management System in modo da regolare il funzionamento degli impianti in base all'effettiva occupazione degli spazi. Quando il sensore rileva la presenza di persone comunica attraverso il BMS con l'impianto di climatizzazione per mantenere la temperatura di set point impostata. Il vantaggio dell'accoppiamento è legato al fatto che quando il sensore non rileva alcun occupante per un lasso di tempo impostato, l'impianto di climatizzazione spegne del tutto o riduce il riscaldamento o il raffrescamento. È possibile impostare una temperatura ridotta di set point da mantenere quando gli spazi sono inutilizzati. L'intero sistema di funzionamento può essere personalizzato, decidendo gli intervalli di tempo prima di spegnere o accendere l'impianto, scegliendo le temperature ridotte per la climatizzazione e scegliendo l'orario in cui svolgere queste funzioni.

I vantaggi di questo abbinamento sono:

- Riduzione dei consumi energetici garantendo comunque il comfort agli occupanti;
- Estensione della vita utile degli impianti grazie ad un utilizzo più razionale;
- Maggiore sostenibilità con una riduzione delle emissioni.

Per analizzare meglio i benefici che si possono ottenere dall'accoppiamento dei sensori di occupazione con gli impianti di climatizzazione, è stata svolta un'indagine in cui si è osservata la variazione del consumo energetico degli impianti con diversi livelli di occupazione dell'edificio. Nel fabbricato 4A sono presenti in totale 142 uffici distribuiti su cinque piani e dunque:

- 90% di occupazione → 14 uffici sono non occupati
- 80% di occupazione → 28 uffici sono non occupati
- 70% di occupazione → 42 uffici sono non occupati

Lo studio ha analizzato un tipico giorno lavorativo: mercoledì 18 gennaio 2023 per il riscaldamento e mercoledì 19 luglio 2023 per il raffrescamento.

Il confronto è avvenuto tra:

- Uffici senza i sensori di occupazione → considerando i locali non occupati, quindi senza apporti interni, gli impianti di climatizzazione funzionano a regime come programmato (19 °C per il riscaldamento, 27 °C per il raffrescamento).
- Uffici con i sensori di occupazione → considerando gli stessi locali di prima, non occupati, senza apporti interni ma con gli impianti di climatizzazione che vengono spenti o ridotti essendo l'ambiente inutilizzato (ipotesi di temperatura ridotta a 16 °C per il riscaldamento e impianto totalmente spento per il raffrescamento).

I locali sono stati ipotizzati non occupati per l'intera giornata.

- Risultati per il riscaldamento

Tabella 46 – Variazione del consumo energetico con o senza sensori di presenza per il riscaldamento

Confronto riscaldamento – mercoledì 18 gennaio 2023						
Occupazione dell'edificio	Consumo energetico nei locali non occupati [kWh]		Variazione percentuale	Consumo energetico nell'intero edificio [kWh]		Variazione percentuale
	Senza sensori	Con sensori		Senza sensori	Con sensori	
90%	179,2	87,4	-51,21%	4280,2	4188,4	-2,14%
80%	366,6	195,5	-46,69%	4280,2	4109,1	-4,00%
70%	580,0	325,9	-43,81%	4280,2	4026,2	-5,94%

- Risultati per il raffrescamento

Tabella 47 - Variazione del consumo energetico con o senza sensori di presenza per il raffrescamento

Confronto raffrescamento – mercoledì 19 luglio 2023						
Occupazione dell'edificio	Consumo energetico nei locali non occupati [kWh]		Variazione percentuale	Consumo energetico nell'intero edificio [kWh]		Variazione percentuale
	Senza sensori	Con sensori		Senza sensori	Con sensori	
90%	81,4	0	-100%	2449,2	2367,7	-3,32%
80%	175,1	0	-100%	2449,2	2274,1	-7,15%
70%	303,1	0	-100%	2449,2	2146,1	-12,37%

Dai risultati delle simulazioni si può verificare e quantificare il risparmio di energia necessaria grazie alla presenza dei sensori di occupazione. La presenza di un locale a diversa temperatura può tuttavia avere un impatto sui consumi degli spazi confinanti, specialmente se le pareti divisorie non sono isolate. È stata quindi svolta un'indagine a questo proposito, osservando che effettivamente la richiesta energetica dei locali adiacenti aumenta ma in maniera molto contenuta, meno di un punto percentuale di incremento. Verificato ciò, utilizzare i sensori di occupazione per ridurre gli sprechi di energia in ambienti dove la climatizzazione non è sempre necessaria, risulta essere una scelta sostenibile e conveniente. Nel caso studio analizzato la riduzione è maggiore nel raffrescamento rispetto al riscaldamento in quanto nel primo caso si è ipotizzato lo spegnimento totale rispetto al secondo caso dove è stata settata una temperatura inferiore. Tuttavia, uno dei vantaggi di questo sistema è la grande possibilità di personalizzazione di funzionamento offerto e dunque, in base alle

esigenze e alle caratteristiche degli spazi, è possibile personalizzare la temperatura, il periodo per lo spegnimento e molti altri aspetti.

Se da un lato vengono ridotti i consumi di energia, mantenendo una temperatura minore in inverno o maggiore in estate, bisognerebbe anche eseguire una valutazione sul comfort. Avere un locale a temperatura diversa può avere un impatto negativo sugli occupanti degli spazi adiacenti. I locali analizzati in questo studio sono tutti uffici di ridotte dimensioni che quando non sono occupati vengono comunque lasciati con la porta chiusa e che presentano un ingresso su un corridoio comune solo di passaggio. Tuttavia, se la porta rimanesse aperta, si potrebbero generare dei flussi di aria più fredda o più calda che potrebbero disturbare le persone presenti negli spazi limitrofi. Questa considerazione potrebbe essere approfondita con un'analisi estesa ad altri edifici dove gli spazi presentano altre configurazioni e utilizzi e dove il discomfort generato potrebbe essere maggiore.

### Integrazione dell'impianto fotovoltaico

Nelle precedenti indagini è sempre stata messa in evidenza la quota di energia primaria da fonte rinnovabile e da fonte non rinnovabile che viene impiegata per la climatizzazione dell'edificio. Un ulteriore passo in avanti nell'efficientamento energetico degli impianti potrebbe essere rappresentato dall'installazione di un impianto per la produzione di energia da fonti rinnovabili. In particolare, un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica direttamente nell'edificio può incrementare la quota di energia rinnovabile e abbattere ulteriormente le emissioni generate.

Uno dei punti del piano pluriennale per la decarbonizzazione del Politecnico di Torino prevede il potenziamento e l'installazione di nuovi impianti fotovoltaici. Nello studio condotto è stata quindi considerata l'installazione di un impianto che sfrutti il più possibile la superficie libera disponibile in copertura. L'energia elettrica prodotta può soddisfare il fabbisogno energetico degli impianti di climatizzazione e utilizzare il surplus di produzione per tutti gli altri servizi dell'edificio e per gli altri fabbricati dell'ateneo confinanti.

La superficie a disposizione in copertura è pari a 2628 m<sup>2</sup> ed offre la possibilità di installare 510 pannelli per una potenza complessiva nominale pari a 242,25 kWp che rispetta largamente il limite minimo specificato dal decreto legislativo 28/2011 per gli edifici pubblici. In particolare, l'impianto considerato si compone di pannelli fotovoltaici al silicio monocristallino, mezza cella, ciascuno della potenza di 475 W. Il tetto è costituito da due falde con un'inclinazione di 5° rispetto all'orizzontale:

- Sulla falda più ampia, verso Corso Castelfidardo e orientata verso Nord-Ovest, è prevista l'installazione di 458 pannelli per una potenza complessiva di 217,55 kWp.
- Sulla falda più piccola, verso gli altri fabbricati della sede centrale e orientata verso Sud-Est, si prevede il posizionamento di 52 pannelli per una potenza complessiva di 24,7 kWp.

Utilizzando il software PVGIS è stata svolta una simulazione per stimare la producibilità dell'impianto fotovoltaico durante l'anno. Nelle Figure 75 e 77 sono riportati i grafici con l'andamento della produzione durante l'anno.

▪ Falda verso Corso Castelfidardo:

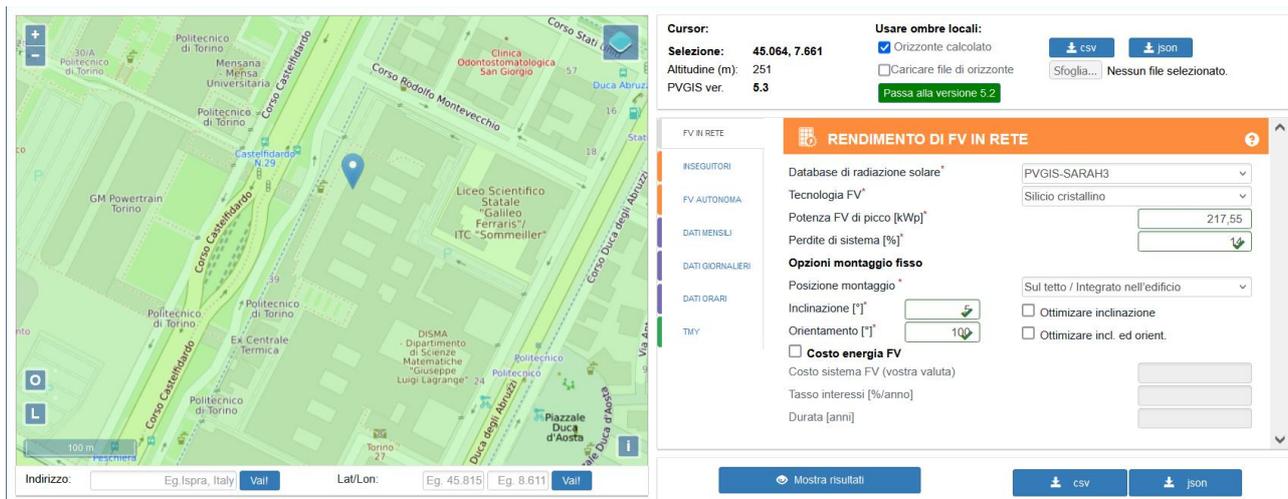


Figura 74 – Dati dell'impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso Corso Castelfidardo [19]

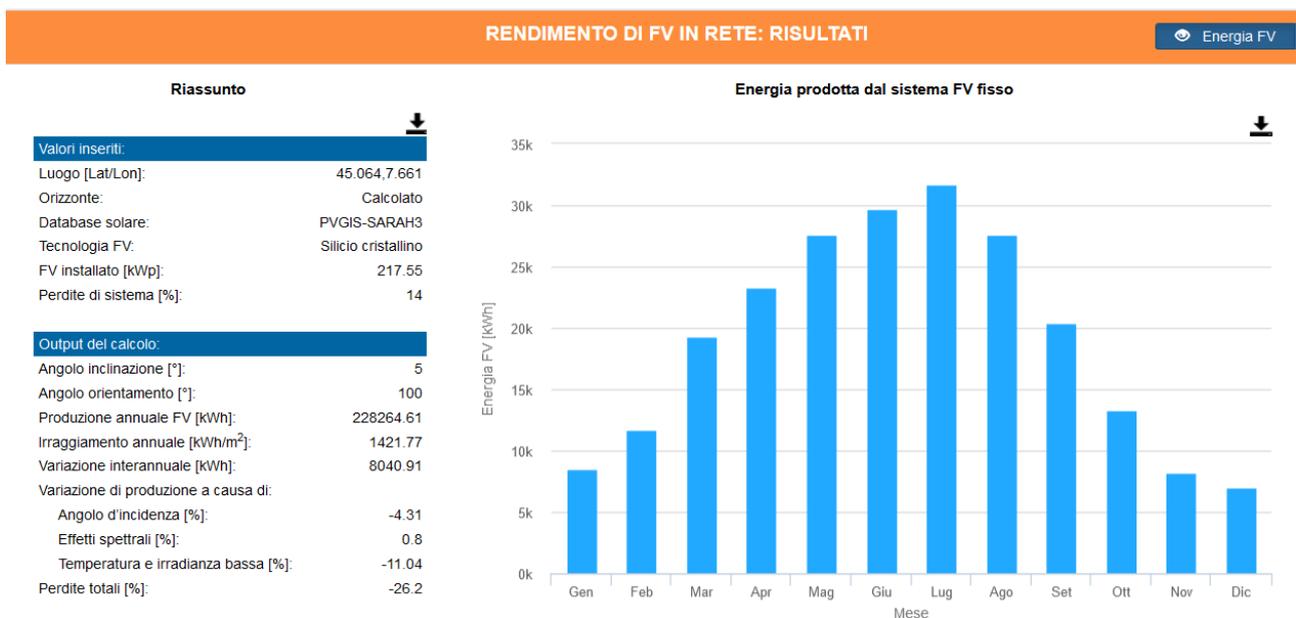


Figura 75 – Produzione mensile dell'impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso Corso Castelfidardo [19]

▪ Falda verso il Politecnico:

Figura 76 - Dati dell'impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso gli edifici del Politecnico [19]

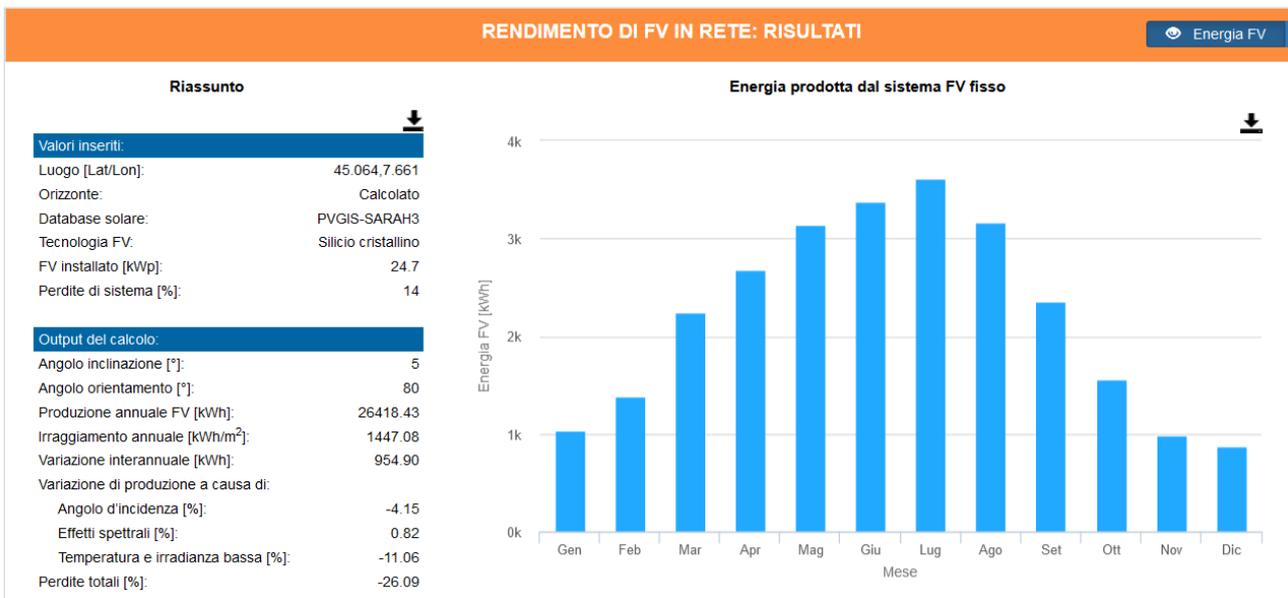


Figura 77 - Produzione mensile dell'impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso gli edifici del Politecnico [19]

Nella Tabella 48 è riportata la produzione stimata dell'intero impianto.

Tabella 48 – Produzione totale e mensile dell'impianto fotovoltaico

Mese	Energia elettrica prodotta dai moduli FV lato Corso Castelfidardo [kWh]	Energia elettrica prodotta dai moduli FV lato Politecnico [kWh]	Produzione totale [kWh]
Gennaio	8.499,2	1.037,1	9.536,2
Febbraio	11.683,7	1.385,9	13.069,6
Marzo	19.324,4	2.247,5	21.571,9
Aprile	23.311,0	2.678,4	25.989,4
Maggio	27.569,1	3.146,4	30.715,5
Giugno	29.683,2	3.380,4	33.063,6
Luglio	31.688,7	3.613,8	35.302,5
Agosto	27.574,5	3.160,6	30.735,1
Settembre	20.406,0	2.359,1	22.765,1
Ottobre	13.288,8	1.555,9	14.844,7
Novembre	8.191,4	984,4	9.175,8
Dicembre	7.044,6	869,1	7.913,7
		<b>TOTALE</b>	<b>254.683</b>

Dalla simulazione svolta sul software di Edilclima l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico si ripartisce tra i servizi di riscaldamento e raffrescamento secondo quanto riassunto nella Tabella 49.

Tabella 49 – Ripartizione tra i servizi dell'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico

Mese	$E_{el,prod,FV}$ [kWh]	$E_{el,used,H}$ [kWh]	$E_{el,used,C}$ [kWh]	$E_{el,surplus}$ [kWh]
Gennaio	9.536	2.251	0	7.285
Febbraio	13.070	1.568	0	11.501
Marzo	21.572	837	0	20.735
Aprile	25.989	154	0	25.836
Maggio	30.716	0	6.993	23.723
Giugno	33.064	0	8.422	24.642
Luglio	35.303	0	19.067	16.236
Agosto	30.735	0	13.856	16.879
Settembre	22.765	0	8.858	13.907
Ottobre	14.845	284	0	14.560
Novembre	9.176	1.165	0	8.010
Dicembre	7.914	1.990	0	5.923
<b>TOTALE</b>	<b>254.683</b>	<b>8.249</b>	<b>57.196</b>	<b>189.238</b>

Dove:

- $E_{el,prod,FV}$  → Energia elettrica mensile da produzione fotovoltaica;
- $E_{el,used,H}$  → Energia elettrica mensile da produzione fotovoltaica utilizzata per il riscaldamento;
- $E_{el,used,C}$  → Energia elettrica mensile da produzione fotovoltaica utilizzata per il raffrescamento;
- $E_{el,surplus}$  → Energia elettrica mensile da produzione fotovoltaica non consumata dai servizi di riscaldamento e raffrescamento.

Si può osservare come, avendo l'obiettivo di massimizzare la produzione sfruttando il più possibile gli spazi disponibili, è presente una significativa quantità di energia in surplus che può essere impiegata per soddisfare gli altri fabbisogni della sede dell'ateneo.

È stato eseguito un confronto tra le prestazioni dell'edificio in tre situazioni diverse:

- Allo stato attuale;
- Considerando gli interventi di efficientamento energetico degli impianti (SDP) ovvero il rifacimento della rete di distribuzione, la sostituzione dei terminali e le migliori regolazioni per il riscaldamento e raffrescamento osservate in precedenza;
- Considerando gli interventi di efficientamento degli impianti + l'installazione del fotovoltaico.

I risultati, divisi per i due servizi di climatizzazione, sono riassunti nelle Tabelle 50, 51, 52 e 53.

- Risultati per il riscaldamento

*Tabella 50 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento*

Analisi del fabbisogno energetico - Riscaldamento						
	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	490.339	5.916	496.255	50,21	0,61	50,82
SDP Impianti	374.602	3.877	378.479	38,36	0,40	38,76
SDP Impianti + Fotovoltaico	358.514	8.250	366.764	36,71	0,84	37,56

Tabella 51 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento

Consumi ed emissioni - Riscaldamento				
	Consumo teleriscaldamento [kWh]	Consumo energia elettrica prelevata da rete [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> teleriscaldamento [kg]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	542.882	12.588	162.865	5.791
SDP Impianti	417.849	8.250	125.355	3.795
SDP Impianti + Fotovoltaico	417.849	0	125.355	0

La presenza del fotovoltaico permette di azzerare la quota di energia elettrica prelevata dalla rete, abbattendo del tutto quindi le emissioni legate all'elettricità. In termini di energia primaria, rispetto all'intervento di efficientamento degli impianti senza il fotovoltaico, la quota da fonti rinnovabili è aumentata del 112,8%, passando da 3877 kWh a 8250 kWh e riducendo del 4,3% quella non rinnovabile, la quale passa da 374.602 kWh a 358.514 kWh.

- Risultati per il raffrescamento

Tabella 52 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento

Analisi del fabbisogno energetico - Raffrescamento						
	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	133.254	32.118	165.372	13,64	3,29	16,93
SDP Impianti	111.531	26.882	138.413	11,42	2,75	14,17
SDP Impianti + Fotovoltaico	0	57.196	57.196	0	5,86	5,86

Tabella 53 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento

Consumi ed emissioni - Raffrescamento			
	Consumo energia elettrica prelevata dalla rete [kWh]	Consumo energia elettrica prodotta da impianto FV [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	68.336	0	31.434
SDP Impianti	57.196	0	26.310
SDP Impianti + Fotovoltaico	0	57.196	0

Il fotovoltaico ha un impatto maggiore sul raffrescamento dell'edificio vista l'alimentazione del gruppo frigorifero tramite energia elettrica. Anche in questo caso il consumo di energia elettrica prelevata dalla rete e le emissioni ad essa collegate sono state azzerate; l'impianto fotovoltaico è in grado di coprire il 100% del fabbisogno elettrico dell'impianto di raffrescamento. Rispetto all'intervento di efficientamento degli impianti senza il fotovoltaico, la quota di energia primaria da fonti rinnovabili è aumentata del 112,8%, passando da 26.882 kWh a 57.196 kWh, riducendo invece quella non rinnovabile del 100%, che passa quindi da 111.531 kWh a zero.

### Risultati globali post-intervento

In seguito all'analisi degli interventi di efficientamento energetici proposti, è stata eseguita nuovamente una diagnosi energetica per evidenziare i risultati sia per singolo servizio e sia globali, ottenuti dall'ottimizzazione degli impianti con l'integrazione dell'impianto fotovoltaico. Nelle Tabelle 54 e 55 sono riportati i fabbisogni di energia primaria e gli indici di prestazione energetica con la variazione ottenuta rispetto allo stato attuale dell'edificio.

- Fabbisogno di Energia Primaria:

Tabella 54 - Fabbisogno di energia primaria post-intervento

	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	Variazione $E_{P,tot}$ rispetto allo stato attuale
RISCALDAMENTO	358.514	8.250	366.764	- 26,1%
RAFFRESCAMENTO	0	57.196	57.196	- 65,4%
Globale	358.514	65.446	423.960	- 35,9%

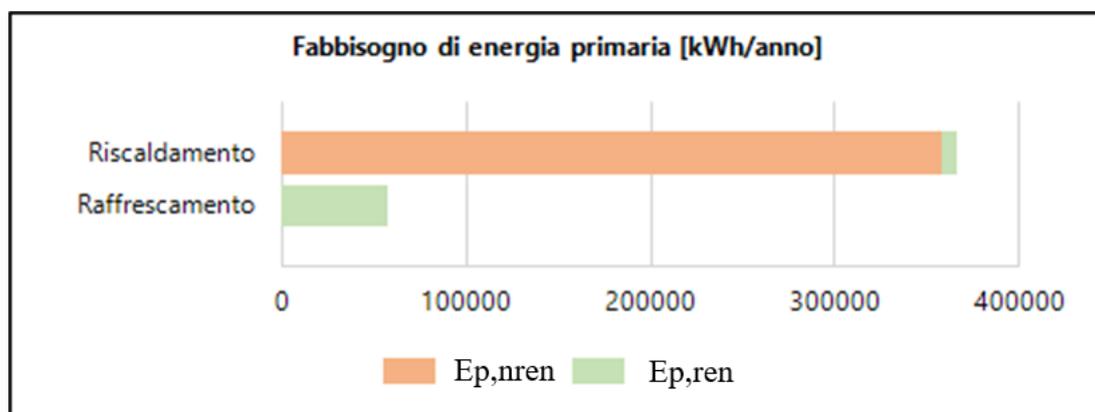


Figura 78 - Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e raffrescamento

- Indice di Prestazione Energetica:

Tabella 55 - Indici di prestazione energetica post-intervento

	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	Variazione $EP_{tot}$ rispetto allo stato attuale
RISCALDAMENTO	36,71	0,84	37,56	- 26,1%
RAFFRESCAMENTO	0	5,86	5,86	- 65,4%
Globale	36,71	6,7	43,41	- 35,9%

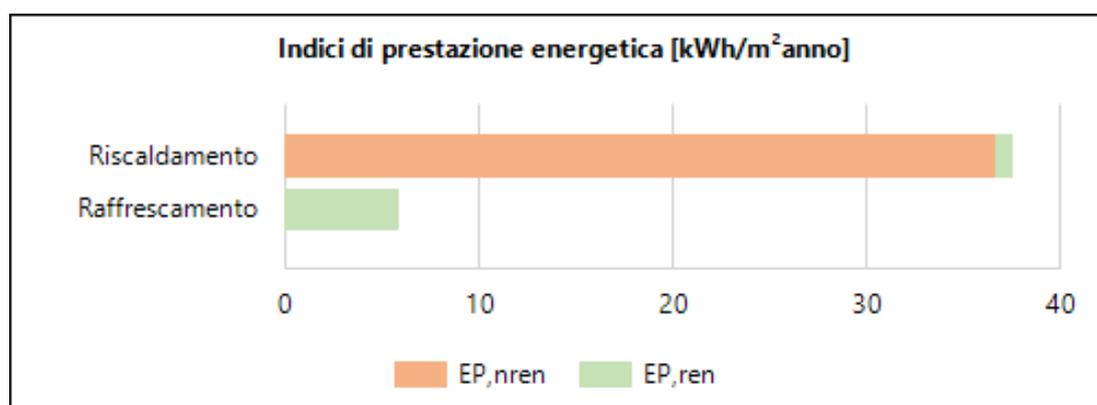


Figura 79 - Indici di prestazione energetica per il riscaldamento e raffrescamento

### Discussione dei risultati ottenuti

Le analisi svolte e riportate in questo capitolo hanno permesso di valutare le diverse tipologie e strategie di intervento sull'impianto di climatizzazione, individuando così le soluzioni più efficaci per migliorare l'efficienza del sistema. I risultati mostrano come sia possibile ottimizzare l'uso dell'energia nei sottosistemi di cui l'impianto si compone, limitando gli sprechi, gestendo in maniera più intelligente i flussi energetici e riducendo di conseguenza i consumi. Tutto ciò è stato possibile pur mantenendo gli stessi sistemi di generazione attualmente presenti nell'edificio e andando ad intervenire solamente sul resto del sistema.

I radiatori e i ventilconvettori presenti nel fabbricato 4A sono stati sostituiti da ventilconvettori più performanti ed efficienti che hanno permesso di ridurre l'assorbimento di energia elettrica e di energia termica, sebbene questa in modo decisamente contenuto. La loro sostituzione è sicuramente necessaria vista l'età dei terminali presenti e lo stato in cui si presentavano alcuni di essi. Il vero vantaggio è la possibilità di maggior regolazione offerta dai nuovi ventilconvettori.

Grazie ai nuovi terminali è stato possibile abbinare una regolazione per singolo ambiente sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento, così da immettere in ogni locale solamente l'energia necessaria per raggiungere le condizioni desiderate. In aggiunta, grazie alla presenza di un inverter

installato a bordo dei ventilconvettori, è possibile ottenere un funzionamento con modulazione per ridurre gradualmente la potenza emessa man mano che si raggiunge il set point stabilito.

Per un controllo preciso e accurato della climatizzazione in ogni singolo locale dell'edificio è necessario servirsi di un sistema di supervisione che in maniera efficiente e automatica gestisca i flussi di energia. Questo sistema è il BMS e permette di gestire tutto l'impianto in maniera accurata grazie al fatto che controlla istante per istante lo stato dell'edificio e le condizioni di ciascun ambiente e in base ai dati raccolti dai sensori, esso ha l'abilità di coordinare le azioni di risposta, gestendo più sistemi contemporaneamente, senza metterli in conflitto tra di loro. Questo sistema inoltre può servirsi delle informazioni derivanti dai numerosi sensori installati in tutti i locali per prendere decisioni e ridurre gli sprechi di energia, come nel caso dei sensori di occupazioni abbinati all'impianto di climatizzazione.

Si è successivamente analizzato l'impatto della temperatura scelta e mantenuta nei locali durante l'anno, evidenziando come la scelta del Politecnico di Torino di ridurre di 1 °C la temperatura invernale e aumentare di 1 °C la temperatura estiva sia una decisione sostenibile che riduce le emissioni e i consumi.

In ultima battuta è stato integrato un impianto fotovoltaico per incrementare la quota di energia rinnovabile prodotta all'interno dell'Ateneo, evidenziando come la sua produzione possa totalmente coprire il fabbisogno di energia elettrica per la climatizzazione ed eventualmente altri servizi presenti nell'edificio.

Nel complesso, gli interventi sull'impianto di climatizzazione hanno permesso di ridurre il fabbisogno di energia primaria totale del 23,7% per il riscaldamento e del 16,3% per il raffrescamento rispetto alla richiesta attuale, evitando complessivamente l'emissione di 44,6 tonnellate di CO<sub>2</sub>. Considerando l'integrazione dell'impianto fotovoltaico, il fabbisogno di energia primaria totale si è ridotto del 26,1% per il riscaldamento e del 65,4% per il raffrescamento rispetto alla situazione attuale, evitando così l'emissione di 74,7 tonnellate di CO<sub>2</sub>.

I benefici ottenuti tramite l'efficientamento energetico proposto sono sicuramente notevoli ma questa valutazione tecnica dovrebbe essere affiancata da un'analisi economica per comprendere meglio l'investimento iniziale necessario e la fattibilità economica di questi interventi. Per questo motivo nel capitolo successivo sarà analizzata la riqualificazione energetica degli impianti anche dal punto di vista economico.

## 10. Valutazione economica degli interventi

### Introduzione

Gli interventi di efficientamento energetico proposti permettono all'edificio la riduzione dei consumi di energia e delle emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte. Come risultato si può ottenere un edificio più sostenibile ed efficiente, in linea con le politiche europee, nazionali e del Politecnico di Torino per la decarbonizzazione. Tuttavia, questi risultati possono essere raggiunti con interventi che necessitano di investimenti iniziali notevoli in termini economici e pertanto è fondamentale eseguire uno studio per comprendere la fattibilità economica. Un intervento di riqualificazione può risultare sulla carta molto conveniente se si considerano solamente i risparmi di energia ma potrebbe rivelarsi poco vantaggioso se si includono i costi di installazione e la gestione nel lungo periodo. Risulta quindi essenziale effettuare un'analisi costi-benefici che tenga conto di parametri come il tempo di ritorno dell'investimento e il flusso di cassa generato e che includa la possibilità di beneficiare di incentivi e detrazioni fiscali disponibili.

### Agevolazioni per gli interventi

Gli incentivi fiscali sono strumenti fondamentali per promuovere gli interventi di efficientamento energetico, con vantaggi che riguardano il patrimonio edilizio esistente ma anche le nuove costruzioni. La predisposizione di incentivi permette a chi ne beneficia di far rientrare l'investimento più velocemente rendendo più convenienti gli interventi di ristrutturazione e riqualificazione energetica e quindi stimolandone la domanda. Esistono diverse tipologie di agevolazioni destinate a soggetti pubblici o privati e che ogni anno vengono aggiornate dallo Stato. Questi incentivi solitamente prevedono alcune restrizioni e dei requisiti specifici da rispettare per poterne usufruire, come un avanzamento di classe energetica, limiti di spesa da rispettare o interventi ammessi. Queste restrizioni sono importanti al fine di incentivare solo gli interventi che effettivamente hanno come obiettivo l'aumento dell'efficienza energetica di un edificio. Tra le soluzioni disponibili per gli edifici pubblici vi è il Conto Termico che è l'agevolazione che è stata analizzata in questo lavoro di tesi per l'efficientamento energetico dell'edificio del Politecnico di Torino.

### Conto Termico

Quando si parla di Conto Termico si fa riferimento, dal punto di vista normativo, al Decreto MISE 16/02/2016, un decreto interministeriale di *“aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili”*.

In conformità a quanto previsto da questo Decreto, sono incentivabili gli interventi di riqualificazione energetica in edifici esistenti o parti di essi. I soggetti beneficiari previsti dal Decreto sono sia le Amministrazioni Pubbliche (PA), sia i soggetti privati. Per quanto concerne le PA, d'interesse per il caso studio analizzato in questa tesi, il Conto Termico finanzia una percentuale che varia dal 40% al 65% delle spese sostenute per gli interventi sull'involucro e sugli impianti che ne incrementano l'efficienza energetica. La percentuale di incentivo varia a seconda della tipologia di intervento, con

un tetto massimo erogabile per ciascuna categoria. Nella Figura 80 viene riportato un estratto della tabella riassuntiva con gli incentivi disponibili in relazione ai tipi di intervento che saranno analizzati in seguito.

TIPOLOGIA INTERVENTO	PERCENTUALE SPESA RICONOSCIBILE E INCENTIVO MASSIMO EROGABILE
<b>1.A Isolamento termico di superfici opache</b>	40% (*) (**) 400.000 €
* Per interventi realizzati nelle zone climatiche E e F, la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 50%.	
<b>1.G Installazione di tecnologie di building automation degli impianti termici ed elettrici degli edifici</b>	40% 50.000 €

Figura 80 – Incentivo massimo da Conto Termico per tipologia di intervento [14]

Gli interventi incentivabili dal Conto Termico riguardano le categorie riportate in Figura 81 e per ciascuna sono previsti requisiti precisi per averne accesso.

 <b>COIBENTAZIONE (1.A)</b> —	 <b>INFISSI (1.B)</b> —	 <b>CALDAIE A CONDENSAZIONE (1.C)</b> —	 <b>SISTEMI DI SCHERMATURA E/O OMBREGGIAMENTO (1.D)</b> —
 <b>nZEB "EDIFICI A ENERGIA QUASI ZERO" (1.E)</b> —	 <b>SISTEMI EFFICIENTI DI ILLUMINAZIONE (1.F)</b> —	 <b>BUILDING AUTOMATION (1.G)</b> —	 <b>POMPE DI CALORE (2.A)</b> —
 <b>CALDAIE E STUFE A BIOMASSE (2.B)</b> —	 <b>SOLARE TERMICO (2.C)</b> —	 <b>SCALDA ACQUA A POMPA DI CALORE (2.D)</b> —	 <b>IMPIANTI IBRIDI A POMPA DI CALORE (2.E)</b> —

Figura 81 – Interventi incentivabili da Conto Termico [14]

### 1.A) Coibentazione

“L’intervento incentivabile consiste nell’isolamento di coperture, pavimenti/solai e pareti perimetrali di edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione.”

Per ogni tipologia di superficie opaca (copertura, pavimento o parete) è definito un valore limite massimo di trasmittanza da rispettare per beneficiare dell'incentivo, in funzione della zona climatica:

[Tabella 1 – Allegato I – DM 16.02.16]		
Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia per la tecnologia	
Strutture opache orizzontali: isolamento coperture	Zona climatica A	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$
Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti	Zona climatica A	$\leq 0,43 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$
Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali	Zona climatica A	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica B	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica D	$\leq 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica E	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Zona climatica F	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$

Figura 82 – Requisiti minimi di trasmittanza termica richiesti da Conto Termico [15]

La Figura 83 riporta i valori necessari per il calcolo dell'incentivo:

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]			
Tipologia di intervento	Percentuale incentivata della spesa ammissibile (%spesa)	Costo massimo ammissibile (C <sub>max</sub> )	Valore massimo dell'incentivo (I <sub>max</sub> ) [€]
i. Strutture opache orizzontali <sup>13</sup> : <b>isolamento coperture</b>			(i+ii+iii) ≤ 400.000
Esterno	40 (*) (**)	200 €/m <sup>2</sup>	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m <sup>2</sup>	
Copertura ventilata	40 (*) (**)	250 €/m <sup>2</sup>	
ii. Strutture opache orizzontali: <b>isolamento pavimenti</b>			
Esterno	40 (*) (**)	120 €/m <sup>2</sup>	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m <sup>2</sup>	
iii. Strutture opache verticali: <b>isolamento pareti perimetrali</b>			
Esterno	40 (*) (**)	100 €/m <sup>2</sup>	
Interno	40 (*) (**)	80 €/m <sup>2</sup>	
Parete ventilata	40 (*) (**)	150 €/m <sup>2</sup>	

(\*) Per interventi realizzati nelle zone climatiche E e F la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 50%.

Figura 83 – Regole definite da Conto Termico per l'intervento di Coibentazione [15]

## 1.G) Building Automation

“L’intervento incentivabile consiste nell’installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico (Building Automation - BA) degli impianti termici ed elettrici degli edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione, compresa l’installazione di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore.”

In Figura 84 si riportano i limiti imposti dal regolamento del Conto Termico per il calcolo dell’incentivo:

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]		
Tipologia di Intervento	Costo massimo ammissibile ( $C_{max}$ )	Valore massimo dell’incentivo $I_{max}$ [€]
Installazione di tecnologie di <i>Building Automation</i>	25 €/m <sup>2</sup>	50.000

Figura 84 - Regole definite da Conto Termico per l’intervento di Building Automation [16]

L’incentivo viene erogato dal Gestore dei Servizi Energetici (GSE) sotto forma di rimborso a fondo perduto. L’erogazione in particolare avviene in un’unica soluzione se l’incentivo totale è pari o inferiore a 5000 €, altrimenti avviene tramite rate annuali. Nelle analisi economiche che verranno svolte in seguito sarà considerato un rimborso dilazionato su cinque anni.

### Descrizione delle variabili economiche analizzate

Nella valutazione economica degli interventi sono stati analizzati i seguenti parametri:

- Valore attuale netto (VAN) → è uno strumento di analisi finanziaria utilizzato per valutare la convenienza di un investimento, considerando la variazione del valore del denaro nel tempo. Il VAN rappresenta la somma dei flussi di cassa futuri attualizzati al presente, al netto dell’investimento iniziale. Se il VAN è positivo, l’investimento genera valore mentre se è negativo significa che non si raggiunge il rendimento minimo richiesto nel periodo considerato. Tale parametro viene impiegato per il confronto tra diversi tipi di intervento in modo da determinare quello ottimale in termini di costi-benefici. Il calcolo avviene secondo la seguente formula:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

Dove:

- $CF_t$  → flusso di cassa netto nel periodo  $t$  calcolato come differenza tra le uscite e le entrate;
- $r$  → tasso di interesse reale;
- $n$  → numero di periodi considerati;
- $(1+r)^{-t}$  → fattore di attualizzazione al tempo  $t$ .

Nel caso studio analizzato si tratta di un investimento nell’intervento di efficientamento energetico dell’edificio e ciò implica che le uscite del flusso di cassa corrispondano ai costi relativi all’intervento mentre le entrate sono rappresentate dai costi evitati grazie all’intervento

effettuato. La tipologia di intervento con il VAN più elevato è il più efficace poiché, nel periodo considerato, è quello genera più valore.

- Tempo di ritorno dell'investimento → rappresenta il tempo necessario per recuperare i fondi spesi nell'investimento iniziale, considerando il valore attuale dei flussi di cassa. Questo parametro indica quindi il numero di anni necessari per ottenere un VAN = 0. Il miglior tipo di intervento, tra quelli analizzati, è caratterizzato dal più alto VAN e il più basso tempo di ritorno.

### Elenco parametri input analisi

Il costo totale degli interventi è stato determinato considerando i costi delle singole voci relative all'intervento considerato, espresse nel computo metrico del progetto di fattibilità tecnico economica. Questi valori derivano dal prezzario della Regione Piemonte 2023.

L'analisi economica ha considerato i seguenti parametri di input:

- Costo dell'energia elettrica prelevata dalla rete = 0,245 €/kWh
- Costo dell'energia termica da teleriscaldamento = 0,08 €/kWh
- Aumento medio annuo del costo dell'energia elettrica = 1,7%
- Aumento medio annuo del costo dell'energia termica da teleriscaldamento = 2%
- Tasso di sconto = 5%
- Periodo analizzato = 30 anni.

### Costi attuali

Prima di procedere con la valutazione economica degli interventi di efficientamento è utile riportare i costi attuali legati all'acquisto dell'energia elettrica e termica per soddisfare il fabbisogno dell'edificio 4A.

Nella Tabella 56 sono riportati i consumi annui dei singoli vettori energetici per il riscaldamento, per il raffrescamento e il totale.

*Tabella 56 – Consumi energetici per servizio e per vettore energetico allo stato attuale*

Dettaglio dei consumi energetici allo stato attuale			
Vettore energetico	Riscaldamento	Raffrescamento	Totale
Teleriscaldamento	542.882 kWh	/	542.882 kWh
Energia Elettrica	12.588 kWh	68.336 kWh	80.924 kWh

I costi totali derivati dall'acquisto dei vettori energetici sono riportati nella Tabella 57:

Tabella 57 – Costo per vettore energetico allo stato attuale

Costi attuali		
Vettore Energetico	Costo unitario [13]	Costo totale annuo
Teleriscaldamento	0,08 €/kWh	43.431 €/anno
Energia Elettrica	0,245 €/kWh	19.826 €/anno
TOTALE		63.257 €/anno

Nella Tabella 58 sono invece riportati i costi dettagliati per singolo servizio di climatizzazione:

Tabella 58 – Costo per servizio allo stato attuale

Analisi dettagliata dei costi per servizio			
Servizio	Vettore energetico	Costo per vettore	Costo per servizio
Riscaldamento	Teleriscaldamento	43.431 €/anno	46.515 €/anno
	Energia Elettrica	3.084 €/anno	
Raffrescamento	Energia Elettrica	16.742 €/anno	16.742 €/anno
TOTALE			63.257 €/anno

Allo stato attuale la spesa annua per soddisfare il fabbisogno energetico dell'edificio 4A corrisponde ad un importo pari a 63.257 €. La riqualificazione energetica dell'edificio permetterà di ridurre tali costi a fronte di un investimento iniziale significativo. L'obiettivo di questa analisi economica è di determinare se gli interventi studiati siano fattibili ed efficaci anche dal punto di vista economico.

#### Intervento di efficientamento energetico degli impianti termici

La prima analisi economica è stata svolta riguardo la miglior soluzione di intervento di efficientamento energetico dei sottosistemi degli impianti di climatizzazione emersa tramite le simulazioni e i confronti eseguiti nel capitolo precedente. L'intervento studiato include dunque:

- Sostituzione delle condotte della rete di distribuzione con il rifacimento dell'isolamento termico delle tubature;
- Sostituzione dei terminali attualmente presenti con nuovi ventilconvettori;
- Predisposizione per una regolazione per singolo ambiente + climatica e con funzionamento PID per il riscaldamento;

- Predisposizione per una regolazione per singolo ambiente e con funzionamento tramite banda di modulazione di 1 °C per il raffrescamento;
- Integrazione del sistema BMS.

Questi interventi permettono di ridurre i consumi energetici dell'edificio e quindi la spesa annua come mostrato nella Tabella 59:

Tabella 59 – Risparmio annuo e spesa annua post-intervento

Vettore energetico	Consumo pre-intervento [kWh]	Consumo post-intervento [kWh]	Risparmio economico per vettore	Risparmio economico totale	Spesa annua post-intervento
Teleriscaldamento	542.882	417.849	10.003 €	13.795 €	49.462 €
Energia elettrica	80.924	65.446	3.792 €		

L'intervento garantisce un risparmio di 13.795 € annui, portando la spesa totale dell'energia dagli attuali 63.257 € a 49.462 €, corrispondente ad una riduzione del 21,8%.

L'investimento iniziale per ottenere tale miglioramento è pari a 1.387.636 € e include le voci riassunte nella Tabella 60. I costi degli interventi sono stati estratti dal computo metrico del progetto di fattibilità tecnico-economica e derivano dal Prezzario della Regione Piemonte 2023.

Tabella 60 – Elenco dei costi per l'intervento [5]

Categoria	Descrizione voci incluse	Costo intervento
Demolizioni	Distacco dall'impianto di tutti i corpi scaldanti, demolizione e rimozione di strutture, tubazioni e componenti dell'impianto, sgombero detriti, compenso alla discarica	75.190 €
Assistenze murarie	Assistenze murarie per gli impianti comprensive di apertura di nuove forometrie	8.314 €
Impianti di climatizzazione	Acquisto e installazione dei ventilconvettori, tubazioni, rubinetteria, valvole, raccordi, staffe, rivestimento isolante, mano d'opera di operai specializzati	652.004 €
Impianto elettrico	Realizzazione impianto a supporto degli impianti termici	179.039 €
Building Management System	Installazione del sistema di supervisione degli impianti meccanici	473.090 €
TOTALE		1.387.636 €

### Calcolo incentivo per l'intervento

L'intervento di riqualificazione considerato include l'installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico (sistema BMS) degli impianti termici e dunque rientra nella categoria 1.G "Building Automation" ammessa dal Conto Termico. L'incentivo in questione può coprire il 40% della spesa sostenuta per l'intervento fino ad un massimo erogabile pari a 50.000 €. Nella documentazione dell'incentivo sono specificate le spese ammissibili ai fini del calcolo del rimborso e viene riportato un costo massimo unitario da rispettare pari a 25 €/m<sup>2</sup>. Il calcolo dell'incentivo totale è determinato dalla seguente formula:

$$I_{tot} = 40 \% \cdot C \cdot S_{int}$$

Dove:

- C → costo specifico sostenuto calcolato come rapporto tra la spesa sostenuta e la superficie oggetto di intervento;
- S<sub>int</sub> → superficie oggetto di intervento.

Nel caso studiato la superficie interessata è pari a 9765,84 m<sup>2</sup> e, considerando l'elevata spesa stimata per l'intervento, il costo unitario supera il limite dichiarato dal regolamento; pertanto, ai fini del calcolo viene considerato il valore limite di 25 €/m<sup>2</sup>:

$$I_{tot} = 40 \% \cdot 25 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot 9765,84 \text{ m}^2 = 97.658,40 \text{ €} > 50.000 \text{ €}$$

Il valore calcolato è superiore rispetto all'importo massimo erogabile, di conseguenza potrà essere ottenuto un incentivo pari a 50.000 € che verrà erogato in 5 anni, per un importo annuo pari a 10.000 €.

### Analisi economica

Nella Tabella 61 è stato valutato l'andamento del flusso di cassa in un periodo di 30 anni considerando l'investimento iniziale, l'incentivo ottenibile dal Conto Termico e il risparmio economico ottenuto ogni anno tramite l'intervento effettuato, considerando anche l'aumento del costo dell'energia.

Tabella 61 – Analisi del flusso di cassa e del VAN

Anno	Spese sostenute per l'intervento	Risparmio annuo energia	Conto Termico	Flusso di cassa	VAN
0	- 1.387.636 €			- 1.387.636 €	- 1.387.636 €
1		14.071 €	10.000 €	- 1.363.565 €	- 1.298.634 €
2		14.347 €	10.000 €	- 1.339.219 €	- 1.214.711 €
3		14.622 €	10.000 €	- 1.314.596 €	- 1.135.598 €
4		14.898 €	10.000 €	- 1.289.698 €	- 1.061.038 €
5		15.174 €	10.000 €	- 1.264.524 €	- 990.788 €
6		15.450 €		- 1.249.074 €	- 932.078 €
7		15.726 €		- 1.233.348 €	- 876.517 €
8		16.002 €		- 1.217.346 €	- 823.948 €
9		16.278 €		- 1.201.068 €	- 774.219 €
10		16.554 €		- 1.184.514 €	- 727.189 €
11		16.830 €		- 1.167.685 €	- 682.721 €
12		17.105 €		- 1.150.579 €	- 640.686 €
13		17.381 €		- 1.133.198 €	- 600.959 €
14		17.657 €		- 1.115.541 €	- 563.424 €
15		17.933 €		- 1.097.607 €	- 527.968 €
16		18.209 €		- 1.079.398 €	- 494.485 €
17		18.485 €		- 1.060.913 €	- 462.873 €
18		18.761 €		- 1.042.152 €	- 433.036 €
19		19.037 €		- 1.023.116 €	- 404.882 €
20		19.313 €		- 1.003.803 €	- 378.323 €
21		19.589 €		- 984.215 €	- 353.276 €
22		19.864 €		- 964.350 €	- 329.663 €
23		20.140 €		- 944.210 €	- 307.408 €
24		20.416 €		- 923.794 €	- 286.439 €
25		20.692 €		- 903.101 €	- 266.688 €
26		20.968 €		- 882.133 €	- 248.092 €
27		21.244 €		- 860.889 €	- 230.588 €
28		21.520 €		- 839.370 €	- 214.118 €
29		21.796 €		- 817.574 €	- 198.627 €
30		22.072 €		- 795.502 €	- 184.061 €

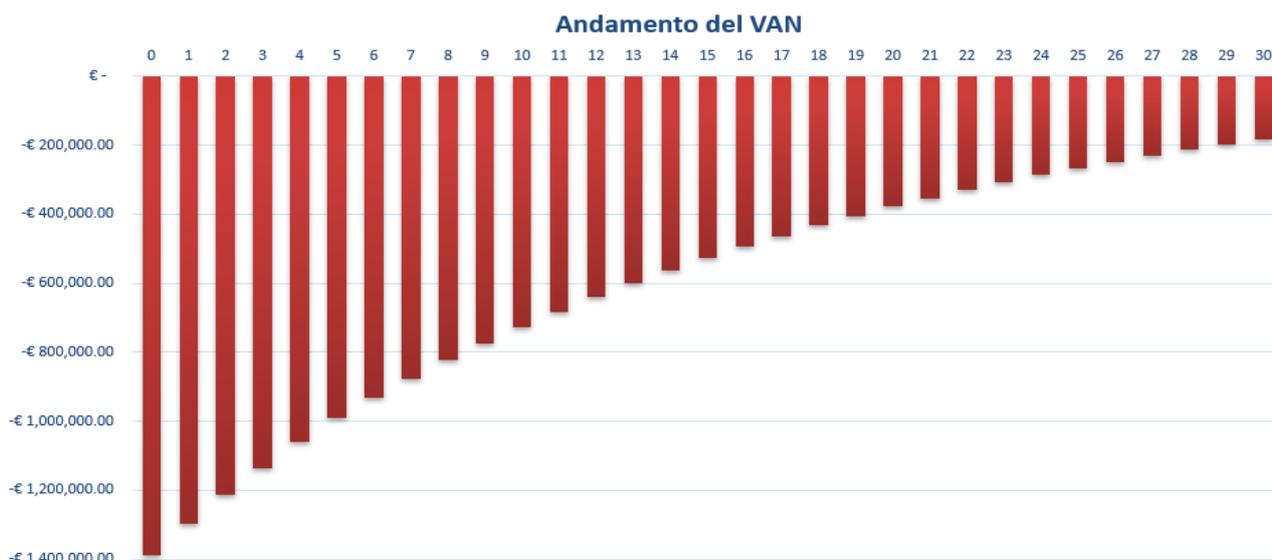


Figura 85 – Andamento del VAN

Il VAN a 30 anni risulta pari a -184.061 € ed essendo negativo indica che, nel periodo considerato, l'investimento iniziale non viene recuperato. Questo significa che i costi sostenuti per l'intervento sono maggiori rispetto ai benefici generati, rendendo l'investimento economicamente non conveniente. Tuttavia, l'analisi considera la sola riqualificazione degli impianti ed è probabile che se ad essa venissero affiancati altri tipi di intervento, i benefici potrebbero aumentare migliorando la sostenibilità economica del progetto.

### Integrazione dell'impianto fotovoltaico

L'installazione di un impianto fotovoltaico aumenta notevolmente la quota di energia rinnovabile utilizzata per soddisfare il fabbisogno degli impianti di climatizzazione. Oltre a questo aspetto, quest'intervento potrebbe anche rendere conveniente l'efficientamento energetico descritto in precedenza. Per verificare ciò è necessaria una seconda analisi economica che includa l'installazione dei pannelli fotovoltaici.

Considerando l'efficientamento energetico degli impianti termici e la presenza del sistema fotovoltaico, i consumi di energia si riducono ulteriormente e di conseguenza anche la spesa annua come riportato nella Tabella 62:

Tabella 62 – Risparmio annuo e spesa annua post-intervento

Vettore energetico	Consumo pre-intervento [kWh]	Consumo post-intervento [kWh]	Risparmio economico per vettore	Risparmio economico totale	Spesa annua post-intervento
Teleriscaldamento	542.882	417.849	10.003 €	29.829 €	33.428 €
Energia elettrica dalla rete	80.924	0	19.826 €		

L'intervento complessivo garantisce un risparmio di 29.829 € annui, portando la spesa annua totale per l'energia da 63.257 € a 33.428 €, corrispondenti ad una riduzione del 47,2% rispetto alla situazione attuale.

Prima di procedere con l'analisi dei costi è necessario fare una considerazione nei confronti dell'impianto fotovoltaico. Questo, infatti, è stato progettato in modo da sfruttare tutta la superficie disponibile in copertura e di conseguenza è sovradimensionato se si considerano solo gli impianti di climatizzazione. L'energia prodotta e non utilizzata sarà comunque sfruttata per soddisfare il fabbisogno elettrico degli altri servizi presenti nell'edificio sotto studio, come l'illuminazione o la ventilazione, oppure per gli edifici del Politecnico adiacenti. L'energia in surplus rappresenta di conseguenza un risparmio di energia elettrica che non viene prelevata dalla rete e quindi pagata. Il risparmio sui costi è stato ricalcolato dopo questa osservazione:

Tabella 63 – Risparmio annuo considerando il surplus dal fotovoltaico

Energia elettrica in surplus	Risparmio ottenuto grazie al surplus di energia prodotta	Risparmio economico totale
189.237 kWh	46.363 €	76.192 €

L'investimento iniziale dell'intervento complessivo è pari a 1.920.453 € e include le voci riassunte nella Tabella 64. I costi degli interventi sono stati estratti dal computo metrico del progetto di fattibilità tecnico-economica e derivano dal Prezzario della Regione Piemonte 2023.

Tabella 64 - Elenco dei costi per l'intervento [5]

Categoria	Descrizione delle voci incluse nel costo	Costo intervento
Efficientamento energetico impianti termici	Demolizioni, assistenze murarie, fornitura e posa in opera dei nuovi impianti di climatizzazione, realizzazione dell'impianto elettrico, sistema BMS	1.387.636 €
Pannelli fotovoltaici	Fornitura e posa in opera dei pannelli fotovoltaici, incluso il cablaggio e gli ottimizzatori	244.321 €
Inverter impianto	Fornitura e posa in opera dell'inverter per l'impianto fotovoltaico	34.160 €
Sistema di fissaggio	Fornitura e posa in opera del sistema di fissaggio dei pannelli fotovoltaici installati sulla copertura inclinata	34.950 €
Impianto elettrico	Impianto comprensivo di quadri elettrici, canalizzazioni, cavi e conduttori, certificazioni, opere accessorie	219.385 €
<b>TOTALE</b>		<b>1.920.453 €</b>

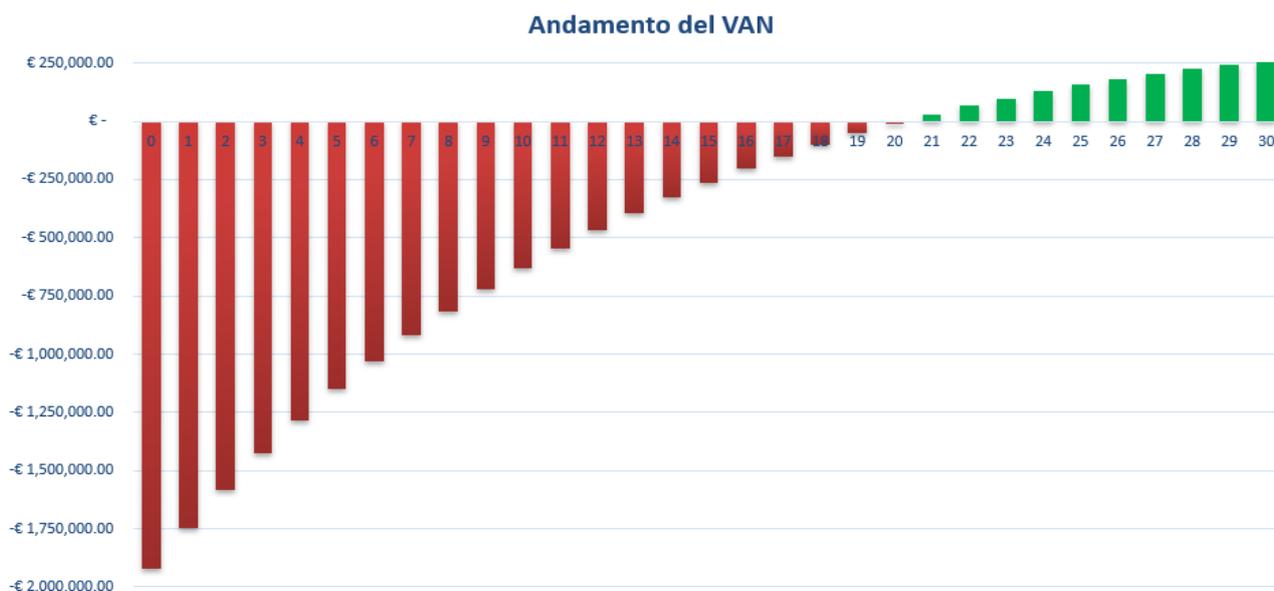
Per quanto riguarda il Conto Termico, l'incentivo che può essere sfruttato è lo stesso che è stato descritto in precedenza. Anche in questo caso, quindi, potranno essere erogati 50.000 €, distribuiti su 5 anni, per un importo annuo pari a 10.000 €.

## Analisi economica

Nella Tabella 65 è stato valutato l'andamento del flusso di cassa in un periodo di 30 anni considerando l'investimento iniziale, l'incentivo ottenibile dal Conto Termico e il risparmio economico ottenuto ogni anno tramite l'intervento e la produzione in surplus dell'impianto fotovoltaico, considerando anche l'aumento del costo dell'energia.

Tabella 65 - Analisi del flusso di cassa e del VAN

Anno	Spese sostenute per l'intervento	Risparmio annuo energia	Conto termico	Flusso di cassa	VAN
0	- 1.920.453 €			- 1.920.453 €	- 1.920.453 €
1		77.716 €	10.000 €	- 1.832.737 €	- 1.745.464 €
2		79.240 €	10.000 €	- 1.743.497 €	- 1.581.403 €
3		80.764 €	10.000 €	- 1.652.734 €	- 1.427.693 €
4		82.287 €	10.000 €	- 1.560.446 €	- 1.283.783 €
5		83.811 €	10.000 €	- 1.466.635 €	- 1.149.147 €
6		85.335 €		- 1.381.300 €	- 1.030.747 €
7		86.859 €		- 1.294.441 €	- 919.935 €
8		88.383 €		- 1.206.058 €	- 816.307 €
9		89.907 €		- 1.116.151 €	- 719.481 €
10		91.431 €		- 1.024.721 €	- 629.090 €
11		92.954 €		- 931.766 €	- 544.784 €
12		94.478 €		- 837.288 €	- 466.233 €
13		96.002 €		- 741.286 €	- 393.120 €
14		97.526 €		- 643.760 €	- 325.143 €
15		99.050 €		- 544.711 €	- 262.015 €
16		100.574 €		- 444.137 €	- 203.464 €
17		102.097 €		- 342.040 €	- 149.231 €
18		103.621 €		- 238.418 €	- 99.068 €
19		105.145 €		- 133.273 €	- 52.741 €
20		106.669 €		- 26.604 €	- 10.027 €
21		108.193 €		81.588 €	29.286 €
22		109.717 €		191.305 €	65.398 €
23		111.240 €		302.545 €	98.500 €
24		112.764 €		415.310 €	128.774 €
25		114.288 €		529.598 €	156.392 €
26		115.812 €		645.410 €	181.516 €
27		117.336 €		762.746 €	204.300 €
28		118.860 €		881.605 €	224.892 €
29		120.383 €		1.001.989 €	243.429 €
30		121.907 €		1.123.896 €	260.044 €



*Figura 86 - Andamento del VAN*

L'intervento proposto permette di ottenere un VAN a 30 anni pari a 260.044 € con un tempo di ritorno dell'investimento iniziale corrispondente a 21 anni. Il VAN positivo in questo caso indica che l'intervento genera valore e si ottiene così un guadagno che è superiore rispetto al capitale investito. Questa indagine, quindi, mette in evidenza la sostenibilità economica dell'intervento sebbene il tempo di ritorno non sia particolarmente breve. Per ridurre ulteriormente questo parametro e aumentare il VAN si potrebbero affiancare altri tipi di intervento su altri elementi dell'edificio, includendo ad esempio un sistema a cappotto o nuovi serramenti più efficienti che riducano le perdite energetiche.

### Conclusioni sui risultati ottenuti

Dopo aver analizzato dal punto di vista economico la fattibilità degli interventi di efficientamento energetico degli impianti di climatizzazione è possibile trarre alcune considerazioni finali.

La riqualificazione degli impianti rappresenta un investimento importante dal punto di vista dei costi e se è vero che da un lato consente la riduzione dei consumi e delle emissioni, dall'altro non sempre comporta benefici economici. Nel primo studio effettuato infatti la riduzione del fabbisogno energetico non è abbastanza elevata da giustificare un investimento così elevato e in 30 anni analizzati i soldi investiti in partenza non vengono mai recuperati. Nel secondo studio, tuttavia, si dimostra come affiancando più interventi su più fronti è possibile incrementare il risparmio di energia e, sebbene l'investimento iniziale sia maggiore rispetto al caso precedente, nell'arco dei 30 anni studiati si riesce a rientrare dell'investimento, generando del valore.

Gli incentivi sicuramente rappresentano un aiuto economico che può essere più o meno impattante nell'investimento complessivo. Nei casi analizzati i costi iniziali richiesti sono particolarmente elevati rispetto ai fondi che possono essere recuperati nei primi cinque anni ma in altri tipi di intervento possono sicuramente agevolare e incentivare una riqualificazione energetica.

Nella Tabella 66 sono riportati i parametri economici più importanti dei due interventi analizzati.

*Tabella 66 – Confronto parametri economici*

Intervento	Investimento iniziale	Accesso al Conto Termico	Incentivo da Conto Termico	VAN a 30 anni	Tempo di ritorno dell'investimento
Efficientamento energetico degli impianti termici	1.387.636 €	Sì	50.000 €	- 184.061 €	-
Efficientamento energetico degli impianti termici + installazione impianto fotovoltaico	1.920.453 €	Sì	50.000 €	260.044 €	21 anni

L'integrazione dell'impianto fotovoltaico rende conveniente e sostenibile l'intervento sugli impianti termici, recuperando l'investimento iniziale in 21 anni e generando un valore pari a 260.044 € a 30 anni di distanza.

Per ridurre ulteriormente il periodo di rientro e incrementare il VAN nel periodo studiato, potrebbe essere una soluzione affiancare altri tipi di intervento su altri elementi dell'edificio. Nel capitolo successivo sarà analizzato l'intervento di isolamento termico per le pareti perimetrali e il solaio del fabbricato 4A in abbinamento alla riqualificazione eseguita sugli impianti, al fine di comprendere i benefici raggiungibili sia in termini di consumi ed emissioni, sia dal punto di vista economico.

# 11. Isolamento termico dell'involucro edilizio

## Introduzione

Come anticipato nella premessa della tesi, lo studio sulla riqualificazione energetica dell'edificio 4A del Politecnico di Torino è stato sviluppato insieme ad un collega del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile con cui sono state analizzate diverse strategie di intervento relative all'ambito della progettazione edile e di quella impiantistica. In particolare, l'indagine del collega si è focalizzata sull'isolamento dell'involucro opaco dell'edificio andando ad analizzare diverse tecniche di coibentazione con vari materiali che differiscono in proprietà e prestazioni. L'analisi ha valutato diversi scenari di miglioramento dell'isolamento termico con interventi sulle pareti perimetrali e sul solaio, sia singolarmente e sia in combinazione. L'obiettivo dello studio è stato quello di identificare la miglior soluzione di isolamento per l'edificio 4A analizzando diversi parametri, come la variazione del fabbisogno energetico dell'edificio, il costo iniziale per l'intervento e il tempo di ritorno dell'investimento.

In questo capitolo sarà eseguita una valutazione delle prestazioni energetiche relativamente all'intervento complessivo che integra la miglior soluzione di isolamento termico dell'involucro opaco, emersa dallo studio del collega, alla miglior soluzione per l'ottimizzazione degli impianti di climatizzazione, individuata dallo studio svolto nei capitoli precedenti. Inoltre, sarà eseguita un'analisi economica per comprendere la fattibilità dell'intervento complessivo dal punto di vista dei costi e dei benefici.

## Isolamento dell'involucro edilizio

L'involucro edilizio è l'elemento che separa gli ambienti interni da quelli esterni e ricopre un ruolo chiave nel regolare gli scambi termici con l'ambiente esterno, influenzando sul fabbisogno energetico dell'edificio, sul comfort abitativo ma anche sulla durabilità della struttura. L'isolamento termico rappresenta una delle strategie più efficaci per migliorare l'efficienza energetica dell'intero edificio in quanto limita le dispersioni di calore nel periodo invernale e la possibilità di surriscaldamento a causa dell'irraggiamento solare nel periodo estivo. Un isolamento ben progettato limita le escursioni termiche, riducendo il fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, diminuendo in questo modo i consumi e le emissioni di CO<sub>2</sub>. L'adeguata coibentazione degli ambienti favorisce anche il comfort degli occupanti, mantenendo la temperatura più uniforme ed evitando zone troppo fredde o calde durante l'anno. Il corretto isolamento termico deve tenere in considerazione le caratteristiche dell'edificio e per questo motivo sono state svolte delle simulazioni utilizzando il modello dell'edificio 4A realizzato sul software EC700 di Edilclima per identificare le migliori opzioni.

## Miglior soluzione di isolamento termico

Le tecniche per isolare termicamente l'involucro opaco dell'edificio sono molteplici ma quella che risulta ottimale al caso studio analizzato è l'isolamento esterno con l'applicazione di uno strato di

materiale isolante sulla facciata esterna del fabbricato. Questa soluzione risulta essere la più indicata in quanto permette di preservare l'estetica dell'edificio e i volumi interni e al tempo stesso non è un intervento particolarmente invasivo per gli occupanti e per gli spazi interni.

Dopo la scelta della tecnica di isolamento, è stata svolta un'indagine per determinare il materiale isolante più adatto, tenendo in considerazione le diverse proprietà, come la conduttività termica, la massa volumica, la resistenza al vapore e il comportamento al fuoco. Oltre alle caratteristiche è stato analizzato anche lo spessore, che incide particolarmente sulla variazione delle prestazioni energetiche. Il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 stabilisce i valori limite di trasmittanza termica per le strutture dell'edificio, facendo una distinzione tra pareti verticali e solai. Per poter beneficiare degli incentivi da Conto Termico è necessario soddisfare valori massimi di trasmittanza termica ancora più stringenti rispetto alla normativa. La scelta complessiva del materiale e dello spessore necessario ha dunque tenuto in considerazione tutti questi fattori.

L'analisi delle prestazioni e la successiva valutazione economica svolte dal collega hanno identificato diverse soluzioni che rappresentano il miglior intervento se si considerano separatamente i consumi energetici post-intervento, l'investimento iniziale necessario e il tempo di ritorno. Tuttavia, se si considerano in contemporanea tutti questi parametri, la miglior scelta risulta essere:

- Isolamento delle pareti perimetrali con uno strato di 12 cm di lana di roccia;
- Isolamento del solaio con uno strato di 16 cm di lana di roccia.

Gli spessori in particolare sono stati scelti per poter beneficiare degli incentivi dal Conto Termico, rispettando quindi valori di trasmittanza termica più stringenti rispetto a quelli definiti dalla normativa. In allegato è presente la scheda tecnica del materiale selezionato per l'intervento.

In seguito all'intervento, considerando quindi la coibentazione, le pareti perimetrali (M1) sono caratterizzate da uno spessore di 50 cm e da una trasmittanza termica pari a  $0,217 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mentre il solaio dell'edificio (S4) è caratterizzato da uno spessore di 57 cm e da una trasmittanza termica pari a  $0,175 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Entrambi gli elementi, grazie all'isolamento, rispettano ora la verifica termoisolometrica.

Nella Tabella 67 viene riportata la nuova stratigrafia per le pareti perimetrali (M1) con le relative proprietà:

Tabella 67 - Proprietà termofisiche degli strati della parete perimetrale isolata (M1) [3][5]

N. Strato (da interno verso esterno)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduktività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Intonaco di calce e gesso	10	0,700	0,014	1400	1,00	10
2	Mattone forato	120	0,387	0,310	717	0,84	9
3	Intercapedine non ventilata	120	0,667	0,180	-	-	-
4	Mattone pieno	120	0,800	0,150	1800	0,84	9
5	Lana di roccia	120	0,032	3,750	32	1,03	1
6	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,900	0,011	1800	1,00	22

La Tabella 68 mostra invece la nuova stratigrafia per il solaio (P4) con le relative proprietà:

Tabella 68 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio isolato verso il tetto (P4) [3][5]

N. Strato (dall'alto verso il basso)	Descrizione strato	Spessore [mm]	Conduktività termica [W/mK]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacità termica specifica [kJ/kgK]	Resistenza al vapore in campo asciutto
1	Sottofondo di cemento magro	70	0,900	0,078	1800	0,88	30
2	Lana di roccia	160	0,032	5	32	1,03	1
3	C.I.s. armato	70	2,300	0,030	2300	1,00	130
4	Soletta in laterizio	250	0,660	0,379	1100	0,84	7
5	Intonaco di calce e gesso	20	0,700	0,029	1400	1,00	10

### Analisi dei consumi energetici

L'analisi delle prestazioni energetiche è stata eseguita separatamente sia per il riscaldamento e sia per il raffrescamento e sono stati analizzati diversi parametri, tra cui il fabbisogno di energia primaria, l'indice di prestazione energetica, il consumo dei vettori energetici e le emissioni di CO<sub>2</sub>. Il confronto è stato svolto tra lo stato attuale dell'edificio, lo stato post-intervento di riqualificazione degli impianti con l'integrazione del fotovoltaico e lo stato post-intervento complessivo, includendo dunque anche l'isolamento dell'involucro edilizio.

- Risultati per il riscaldamento

Tabella 69 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento

Analisi del fabbisogno energetico - Riscaldamento						
	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	490.339	5.916	496.255	50,21	0,61	50,82
Impianti + FV	358.514	8.250	366.764	36,71	0,84	37,56
Impianti + FV + isolamento involucro	162.336	3.883	166.219	16,62	0,40	17,02

L'isolamento termico dell'involucro edilizio ha un impatto notevole sui consumi energetici. L'intervento completo consente all'edificio di ridurre i consumi di energia primaria totale per il riscaldamento di 200.545 kWh rispetto all'intervento sugli impianti e con il fotovoltaico, passando da 366.764 kWh a 166.219 kWh, significando dunque un ulteriore calo del 54,7%.

Paragonando lo stesso parametro con quello relativo allo stato attuale dell'edificio, la combinazione di interventi permette una riduzione di ben 330.036 kWh, passando quindi da un fabbisogno di 496.255 kWh a 166.219 kWh, corrispondenti ad un taglio del 66,5% nei consumi. L'indice di prestazione energetica totale si è ridotto di 33,8 kWh/m<sup>2</sup>, passando da 50,82 kWh/m<sup>2</sup> a 17,02 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabella 70 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento

Consumi ed emissioni - Riscaldamento					
	Consumo teleriscaldamento [kWh]	Consumo energia elettrica prelevata dalla rete [kWh]	Consumo energia elettrica da impianto FV [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> teleriscaldamento [kg]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	542.882	12.588	0	162.865	5.791
Impianti + FV	417.849	0	8.250	125.355	0
Impianti + FV + isolamento involucro	189.203	0	3.883	56.761	0

Analizzando i consumi dei vettori energetici, rispetto all'intervento con l'efficientamento degli impianti termici e l'installazione del fotovoltaico, l'isolamento dell'involucro edilizio permette di ridurre la richiesta di energia termica dal teleriscaldamento di ulteriori 228.646 kWh, passando da 417.849 kWh a 189.203 kWh, uguali ad una variazione del - 54,7%. La richiesta di energia elettrica si riduce di 4367 kWh, passando da 8250 kWh a 3883 kWh, con un calo del 52,9%.

Dal confronto con lo stato attuale dell'edificio 4A emerge che la combinazione di interventi comporta un calo del fabbisogno di energia dal teleriscaldamento di 353.679 kWh, passando da 542.882 kWh a 189.203 kWh, con una riduzione del 65,1%, e un calo del fabbisogno di energia elettrica di 8705 kWh, passando da 12.588 kWh a 3883 kWh, con una variazione del - 69,2%. Le emissioni totali di CO<sub>2</sub> diminuiscono di 111,9 tonnellate, corrispondenti a un decremento del 66,3%, rispetto alla situazione attuale.

- Risultati per il raffrescamento

Tabella 71 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento

Analisi del fabbisogno energetico - Raffrescamento						
	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]
Stato attuale	133.254	32.118	165.372	13,64	3,29	16,93
Impianti + FV	0	57.196	57.196	0	5,86	5,86
Impianti + FV + isolamento involucro	0	63.727	63.727	0	6,53	6,53

Per quanto riguarda il raffrescamento, è possibile osservare che, includendo la coibentazione dell'involucro edilizio, il fabbisogno di energia primaria totale aumenta di 6531 kWh rispetto all'intervento di efficientamento degli impianti termici con l'installazione del fotovoltaico, passando da 57.196 kWh a 63.727 kWh, quindi con un incremento dell'11,4%. Questo aumento è dovuto al fatto che l'isolamento termico riduce le perdite di calore attraverso l'involucro durante l'inverno ma al contrario, durante il periodo estivo, trattiene maggiormente il calore generato all'interno o accumulato a causa dell'irraggiamento solare. Di conseguenza la temperatura degli ambienti interni può aumentare e l'energia necessaria per il raffrescamento deve essere quindi maggiore.

Tuttavia, se il confronto viene eseguito con lo stato attuale dell'edificio, l'energia primaria totale richiesta si riduce di 101.645 kWh, passando da 165.372 kWh a 63.727 kWh, con un calo del 61,5%, dimostrando come la combinazione di interventi comporti notevoli benefici anche per il raffrescamento. L'indice di prestazione energetica totale si riduce di 10,4 kWh/m<sup>2</sup>, passando da 16,93 kWh/m<sup>2</sup> a 6,53 kWh/m<sup>2</sup>, rispetto alla situazione attuale.

Tabella 72 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento

Consumi ed emissioni - Raffrescamento			
	Consumo energia elettrica prelevata dalla rete [kWh]	Consumo energia elettrica da impianto FV [kWh]	Emissioni CO <sub>2</sub> energia elettrica [kg]
Stato attuale	68.336	0	31.434
Impianti + FV	0	57.196	0
Impianti + FV + isolamento involucro	0	63.727	0

Analizzando i consumi di energia elettrica, si osserva che, coerentemente con quanto visto in precedenza, si ha un aumento di 6531 kWh rispetto all'intervento di efficientamento degli impianti con l'installazione del fotovoltaico. Allo stesso tempo, tuttavia, si registra una riduzione di 4609 kWh se il confronto viene eseguito con lo stato attuale dell'edificio, corrispondente ad un calo del 6,7%. Le emissioni di CO<sub>2</sub> vengono eliminate del tutto grazie alla presenza dell'impianto fotovoltaico, evitando in questo modo l'immissione in atmosfera di 31,4 tonnellate di anidride carbonica.

Se si prendono in considerazione le Tabelle 71 e 72 si può notare che, rispetto ai consumi attuali, la richiesta di energia primaria si riduce maggiormente rispetto a quella dell'energia elettrica. La differenza sostanziale è dovuta alla presenza dell'impianto fotovoltaico che è in grado di soddisfare l'intero fabbisogno elettrico per il raffrescamento, eliminando del tutto l'energia proveniente da fonti fossili. L'energia elettrica da fonti rinnovabili, come il Sole in questo caso, ha un fattore di conversione in energia primaria molto più basso rispetto alla stessa energia elettrica che viene prelevata dalla rete e che in Italia deriva soprattutto dall'utilizzo di gas naturale. Questa differenza nei fattori di conversione fa sì che il fabbisogno di energia primaria coincida con il fabbisogno di energia elettrica quando questa deriva dal fotovoltaico mentre sia di gran lunga superiore quando essa viene prelevata dalla rete.

### Risultati globali post-intervento

In seguito alla valutazione dei benefici ottenuti dall'intervento sull'involucro edilizio, è stata eseguita nuovamente una diagnosi energetica per evidenziare i risultati globali e per singolo servizio ottenuti nel complesso dall'ottimizzazione degli impianti con l'integrazione dell'impianto fotovoltaico e con l'isolamento dell'involucro edilizio. Nelle Tabelle 73 e 74 sono riportati i fabbisogni di energia primaria e gli indici di prestazione energetica con la variazione ottenuta rispetto allo stato attuale dell'edificio.

- Fabbisogno di Energia Primaria:

Tabella 73 - Fabbisogno di energia primaria post-intervento

	$E_{P,nren}$ [kWh]	$E_{P,ren}$ [kWh]	$E_{P,tot}$ [kWh]	Variazione rispetto allo stato attuale
RISCALDAMENTO	162.336	3.883	166.219	- 66,5%
RAFFRESCAMENTO	0	63.727	63.727	- 61,5%
Globale	162.336	67.609	229.945	- 65,2%

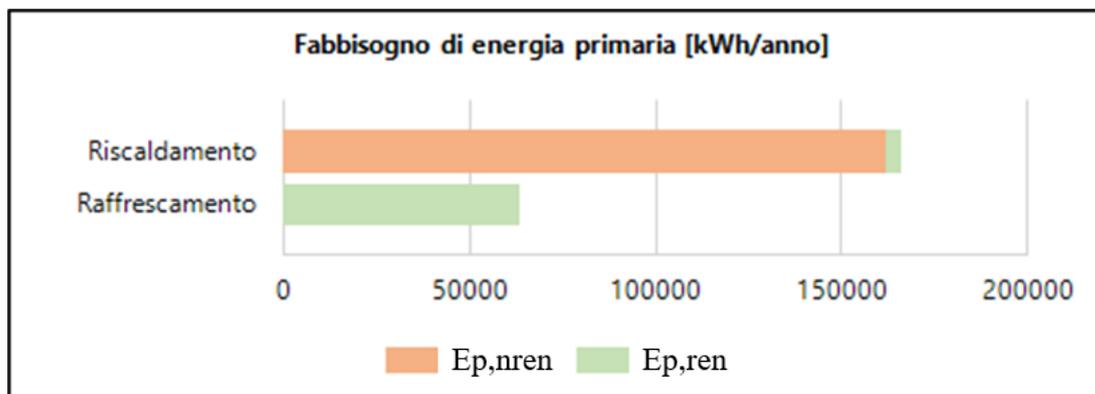


Figura 87 - Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e il raffrescamento

- Indice di Prestazione Energetica:

Tabella 74 - Indici di prestazione energetica post-intervento

	$EP_{nren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{ren}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$EP_{tot}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	Variazione rispetto allo stato attuale
RISCALDAMENTO	16,62	0,4	17,02	- 66,5%
RAFFRESCAMENTO	0	6,53	6,53	- 61,5%
Globale	16,62	6,92	23,55	- 65,2%

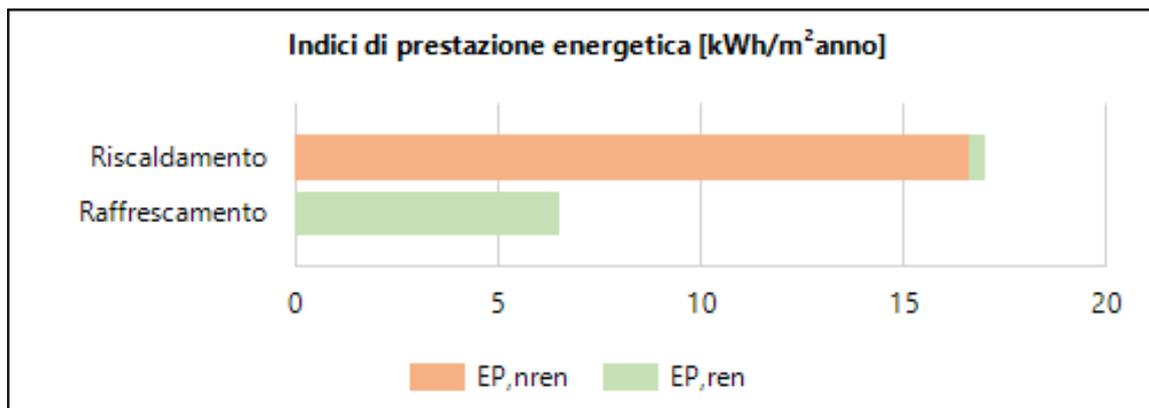


Figura 88 - Indici di prestazione energetica per il riscaldamento e il raffrescamento

In conclusione, si può affermare che l'intervento di isolamento termico dell'involucro edilizio sia un'ottima soluzione da integrare con l'ottimizzazione degli impianti di climatizzazione per la riqualificazione energetica dell'edificio 4A del Politecnico di Torino. I consumi energetici e le emissioni di CO<sub>2</sub> si riducono notevolmente sia per il riscaldamento e sia per il raffrescamento rispetto alla situazione attuale del fabbricato. Tuttavia, come nei casi precedenti, è fondamentale analizzare anche dal punto di vista dei costi l'impatto della combinazione di interventi per valutarne la fattibilità economica.

### Analisi economica

Attualmente l'edificio 4A del Politecnico di Torino è caratterizzato da un fabbisogno di energia termica dal teleriscaldamento pari a 542.882 kWh e di un fabbisogno di energia elettrica pari a 80.924 kWh. La spesa annua totale per soddisfare le richieste energetiche del riscaldamento e del raffrescamento dell'intero fabbricato ammonta a 63.257 €.

L'efficientamento energetico degli impianti termici con l'integrazione dell'impianto fotovoltaico installato in copertura e l'intervento di isolamento termico dell'involucro edilizio consentono una notevole riduzione dei consumi e ciò comporta un risparmio economico con la riduzione della spesa annua, come riportato nella Tabella 75.

Tabella 75 – Risparmio annuo e spesa annua post-intervento

Vettore energetico	Consumo pre-intervento [kWh]	Consumo post-intervento [kWh]	Risparmio economico per vettore	Risparmio economico totale	Spesa annua post-intervento
Teleriscaldamento	542.882	189.203	28.294 €	48.121 €	15.134 €
Energia elettrica prelevata dalla rete	80.924	0	19.826 €		

Nell'insieme, gli interventi analizzati consentono un risparmio di 48.121 €, portando la spesa totale per l'energia da 63.257 € a 15.134 €, con una riduzione del 76,1% rispetto all'importo iniziale.

Considerando che l'impianto fotovoltaico è stato ideato per sfruttare al massimo lo spazio libero in copertura, risulta sovradimensionato per i soli fabbisogni di energia elettrica del riscaldamento e del raffrescamento. L'energia prodotta e non utilizzata per la climatizzazione potrà essere impiegata per i fabbisogni elettrici degli altri servizi sia dell'edificio studiato e sia dei fabbricati dell'ateneo adiacenti. Questa energia in surplus rappresenta quindi un risparmio di energia elettrica che non viene prelevata dalla rete e dunque il risparmio economico è stato calcolato nuovamente considerando questo aspetto.

Tabella 76 – Risparmio annuo considerando il surplus dal fotovoltaico

Energia elettrica in surplus	Risparmio ottenuto grazie al surplus di energia prodotta	Risparmio economico totale
187.074 kWh	45.833 €	93.954 €

L'investimento iniziale totale per gli interventi descritti risulta essere pari a 2.632.875 € e include le voci descritte nella Tabella 77. I costi degli interventi sono stati estratti dal computo metrico del progetto di fattibilità tecnico-economica e derivano dal Prezziario della Regione Piemonte 2023.

Tabella 77 - Elenco dei costi per l'intervento [5]

Categoria	Descrizione voci incluse	Costo intervento
Efficientamento energetico impianti termici	Demolizioni, assistenze murarie, fornitura e posa in opera dei nuovi impianti di climatizzazione, realizzazione dell'impianto elettrico, sistema BMS	1.387.636 €
Impianto fotovoltaico	Fornitura e posa in opera dei pannelli fotovoltaici, dell'inverter, del sistema di fissaggio e realizzazione dell'impianto elettrico	532.817 €
Pannelli isolanti per le pareti perimetrali	Fornitura dei pannelli isolanti per l'isolamento termico delle pareti perimetrali	137.442 €
Mano d'opera isolamento pareti perimetrali	Posa in opera dei pannelli isolanti per le pareti perimetrali, compreso il carico, scarico, deposito e trasporto	426.317 €
Pannelli isolanti per il solaio	Fornitura dei pannelli isolanti per l'isolamento termico del solaio	58.936 €
Mano d'opera isolamento solaio	Posa in opera dei pannelli isolanti per il solaio, compreso il carico, scarico, deposito e trasporto	89.729 €
<b>TOTALE</b>		<b>2.632.875 €</b>

#### Calcolo incentivo per l'intervento

L'intervento totale può beneficiare dell'incentivo del Conto Termico per l'installazione di tecnologie di gestione e di controllo automatico degli impianti termici (categoria 1.G "Building Automation") ma anche dell'incentivo relativo all'isolamento di solai e pareti perimetrali di edifici esistenti dotati di impianto di climatizzazione (categoria 1.A "Coibentazione"). L'incentivo totale di cui si può beneficiare è dato dalla somma dei fondi recuperabili relativi ai due tipi di interventi.

L'incentivo per l'intervento sugli impianti termici è stato calcolato nel capitolo precedente e ammonta a 50.000 €, erogati in cinque anni per un rimborso annuo pari a 10.000 €.

L'incentivo disponibile per la coibentazione può coprire il 40% della spesa sostenuta per l'intervento relativo all'isolamento della copertura e il 40% della spesa sostenuta per l'intervento relativo all'isolamento delle pareti perimetrali, fino ad un massimo erogabile totale pari a 400.000 €. Tuttavia, la percentuale incentivata viene aumentata al 50% per entrambi i casi se l'edificio si colloca nelle zone climatiche E o F, come nel caso studio analizzato. Vengono inoltre specificate le spese ammissibili ai fini del calcolo e viene riportato un costo massimo per unità di superficie da rispettare pari a 200 €/m<sup>2</sup> per la copertura e 100 €/m<sup>2</sup> per le pareti perimetrali.

La spesa sostenuta per gli interventi di isolamento termico dell'involucro edilizio è ammissibile per il calcolo e pari a 712.422 €. Entrambi gli interventi rispettano il limite imposto relativo al costo massimo unitario in termini di superficie e di conseguenza l'incentivo che si può ottenere dal Conto Termico ammonta a 356.211 €, inferiori al limite massimo e che, erogati in cinque anni, corrispondono a un rimborso annuo pari a 71.424 €.

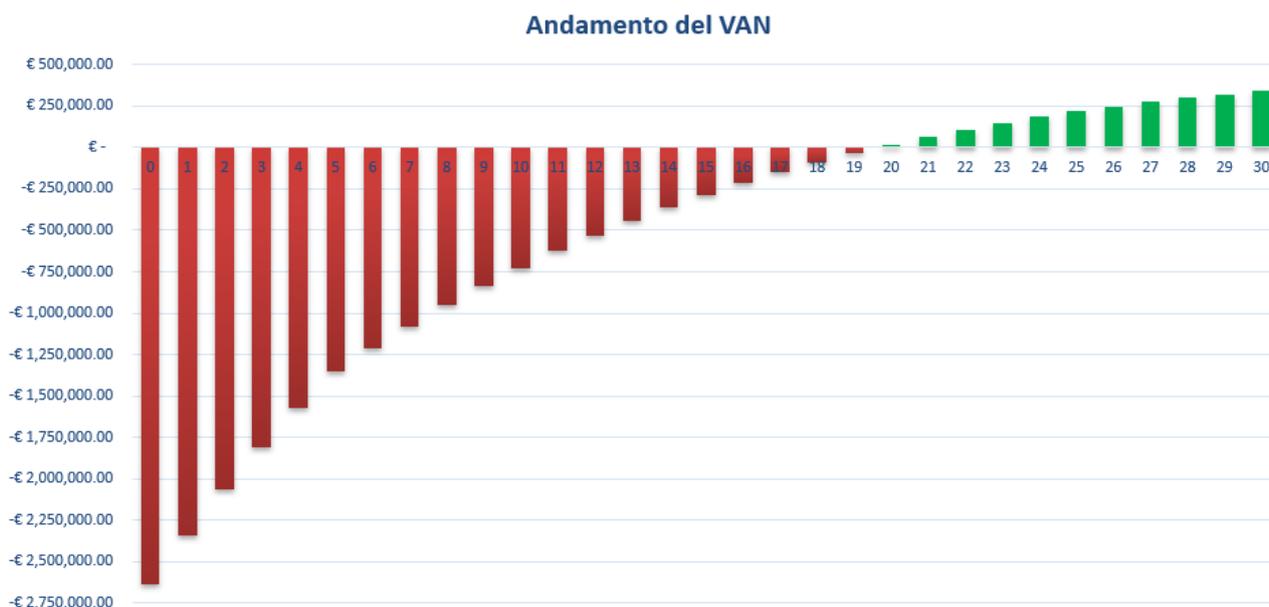
Il rimborso totale, dato dalla somma degli incentivi per i due tipi di intervento, ammonta a 406.211 €, pari a un rimborso annuo di 81.242 €.

### Analisi VAN

Nella Tabella 78 è stato valutato l'andamento del flusso di cassa in un periodo di 30 anni considerando l'investimento iniziale, l'incentivo ottenibile dal Conto termico e il risparmio economico ottenuto ogni anno tramite l'intervento e la produzione in surplus dell'impianto fotovoltaico, considerando anche l'aumento del costo dell'energia.

*Tabella 78 – Analisi del flusso di cassa e del VAN*

Anno	Spese sostenute per l'intervento	Risparmio annuo energia	Conto termico	Flusso di cassa	VAN
0	- 2.632.875 €			- 2.632.875 €	- 2.632.875 €
1		95.833 €	81.242 €	- 2.455.800 €	- 2.338.857 €
2		97.712 €	81.242 €	- 2.276.846 €	- 2.065.166 €
3		99.591 €	81.242 €	- 2.096.013 €	- 1.810.614 €
4		101.470 €	81.242 €	- 1.913.300 €	- 1.574.077 €
5		103.349 €	81.242 €	- 1.728.709 €	- 1.354.489 €
6		105.228 €		- 1.623.480 €	- 1.211.466 €
7		107.107 €		- 1.516.373 €	- 1.077.658 €
8		108.986 €		- 1.407.387 €	- 952.575 €
9		110.866 €		- 1.296.521 €	- 835.749 €
10		112.745 €		- 1.183.777 €	- 726.736 €
11		114.624 €		- 1.069.153 €	- 625.112 €
12		116.503 €		- 952.650 €	- 530.471 €
13		118.382 €		- 834.268 €	- 442.430 €
14		120.261 €		- 714.007 €	- 360.622 €
15		122.140 €		- 591.867 €	- 284.698 €
16		124.019 €		- 467.848 €	- 214.327 €
17		125.898 €		- 341.950 €	- 149.192 €
18		127.777 €		- 214.173 €	- 88.993 €
19		129.656 €		- 84.517 €	- 33.446 €
20		131.535 €		47.019 €	17.721 €
21		133.414 €		180.433 €	64.765 €
22		135.294 €		315.727 €	107.931 €
23		137.173 €		452.899 €	147.451 €
24		139.052 €		591.951 €	183.545 €
25		140.931 €		732.882 €	216.422 €
26		142.810 €		875.691 €	246.280 €
27		144.689 €		1.020.380 €	273.307 €
28		146.568 €		1.166.948 €	297.681 €
29		148.447 €		1.315.395 €	319.570 €
30		150.326 €		1.465.721 €	339.135 €



*Figura 89 - Andamento del VAN*

L'intervento complessivo permette di ottenere un VAN a 30 anni pari a 339.135 € con un tempo di ritorno dell'investimento iniziale corrispondente a 20 anni. Il VAN positivo indica che l'intervento genera valore ottenendo dunque un beneficio che è superiore rispetto a quanto è stato investito inizialmente. La sostenibilità economica dell'intervento è confermata dai risultati ottenuti, sebbene il tempo di ritorno non sia particolarmente breve.

### Conclusioni sui risultati ottenuti

Dopo aver analizzato l'intervento sia dal punto di vista delle prestazioni energetiche e sia dal punto di vista economico è possibile affermare che intervenire sull'involucro opaco dell'edificio studiato sia un'ottima soluzione per ridurre ulteriormente le dispersioni di energia e quindi i consumi e le emissioni. Le prestazioni energetiche migliorano notevolmente non solo rispetto alla situazione attuale ma anche nei confronti del solo intervento sugli impianti di climatizzazione, dimostrando quando sia impattante a livello energetico avere un corretto livello di isolamento delle pareti e del solaio.

Nella Tabella 79 sono riassunti i principali parametri energetici dei tre interventi analizzati:

*Tabella 79 – Confronto dei parametri economici*

Intervento	Investimento iniziale	Accesso al Conto Termico	Incentivo da Conto Termico	VAN a 30 anni	Tempo di ritorno dell'investimento
Efficientamento energetico degli impianti termici	1.387.636 €	Sì	50.000 €	- 184.061 €	-
Efficientamento energetico degli impianti termici + installazione impianto fotovoltaico	1.920.453 €	Sì	50.000 €	260.044 €	21 anni
Efficientamento energetico degli impianti termici + installazione impianto fotovoltaico + isolamento termico dell'involucro edilizio	2.632.875 €	Sì	406.211 €	339.135 €	20 anni

L'intervento complessivo può beneficiare di un incentivo decisamente superiore rispetto al rimborso ottenibile per la sola riqualificazione degli impianti termici. Questo permette di rientrare dall'investimento in meno tempo e generando più valore a distanza di 30 anni, nonostante il costo iniziale sia maggiore.

Il costo della riqualificazione degli impianti termici rappresenta una componente con un impatto notevole sull'investimento complessivo per l'efficientamento energetico dell'edificio. Il miglioramento delle prestazioni energetiche è garantito, sebbene l'impatto ottenuto sia inferiore rispetto ad altri tipi di intervento, come il caso analizzato della coibentazione dell'involucro. Quest'ultimo, infatti, oltre ad essere caratterizzato da un costo più contenuto, offre anche un risparmio maggiore in termini di consumi. Tuttavia, è necessario considerare che nel caso si volesse eseguire solamente un intervento di efficientamento dell'involucro, mantenendo gli stessi impianti attualmente presenti, la riduzione dei consumi sarebbe minore e l'efficienza energetica totale dell'edificio risentirebbe della presenza di impianti termici inefficienti.

Pertanto, è fondamentale valutare sempre con attenzione il rapporto costo-benefici di ciascun intervento, valutando strategie integrate che combinino diverse soluzioni di efficientamento energetico al fine di massimizzare le prestazioni dell'edificio.

## Conclusioni finali

Il lavoro di tesi ha posto come obiettivo la riqualificazione degli impianti per il riscaldamento e il raffrescamento degli spazi dell'edificio 4A del Politecnico di Torino. In particolare, lo scopo è stato quello di individuare i punti su cui un intervento di efficientamento energetico avrebbe potuto migliorare le prestazioni del fabbricato dal punto di vista dei consumi e delle emissioni, con un occhio orientato alla riduzione dei costi di gestione. Questo rappresenta uno dei punti chiave nel piano pluriennale di decarbonizzazione dell'Ateneo, il quale punta a raggiungere la neutralità carbonica entro il 2040.

La parte originaria dell'edificio 4A risale al 1958 mentre la sopraelevazione è stata realizzata nel 1992, pertanto era necessario un intervento di riqualificazione degli impianti per aumentare l'efficienza di climatizzazione. Le soluzioni di intervento a disposizione sono molteplici ed è stato dunque necessario analizzare le potenzialità e gli effettivi benefici ottenibili, tramite alcune analisi energetiche che, basandosi su delle simulazioni, hanno considerato la possibile risposta del fabbricato. Il confronto dei risultati ha fatto emergere alcune tipologie e strategie di intervento che permettono la maggior riduzione dei consumi di energia, garantendo agli occupanti degli spazi interni un adeguato comfort termico, relazionato alle attività svolte e migliorato rispetto alle condizioni attuali. In parallelo è stato eseguito uno studio economico per analizzare il risparmio ottenuto tramite l'efficientamento energetico degli impianti ma anche per comprendere la sostenibilità finanziaria degli interventi proposti considerando l'investimento iniziale e il ritorno economico in un periodo di 30 anni.

L'analisi energetica condotta sugli impianti dell'edificio sotto studio ha individuato come migliori interventi la sostituzione dei terminali con ventilconvettori più performanti e che consentono di introdurre una regolazione per singolo ambiente. Questo permette di regolare in maniera indipendente le condizioni di temperatura, umidità e qualità dell'aria, ottenendo un livello di comfort personalizzato per il singolo spazio. Per ottenere questo tipo di controllo è stato necessario introdurre un sistema BMS (Building Management System) che monitori, regoli e ottimizzi in maniera autonoma e automatica il funzionamento dell'intero impianto di climatizzazione. In aggiunta per incrementare l'efficienza è stata considerata la sostituzione dei condotti della rete di distribuzione con il rifacimento dell'isolamento termico per ridurre le dispersioni energetiche ed è stato introdotto un impianto fotovoltaico che permetta di soddisfare il fabbisogno elettrico degli impianti senza generare emissioni.

Nel complesso, rispetto alle prestazioni attuali dell'edificio, la combinazione di interventi descritta permette una riduzione del 35,9% nel consumo di energia primaria globale per la climatizzazione (- 26,1% per il riscaldamento; - 65,4% per il raffrescamento) ed evita la produzione di 74,7 tonnellate di CO<sub>2</sub>, corrispondenti ad un taglio del 37,3% rispetto alle emissioni attuali. Dal punto di vista economico, l'intervento permette di ridurre la spesa annua dagli attuali 63.257 € a 33.488 € (il risparmio sale a 76.192 € considerando il surplus di energia elettrica del fotovoltaico prodotta e non utilizzata per la climatizzazione ma a disposizione per gli altri servizi dell'Ateneo). La sostenibilità finanziaria della riqualificazione è stata confermata dall'analisi economica e il tempo di rientro sull'investimento è di 21 anni.

In parallelo allo studio per l'efficientamento energetico degli impianti di climatizzazione dell'edificio 4A, il collega del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile ha condotto per il suo lavoro di tesi un'analisi sull'intervento di isolamento termico dell'involucro edilizio dello stesso fabbricato. Di conseguenza si è ritenuto opportuno analizzare i benefici energetici ed economici ottenibili dalla combinazione delle migliori soluzioni emerse dallo studio degli impianti e dell'involucro edilizio. Il miglior isolamento per l'edificio analizzato risulta essere uno strato di lana di roccia di 12 cm applicato sul lato esterno delle pareti perimetrali e uno strato di 16 cm dello stesso materiale applicato sul lato esterno del solaio in copertura.

Dalle analisi energetiche condotte sull'edificio 4A emerge che, rispetto alle prestazioni attuali dell'edificio, gli interventi di efficientamento energetico sugli impianti in combinazione con l'isolamento termico dell'involucro edilizio consentono una riduzione del 65,2% nel consumo di energia primaria globale per la climatizzazione (- 66,5% per il riscaldamento; - 61,5% per il raffrescamento) ed evita la produzione di 143,3 tonnellate di CO<sub>2</sub>, corrispondenti ad un calo del 71,6% rispetto alle emissioni attuali. Analizzando il lato economico dell'intervento complessivo, è possibile beneficiare di una riduzione della spesa annua dagli attuali 63.257 € a 15.134 € (il risparmio sale a 93.954 € considerando anche in questo caso il surplus del fotovoltaico) e di rientrare dell'investimento iniziale in 20 anni.

I risultati dimostrano come la riqualificazione degli impianti consenta di migliorare l'efficienza energetica riducendo in maniera significativa i consumi di energia e le emissioni prodotte, soprattutto quando viene affiancata l'installazione di un impianto fotovoltaico che riduce il fabbisogno di energia da fonte fossile. L'intervento sull'involucro edilizio, tuttavia, è quello che permette di beneficiare della più grande riduzione del fabbisogno energetico, in quanto abbassa significativamente la quota di dispersione termica attraverso i componenti opachi dell'edificio e di conseguenza anche la richiesta per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti si abbassa notevolmente. Questo evidenzia il fatto che per ottenere una maggiore efficienza degli impianti sia necessario intervenire anche su altri elementi del fabbricato sotto studio pensando dunque ad una combinazione di più misure di efficientamento energetico.

In conclusione, è possibile affermare che il margine di miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio analizzato è particolarmente ampio e gli interventi descritti permetterebbero di ridurre notevolmente i consumi di energia e le emissioni di gas serra. A tali soluzioni si potrebbero affiancare altri tipi di interventi su altri elementi dell'edificio come sull'illuminazione o i componenti trasparenti in modo da aumentare i benefici ottenibili e ridurre ulteriormente l'impatto energetico del fabbricato.

I risultati dello studio confermano dunque che i punti definiti nel piano di decarbonizzazione del Politecnico di Torino possono contribuire in maniera piuttosto efficace a raggiungere la neutralità carbonica. Tale obiettivo richiede tuttavia di ampliare questa tipologia di interventi di riqualificazione energetica agli altri edifici che costituiscono la sede centrale dell'Ateneo, utilizzando anche i risultati ottenuti come possibili linee guida. È inoltre fondamentale considerare sempre sia le caratteristiche e sia le attività svolte nei singoli fabbricati in modo da ottenere per ciascuno di essi la miglior efficienza energetica possibile e massimizzare la sostenibilità del patrimonio edilizio dell'Ateneo.

# Bibliografia

## Fonti delle tabelle e delle figure

- [1] ENEA, CTI (2023). *Rapporto sulla Certificazione Energetica degli Edifici*. Roma: ENEA.  
<https://www.energiaenergetica.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=585&Itemid=101>.
- [2] Politecnico di Torino (2024). *Verso il piano di decarbonizzazione del Politecnico di Torino*.  
[https://www.polito.it/sites/default/files/2024-06/PdD\\_CdA\\_giu2024\\_IT.pdf](https://www.polito.it/sites/default/files/2024-06/PdD_CdA_giu2024_IT.pdf)
- [3] Ente Italiano di Normazione (2021). *UNI 10351:2021: Materiali da costruzione - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto*.  
<https://store.uni.com/en/uni-10351-2021>.
- [4] Ministero dei Lavori Pubblici, Provveditorato alle Opere Pubbliche per il Piemonte, Ufficio del Genio Civile di Torino (1958). *Politecnico di Torino Nuova Sede*.  
[https://digit.biblio.polito.it/secure/5377/1/Politecnico%20di%20Torino\\_Nuova%20sede\\_1958\\_ridotto.pdf](https://digit.biblio.polito.it/secure/5377/1/Politecnico%20di%20Torino_Nuova%20sede_1958_ridotto.pdf)
- [5] PROGES - Politecnico di Torino (2023). Documenti appartenenti al *Piano di fattibilità tecnico economica. Interventi di decarbonizzazione della sede centrale fabbricati C.so Castelfidardo, TO\_CEN04A*.
- [6] Brusasco, Fiameni, Gabetti, Giriodi, Mamino, Martineo, Novello, Tamagno, Torretta (1988). *Per la sede di Corso Duca degli Abruzzi*.
- [7] Ente Italiano di Normazione (2016). *UNI 10349:2016: Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1*.  
<https://store.uni.com/uni-10349-1-2016>
- [8] Team System, Logical Soft (2019). *Il nuovo calcolo dinamico italiano*.  
<https://www.logical.it/efficienza-energetica-edifici/in-arrivo-il-nuovo-calcolo-dinamico-italiano/>
- [9] Studio Madera (2024). *Regolazione impianto: termostato, centralina climatica, pid*.  
<https://www.studiomadera.it/news/180-regolazione-impianti-termici>
- [10] Consiglio Nazionale Ingegneri (2023). *Impianti Meccanici, Sistemi impiantistici e regolazione*.
- [11] AERMEC (2024). *Scheda tecnica terminali idronici a pavimento AERMEC FCZ*.  
<https://www.aermec.com/download/?id=15257>
- [12] AERMEC (2024). *Scheda tecnica terminali idronici a soffitto AERMEC FCL*.  
<https://www.aermec.com/download/?id=15961>
- [13] Dati estrapolati dalle bollette dell'anno 2023.

- [14] GSE - Gestore dei Servizi Energetici (2024). *Conto Termico*.  
<https://www.gse.it/servizi-per-te/efficienza-energetica/conto-termico/quote-incentivate>
- [15] GSE - Gestore dei Servizi Energetici (2024). *Le coibentazioni involucri (1.A) nelle regole applicative*.  
[https://www.gse.it/servizi-per-te\\_site/efficienza-energetica\\_site/conto-termico\\_site/interventi-incentivabili\\_site/Documents/Le%20COIBENTAZIONI%20\(1A\)%20nelle%20REGOLE%20APPLICATIVE.pdf](https://www.gse.it/servizi-per-te_site/efficienza-energetica_site/conto-termico_site/interventi-incentivabili_site/Documents/Le%20COIBENTAZIONI%20(1A)%20nelle%20REGOLE%20APPLICATIVE.pdf)
- [16] GSE - Gestore dei Servizi Energetici (2024). *Building Automation (1.G) nelle regole applicative*. [https://www.gse.it/servizi-per-te\\_site/efficienza-energetica\\_site/conto-termico\\_site/interventi-incentivabili\\_site/Documents/BUILDING%20AUTOMATION%20\(1G\)%20nelle%20REGOLE%20APPLICATIVE.pdf](https://www.gse.it/servizi-per-te_site/efficienza-energetica_site/conto-termico_site/interventi-incentivabili_site/Documents/BUILDING%20AUTOMATION%20(1G)%20nelle%20REGOLE%20APPLICATIVE.pdf)
- [17] FVG Energia (2015). *Tabella fattori di conversione in energia primaria*.  
<https://www.fvgenergia.it/export/sites/energia/documents/Tabella-fattori-di-conversione.pdf>
- [18] Vincenzo Corrado, Ilaria Ballarini (2023). *Materiale del corso “Energy Audit and certification of buildings”*.
- [19] European Commission. Software PVIGIS. [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en)

## Bibliografia generale

- ENEA (2023). *Rapporto sulla Certificazione Energetica degli Edifici 2023*.  
<https://www.energiaenergetica.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=585&Itemid=101>
- Consiglio dell'Unione Europea (2024). *Vite umane e denaro: il duplice costo dei cambiamenti climatici*. <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/climate-costs/>
- Enel Green Power (2024). *Transizione energetica e cambiamento climatico: cause e conseguenze*.  
<https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/transizione-energetica/cambiamento-climatico-cause-conseguenze>
- Parlamento Europeo (2019). *L'UE e l'Accordo di Parigi: verso la neutralità climatica*.  
<https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20191115STO66603/l-ue-e-l-accordo-di-parigi-verso-la-neutralita-climatica>
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2020). *L'Unione Europea e il clima*.  
<https://www.mase.gov.it/pagina/lunione-europea-e-il-clima>
- Consiglio Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2024). *Cambiamenti climatici: il contributo dell'UE*. <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/>
- Consiglio Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2024). *Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici*. <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/paris-agreement-climate/>
- IEA - International Energy Agency (2023). *Energy Efficiency 2023*.  
<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- M. Santamouris, K. Vasilakopoulou (2021). *Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671121000024>
- IEA - International Energy Agency (2019). *The Critical Role of Buildings*.  
<https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings>
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2024). *Efficienza energetica degli edifici*.  
<https://www.mase.gov.it/energia/efficienza-energetica/edifici>
- Politecnico di Torino (2024). *Piano di decarbonizzazione*. <https://www.polito.it/ateneo/campus-sostenibile/azioni-per-il-clima/piano-di-decarbonizzazione>
- Politecnico di Torino (2024). *Inventario delle emissioni*. <https://www.polito.it/ateneo/campus-sostenibile/azioni-per-il-clima/inventario-delle-emissioni>
- Politecnico di Torino (2017). *Documento programmatico Green Team*.  
[https://www.polito.it/sites/default/files/2022-10/GT\\_Documento%20Programmatico%20Green%20Team%202017.pdf](https://www.polito.it/sites/default/files/2022-10/GT_Documento%20Programmatico%20Green%20Team%202017.pdf)

- UNEP - United Nations Environment Programme (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- Commissione Europea (2020). *Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Un'ondata di ristrutturazioni per l'Europa: inverdire gli edifici, creare posti di lavoro e migliorare la vita*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0662>
- IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Climate Change 2023 Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2003). *Direttiva 2002/91*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2010). *Direttiva 2010/31*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2018). *Direttiva 2018/844*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0844>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2009). *Direttiva 2009/28*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0028>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2018). *Direttiva 2018/2001*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2006). *Direttiva 2006/32*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0032>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2012). *Direttiva 2012/27*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0027>
- Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea (2018). *Direttiva 2018/2002*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2002>
- Parlamento Italiano (2005). *Decreto Legislativo 192/2005*. <https://www.normattiva.it/esporta/attoCompleto?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2005-09-23&atto.codiceRedazionale=005G0219>
- Parlamento Italiano (2013). *Decreto Legislativo 63/2013*. <https://www.normattiva.it/atto/caricaDettaglioAtto?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2013-06-05&atto.codiceRedazionale=13G00107&atto.articolo.numero=0&atto.articolo.sottoArticolo=1&atto.articolo.sottoArticolo1=0&qId=44d8ca94-2822-43e0-9b0c-6d7e5866c512&tabID=0.03010542561359575&title=lbl.dettaglioAtto>

- Parlamento Italiano (2013). *Legge 90/2013*.  
<https://www.normattiva.it/atto/caricaDettaglioAtto?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2013-08-03&atto.codiceRedazionale=13G00133&atto.articolo.numero=0&atto.articolo.sottoArticolo=1&atto.articolo.sottoArticolo1=0&qId=48117428-a0a9-4006-8d73-33a033fc9b9b&tabID=0.03010542561359575&title=lbl.dettaglioAtto>
- Ministero dei Lavori Pubblici Provveditorato alle Opere Pubbliche per il Piemonte, Ufficio del Genio Civile di Torino (1958). *Politecnico di Torino Nuova Sede*.
- Giuseppe Maria Pugno (1959). *Storia del Politecnico di Torino*.
- Brusasco, Fiameni, Gabetti, Giriodi, Mamino, Martineo, Novello, Tamagno, Torretta (1988). *Per la sede di Corso Duca degli Abruzzi*.
- PROGES – Politecnico di Torino (2023). *Documenti appartenenti al Piano di fattibilità tecnico economica, Interventi di decarbonizzazione della sede centrale fabbricati C.so Castelfidardo, TO\_CEN04A*.
- Arch. Renato Piramide, Masterplan d’ateneo (2023). *Progetto esecutivo nuovi volumi zona nord*.
- Team System, Logical Soft (2019). *Il nuovo calcolo dinamico italiano*.  
<https://www.logical.it/efficienza-energetica-edifici/in-arrivo-il-nuovo-calcolo-dinamico-italiano/>
- ENEA (2019). *Linee guida per la diagnosi energetica degli edifici pubblici*.  
<https://www.energiaenergetica.enea.it/servizi-per/pubblica-amministrazione/riqualificazione-energetica-degli-edifici-della-pubblica-amministrazione/edilizia-pubblica-e-scolastica/linee-guida-per-la-diagnosi-energetica-degli-edifici-pubblici.html>
- Vincenzo Corrado, Ilaria Ballarini (2023). Materiale del corso “*Energy Audit and certification of buildings*”.
- Logical Soft, Quaderni Tecnici, Ing. Annachiara Castagna. *Calcolo dinamico orario secondo la UNI EN ISO 52016*.
- Edilclima Engineering & Software (2023). *EC700 – Manuale d’uso*.  
<https://www.edilclima.it/assets/repository/software/manuali/700-manuale.pdf>
- CTI - Comitato Termotecnico Italiano, Doc. Tecnici CTI (2019). *Validazione software: verifica degli strumenti di calcolo ai sensi dell’art.7 del D.M. 26 giugno 2015*.  
<https://www.cti2000.it/index.php?controller=sezioni&action=show&subid=62>
- Edilclima Engineering & Software (2023). *EC700 - Calcolo prestazioni energetiche degli edifici*.
- ENEA (2019). *Tecnologie per l'efficienza e il risparmio energetico negli edifici*.  
[https://www.tecnopolo.enea.it/tecnopolo/download/Gugliandolo%20\(2\).pdf](https://www.tecnopolo.enea.it/tecnopolo/download/Gugliandolo%20(2).pdf)
- ENEA (2019). *Approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato (UNI EN ISO 52016-1:2018) e applicazione al settore residenziale*.  
[https://www2.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds\\_ptr\\_2019\\_035.pdf](https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_035.pdf)

- Prof. Giuliano Cammarata (2016). *Impianti termotecnici – Volume 1 – Termofisica degli edifici*. <https://giulianocammarata.it/IMPIANTI%20TERMOTECNICI%20-%20VOLUME%201%20-%202016.pdf>
- ENEA, Assoimmobiliare (2019). *Benchmark di consumo energetico degli edifici per uffici in Italia*. [https://www.assoimmobiliare.it/wp-content/uploads/2019/10/Rapporto\\_Benchmark-Consumi-Uffici\\_Enea-Assoimmobiliare\\_2019-00000002.pdf](https://www.assoimmobiliare.it/wp-content/uploads/2019/10/Rapporto_Benchmark-Consumi-Uffici_Enea-Assoimmobiliare_2019-00000002.pdf)
- Studio Madera (2024). *Regolazione impianto: termostato, centralina climatica, pid*. <https://www.studiomadera.it/news/180-regolazione-impianti-termici>
- Bosch (2024). *I vantaggi della regolazione climatica*. <https://www.bosch-homecomfort.com/it/it/residenziale/informazioni/lo-sapevi-che/consigli-e-manutenzione/i-vantaggi-della-regolazione-climatica/>
- ACCA software S.p.A. (2023). *Sistemi di termoregolazione degli impianti termici*. <https://biblus.acca.it/termoregolazione-impianti-termici/>
- Ingenio (2022). *Come rifare l'impianto di riscaldamento*. <https://www.ingenio-web.it/articoli/come-rifare-l-impianto-di-riscaldamento/>
- Progetto 2000 (2012). *La regolazione della temperatura ambiente*. <https://www.edilclima.it/assets/repository/software/informazioni/710-artP2043-regolazione.pdf>
- Ingenio (2020). *Riqualificazione energetica: consigli sulla corretta scelta degli impianti termici*. <https://www.ingenio-web.it/articoli/riqualificazione-energetica-consigli-sulla-corretta-scelta-degli-impianti-termici/>
- Ingenio (2019). *Termosifoni, ventilconvettori o sistemi radianti? Una guida alla scelta ragionata*. <https://www.ingenio-web.it/articoli/termosifoni-ventilconvettori-o-sistemi-radianti-una-guida-alla-scelta-ragionata/>
- Consiglio Nazionale Ingegneri (2023). *Impianti Meccanici, Sistemi impiantistici e regolazione*.
- Ingenio (2022). *Cos'è e come scegliere un Building Management System (BMS) per lo smart building*. <https://www.ingenio-web.it/articoli/cos-e-e-come-scegliere-un-building-management-system-bms-per-lo-smart-building/>
- Siemens. *Desigo system*. <https://www.siemens.com/it/it/prodotti/buildingtechnologies/automation/desigo.html>
- Parlamento Italiano (2023). *Decreto-legge 34/2023*. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/03/30/23G00042/SG>
- GSE - Gestore dei Servizi Energetici. *Conto Termico*. <https://www.gse.it/servizi-per-te/efficienza-energetica/conto-termico>
- Ente Italiano di Normazione (2021). *UNI 10351:2021: Materiali da costruzione - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto*. <https://store.uni.com/en/uni-10351-2021>.

- ASHRAE Guideline 14-2023.
- Norme per la Caratterizzazione dell'involucro:
  - **UNI EN ISO 6946:2018** Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo
  - **UNI EN ISO 10077-1:2018** Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti – Calcolo della trasmittanza termica – Parte 1: Generalità
  - **UNI EN ISO 10077-2:2018** Prestazione termica di finestre, porte e chiusure – Calcolo della trasmittanza termica – Metodo numerico per i telai
  - **UNI EN ISO 10211:2018** Ponti termici in edilizia – Flussi termici e temperature superficiali – Calcoli dettagliati
  - **UNI EN 13363-1:2008** Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato
  - **UNI EN 13363-2:2006** Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato
  - **UNI EN ISO 13370:2018** Prestazione termica degli edifici – Trasferimento di calore attraverso il terreno – Metodi di calcolo
  - **UNI EN ISO 13786:2018** Prestazione termica dei componenti per edilizia – Caratteristiche termiche dinamiche – Metodi di calcolo
  - **UNI EN ISO 13788:2013** Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale – Metodo di calcolo
  - **UNI EN ISO 13789:2018** Prestazione termica degli edifici – Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione – Metodo di calcolo
  - **UNI EN ISO 14683:2018** Ponti termici in edilizia – Coefficiente di trasmissione termica lineica – Metodi semplificati e valori di riferimento
- Norme di supporto:
  - **UNI 10349:2016** Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici
  - **UNI 10351:2021** Materiali da costruzione – Conduttività termica e permeabilità al vapore
  - **UNI 10355:1994** Murature e solai – Valori di resistenza termica e metodo di calcolo
  - **UNI EN 410:2011** Vetro per edilizia – Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate
  - **UNI EN 673:2011** Vetro per edilizia – Determinazione della trasmittanza termica (valore U) – Metodo di calcolo
  - **UNI EN ISO 7345:2018** Isolamento termico – Grandezze fisiche e definizioni

## Indice delle figure

Figura 1 – Variazione della temperatura media annua rispetto al valore di riferimento (media 1981-2010) .....	6
Figura 2 – Consumo energetico totale degli edifici nel periodo 2010-2022 e scenari per il 2030 .....	8
Figura 3 – Distribuzione percentuale degli APE emessi nel 2021 e nel 2022 per classe energetica [1] .....	11
Figura 4 - Distribuzione percentuale degli APE per classe energetica per gli immobili residenziali (a) e non residenziali (b) [1].....	11
Figura 5 - Distribuzione dei valori medi dell'EP <sub>gl</sub> , dell'EP <sub>gl,nren</sub> , dell'EP <sub>gl,ren</sub> , dell'EP <sub>H,nd</sub> e delle emissioni di CO <sub>2</sub> per classe energetica per gli immobili residenziali e non residenziali [1].....	12
Figura 6 - Distribuzione dei valori medi dell'EP <sub>gl</sub> , dell'EP <sub>gl,nren</sub> , dell'EP <sub>gl,ren</sub> dell'EP <sub>H,nd</sub> e delle emissioni di CO <sub>2</sub> per anno di emissione dell'APE per gli immobili residenziali e non residenziali [1] .....	12
Figura 7 - Distribuzione degli APE per periodo di costruzione (a) e distribuzione percentuale degli APE per periodo di costruzione e classe energetica (b) [1] .....	13
Figura 8 – Emissioni di CO <sub>2</sub> prodotte dal Politecnico di Torino nel periodo 2018-2023 [2] .....	14
Figura 9 – Focus sugli scope 2 e 3 per le emissioni di CO <sub>2</sub> prodotte dal Politecnico di Torino nel periodo 2018-2023 [2] .....	14
Figura 10 – Calendario delle scadenze italiane ed europee in merito agli obblighi di utilizzo dell'energia rinnovabile .....	24
Figura 11 – Planimetria generale della sede centrale del Politecnico di Torino (1958) [4].....	28
Figura 12 – Vista assonometrica degli interventi di ampliamento (1988) [6] .....	30
Figura 13 – Foto dell'edificio oggetto di studio pre-intervento di ampliamento (1958) [5] .....	31
Figura 14 – Prospetto ovest dell'edificio oggetto di studio pre-intervento di ampliamento [6].....	31
Figura 15 - Prospetto ovest dell'edificio oggetto di studio post-intervento di ampliamento [6].....	32
Figura 16 - Pianta del secondo piano post-ampliamento con distribuzione degli spazi [5].....	32
Figura 17 – Vista dall'alto dell'edificio 4A (2023).....	33
Figura 18 – Dati climatici relativi alla posizione dell'edificio 4A [7].....	34
Figura 19 – Planimetria della sede centrale del Politecnico di Torino con disposizione e nomi dei fabbricati [5].....	35
Figura 20 – Vista satellitare dell'edificio 4A .....	35
Figura 21 – Dettaglio della manica stretta e della manica ampia dell'edificio 4A .....	36
Figura 22 – Foto della parete ovest dell'edificio 4A su Corso Castelfidardo [5] .....	37
Figura 23 - Foto della parete est dell'edificio 4A su loggia interna [5] .....	38
Figura 24 – Dettaglio della copertura dell'edificio 4A [5].....	38
Figura 25 – Dettaglio del sottotetto dell'edificio 4A [5].....	39
Figura 26 – Stratigrafia parete perimetrale (M1) .....	41
Figura 27 - Stratigrafia parete controterra (M2) .....	42
Figura 28 - Stratigrafia parete verso le scale (M3) .....	43
Figura 29 - Stratigrafia parete divisoria 1 (M4).....	44
Figura 30 - Stratigrafia parete divisoria 2 (M5).....	45
Figura 31 - Stratigrafia solaio controterra (P1).....	47

Figura 32 - Stratigrafia solaio interpiano (P2) .....	48
Figura 33 - Stratigrafia solaio sul porticato (P3).....	49
Figura 34 - Stratigrafia solaio verso il tetto (P4) .....	50
Figura 35 - Stratigrafia copertura del sottotetto (S1) .....	51
Figura 36 – Dettaglio di componenti trasparenti presenti nell’edificio 4A [5].....	53
Figura 37 – Dettaglio delle dorsali di distribuzione collocate nel sottotetto [5].....	54
Figura 38 – Dettaglio degli stacchi della rete di distribuzione nel sottotetto [5] .....	55
Figura 39 – Dettaglio dei montanti verticali della rete di distribuzione nell’intradosso delle pareti [5] .....	55
Figura 40 – Dettaglio ventilconvettore [5].....	55
Figura 41 – Dettaglio ventilconvettore [5].....	55
Figura 42 – Dettaglio ventilconvettore [5].....	56
Figura 43 – Dettaglio radiatore [5] .....	56
Figura 44 – Dettaglio della cappa di estrazione della ventilazione [5].....	56
Figura 45 – Schematizzazione del modello a parametri concentrati RC (resistenza capacità) [8]....	59
Figura 46 – Profilo orario di occupazione e di temperatura definito per i giorni dal lunedì al venerdì .....	64
Figura 47 - Profilo orario di occupazione e di temperatura definito per il sabato .....	64
Figura 48 – Parametri relativi alla ventilazione naturale .....	65
Figura 49 - Parametri relativi alla ventilazione forzata nei laboratori .....	65
Figura 50 – Firma energetica per il riscaldamento post-calibrazione .....	70
Figura 51 – Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e raffrescamento.....	72
Figura 52 – Indici di prestazione energetica per il riscaldamento e raffrescamento.....	73
Figura 53 – Emissioni di CO <sub>2</sub> prodotte dal riscaldamento e raffrescamento .....	74
Figura 54 – Vista assonometrica nord-ovest del modello dell’edificio 4A realizzato su Edilclima ..	75
Figura 55 - Vista assonometrica sud-est del modello dell’edificio 4A realizzato su Edilclima.....	75
Figura 56 – Flussi energetici relativi ai sottosistemi degli impianti termici (Generation, Storage, Distribution, Control, Emission) [18] .....	77
Figura 57 – Sezione del sottotetto con particolare relativo al progetto di rialzo della copertura e sostituzione delle dorsali [5] .....	80
Figura 58 – Estratto della tavola relativa al progetto per l’installazione delle nuove dorsali principali e gli stacchi per i montanti verticali (piano sottotetto) [5].....	81
Figura 59 – Esempio di curve di compensazione climatica [9] .....	82
Figura 60 – Esempio di banda proporzionale [10].....	84
Figura 61 – Particolare estratto dalla tavola di progetto relativa agli allacci del ventilconvettore a mobiletto [5].....	88
Figura 62 – Particolare estratto dalla tavola di progetto relativa al collocamento dei nuovi ventilconvettori a pavimento e a soffitto [5].....	88
Figura 63 – Architettura del sistema BMS Desigo di Siemens.....	90
Figura 64 – Software di interfaccia del sistema Desigo (Siemens) .....	91
Figura 65 – Ventilconvettore a pavimento AERMEC [11].....	95
Figura 66 - Ventilconvettore a soffitto AERMEC [12] .....	96
Figura 67 – Dati prestazionali dei ventilconvettori a pavimento AERMEC [11].....	96
Figura 68 - Dati prestazionali dei ventilconvettori a soffitto AERMEC [12].....	97

Figura 69 – Estratto della UNI TS 11300-2:2019 relativo ai rendimenti di emissione dei terminali installati in locali con altezza fino a 4 m per il riscaldamento .....	97
Figura 70 - Estratto della UNI TS 11300-2:2019 relativo ai rendimenti di emissione dei terminali installati in locali con altezza oltre a 4 m per il riscaldamento .....	98
Figura 71 – Estratto della UNI TS 11300-3:2010 relativo ai rendimenti di emissione dei terminali per il raffrescamento .....	98
Figura 72 – Estratto della UNI TS 11300-2:2019 relativo ai rendimenti di regolazione per il riscaldamento .....	100
Figura 73 - Estratto della UNI TS 11300-3:2010 relativo ai rendimenti di regolazione per il raffrescamento.....	104
Figura 74 – Dati dell’impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso Corso Castelfidardo [19] .....	115
Figura 75 – Produzione mensile dell’impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso Corso Castelfidardo [19] .....	115
Figura 76 - Dati dell’impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso gli edifici del Politecnico [19].....	116
Figura 77 - Produzione mensile dell’impianto fotovoltaico posizionato sulla falda verso gli edifici del Politecnico [19].....	116
Figura 78 - Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e raffrescamento .....	120
Figura 79 - Indici di prestazione energetica per il riscaldamento e raffrescamento .....	121
Figura 80 – Incentivo massimo da Conto Termico per tipologia di intervento [14].....	124
Figura 81 – Interventi incentivabili da Conto Termico [14] .....	124
Figura 82 – Requisiti minimi di trasmittanza termica richiesti da Conto Termico [15] .....	125
Figura 83 – Regole definite da Conto Termico per l’intervento di Coibentazione [15] .....	125
Figura 84 - Regole definite da Conto Termico per l’intervento di Building Automation [16] .....	126
Figura 85 – Andamento del VAN.....	132
Figura 86 - Andamento del VAN .....	135
Figura 87 - Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e il raffrescamento .....	143
Figura 88 - Indici di prestazione energetica per il riscaldamento e il raffrescamento .....	144
Figura 89 - Andamento del VAN .....	148

## Indice delle tabelle

Tabella 1 – Elenco degli elementi verticali dell’edificio con spessori e valori di trasmittanza termica [3][5] .....	40
Tabella 2 – Proprietà termofisiche degli strati della parete perimetrale (M1) [3][5] .....	41
Tabella 3 - Proprietà termofisiche degli strati della parete controterra (M2) [3][5] .....	42
Tabella 4 - Proprietà termofisiche degli strati della parete verso le scale (M3) [3][5] .....	43
Tabella 5 - Proprietà termofisiche degli strati della parete divisoria 1 (M4) [3][5] .....	44
Tabella 6 - Proprietà termofisiche degli strati della parete divisoria 2 (M5) [3][5] .....	45
Tabella 7 - Elenco dei solai dell’edificio con spessori e valori di trasmittanza termica [3][5] .....	46
Tabella 8 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio controterra (P1) [3][5] .....	47
Tabella 9 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio interpiano (P2) [3][5] .....	48
Tabella 10 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio sul porticato (P3) [3][5] .....	49
Tabella 11 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio verso il tetto (P4) [3][5] .....	50
Tabella 12 - Proprietà termofisiche degli strati della copertura del sottotetto (S1) [3][5] .....	51
Tabella 13 – Elenco dei serramenti dell’edificio con relative dimensioni e valori di trasmittanza termica [5] .....	52
Tabella 14 – Elenco delle zone termiche climatizzate con relative dimensioni .....	61
Tabella 15 – Zona termica non climatizzata con le relative dimensioni .....	62
Tabella 16 – Temperature di set point impostate per il riscaldamento e il raffrescamento .....	63
Tabella 17 – Apporti interni per i locali dell’edificio .....	63
Tabella 18 – Consumo attuale di energia per il riscaldamento [13] .....	67
Tabella 19 - Consumo attuale di energia per il raffrescamento [13] .....	68
Tabella 20 – Indici per la calibrazione del modello energetico (Riscaldamento) .....	71
Tabella 21 - Indici per la calibrazione del modello energetico (Raffrescamento) .....	71
Tabella 22 – Fabbisogno di energia primaria allo stato attuale .....	72
Tabella 23 – Indici di prestazione energetica allo stato attuale .....	73
Tabella 24 – Consumo dei vettori energetici ed emissioni di CO <sub>2</sub> prodotte allo stato attuale .....	74
Tabella 25 – Parametri analizzati nell’analisi energetica degli interventi .....	94
Tabella 26 – Fattori di conversione in energia primaria [17] .....	95
Tabella 27 – Elenco dei ventilconvettori a pavimento necessari per l’intervento di sostituzione dei terminali .....	95
Tabella 28 – Elenco dei ventilconvettori a soffitto necessari per l’intervento di sostituzione dei terminali .....	96
Tabella 29 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento .....	98
Tabella 30 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento .....	98
Tabella 31 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento .....	99
Tabella 32 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento .....	99
Tabella 33 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento .....	101
Tabella 34 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento .....	102

Tabella 35 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento .....	103
Tabella 36 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento.....	103
Tabella 37 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento .....	105
Tabella 38 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento .....	106
Tabella 39 – Spessori minimi dell’isolamento per i condotti di distribuzione definiti dal DPR 412/93 .....	107
Tabella 40 – Consumi energetici ed emissioni generate per diversi gradi di isolamento termico della rete di distribuzione.....	107
Tabella 41 – Variazione dei consumi e delle emissioni rispetto all’isolamento richiesto dal DPR 412/93 .....	108
Tabella 42 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento .....	109
Tabella 43 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento .....	109
Tabella 44 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento .....	110
Tabella 45 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento .....	111
Tabella 46 – Variazione del consumo energetico con o senza sensori di presenza per il riscaldamento .....	113
Tabella 47 - Variazione del consumo energetico con o senza sensori di presenza per il raffrescamento.....	113
Tabella 48 – Produzione totale e mensile dell’impianto fotovoltaico.....	117
Tabella 49 – Ripartizione tra i servizi dell’energia elettrica prodotta dall’impianto fotovoltaico ...	117
Tabella 50 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento .....	118
Tabella 51 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento .....	119
Tabella 52 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento .....	119
Tabella 53 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento .....	119
Tabella 54 - Fabbisogno di energia primaria post-intervento .....	120
Tabella 55 - Indici di prestazione energetica post-intervento .....	121
Tabella 56 – Consumi energetici per servizio e per vettore energetico allo stato attuale .....	127
Tabella 57 – Costo per vettore energetico allo stato attuale.....	128
Tabella 58 – Costo per servizio allo stato attuale.....	128
Tabella 59 – Risparmio annuo e spesa annua post-intervento .....	129
Tabella 60 – Elenco dei costi per l’intervento [5].....	129
Tabella 61 – Analisi del flusso di cassa e del VAN.....	131
Tabella 62 – Risparmio annuo e spesa annua post-intervento .....	132
Tabella 63 – Risparmio annuo considerando il surplus dal fotovoltaico .....	133
Tabella 64 - Elenco dei costi per l’intervento [5].....	133
Tabella 65 - Analisi del flusso di cassa e del VAN .....	134
Tabella 66 – Confronto parametri economici .....	136
Tabella 67 - Proprietà termofisiche degli strati della parete perimetrale isolata (M1) [3][5] .....	139

Tabella 68 - Proprietà termofisiche degli strati del solaio isolato verso il tetto (P4) [3][5].....	139
Tabella 69 – Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il riscaldamento .....	140
Tabella 70 – Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il riscaldamento .....	141
Tabella 71 - Fabbisogno di energia primaria e indici di prestazione energetica per il raffrescamento .....	141
Tabella 72 - Consumi dei vettori energetici ed emissioni generate per il raffrescamento .....	142
Tabella 73 - Fabbisogno di energia primaria post-intervento .....	143
Tabella 74 - Indici di prestazione energetica post-intervento .....	144
Tabella 75 – Risparmio annuo e spesa annua post-intervento .....	145
Tabella 76 – Risparmio annuo considerando il surplus dal fotovoltaico .....	145
Tabella 77 - Elenco dei costi per l'intervento [5].....	146
Tabella 78 – Analisi del flusso di cassa e del VAN.....	147
Tabella 79 – Confronto dei parametri economici.....	149

## Allegati

- Scheda tecnica dei pannelli in lana di roccia per la coibentazione dell'involucro edilizio



Scheda tecnico-commerciale  
**Isovver Arena32**  
**Isovver Arena32 K**  
**Isovver Arena32 Alu**

Pannello isolante termo acustico in **lana minerale** italiana, realizzata con materie prime naturali e riciclate e un legante a base di componenti organici e vegetali.

- **Arena32** - il pannello è senza rivestimenti
- **Arena32 K** - il pannello è rivestito su di una faccia con carta kraft (freno al vapore)
- **Arena32 Alu** - il pannello è rivestito su di una faccia con carta alluminio retinata (barriera al vapore)

CE EN 13162:2012  
+ A1:2015



### Applicazione

Isolamento termico e acustico di **pareti divisorie**, **contropareti** e **controsoffitti** (sistemi a secco) e pareti interne o perimetrali con intercapedine (sistemi tradizionali).

### Vantaggi

- Ottimo isolamento termico e acustico e protezione dal fuoco
- Sostenibilità, certificato **Eurofins Indoor Air Comfort GOLD** e con **EPD**
- Reazione al fuoco in classe **A1** – incombustibile (Arena32)
- Piacevole al tatto, rilascia poca polvere, confortevole
- Facilità di movimentazione e velocità di posa
- Rigidità e tenuta meccanica

### Stoccaggio

Il prodotto deve essere immagazzinato al coperto, in ambienti ben ventilati e lontano da fonti di calore dirette.

### Altre caratteristiche

Prodotto di agevole manipolazione e taglio, meccanicamente resistente, resistente all'insaccamento, imputrescibile, inattaccabile dalle muffe. Nelle previste condizioni d'impiego il prodotto è stabile nel tempo.

### Caratteristiche Tecniche

<u>Caratteristica</u>	<u>Valore</u>	<u>U.M.</u>	<u>Normativa</u>
Conducibilità termica dichiarata ( $\lambda_D$ )	0,032	W/mK	EN 12667
Densità nominale	32	Kg/m <sup>3</sup>	-
Classe di reazione al fuoco <b>Arena32</b> (senza rivestimento)	A1	-	EN 13501-1

**Isover Arena32**  
**Isover Arena32 K**  
**Isover Arena32 Alu**

Caratteristica	Valore	U.M.	Normativa
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo ( $\mu$ ) <b>Arena32</b>	1	-	EN 12086
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo ( $\mu$ ) <b>Arena32 K</b>	3.000	-	EN 12086
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo ( $\mu$ ) <b>Arena32 Alu</b>	9.000	-	EN 12086
Assorbimento d'acqua a breve periodo	$\leq 1$	Kg/m <sup>2</sup>	EN 1609
Tolleranze dimensionali: lunghezza	$\pm 2$	%	EN 822
Tolleranze dimensionali: larghezza	$\pm 1,5$	%	EN 822
Tolleranze dimensionali: spessore	T2	mm	EN 823
Squadratura	$\leq 5$	mm/m	EN 824
Planarità	$\leq 6$	Mm	EN 825
Stabilità dimensionale	$\leq 1$	%	EN 1604
Calore specifico	1.030	J/Kg*K	EN ISO 10456
Costante di attenuazione acustica	136	dB/m	EN ISO 717-1
Resistività al flusso d'aria	27	kPa*s/m <sup>2</sup>	EN 29053
Assorbimento acustico ( $a_w$ ) - 60 mm	1,0	-	EN ISO 11654

	Spessore (mm)	Resistenza termica dichiarata $R_D$ (m <sup>2</sup> K/W)	Dimensioni (m)	m <sup>2</sup> pallet
<b>Arena32</b>	45	1,40	0,60 x 1,45	153,12
	70	2,15	0,60 x 1,45	97,44
	95	2,95	0,60 x 1,45	69,60
	120	3,75	0,60 x 1,45	55,68
	140	4,35	0,60 x 1,45	55,68
<b>Arena32 K</b> <b>Arena32 Alu</b>	40	1,25	0,60 x 1,45	167,04
	50	1,55	0,60 x 1,45	139,20
	60	1,85	0,60 x 1,45	111,36
	80	2,5	0,60 x 1,45	83,52
	100	3,1	0,60 x 1,45	69,60
	120	3,75	0,60 x 1,45	55,68
	140	4,35	0,60 x 1,45	55,68

### Documenti e certificati disponibili

DOP: DoP-ARENA 32-01

[www.isover.it/prodotti/isover-arena32-arena32-k-arena32-alu](http://www.isover.it/prodotti/isover-arena32-arena32-k-arena32-alu)



### Saint-Gobain Italia S.p.A.

Via G. Bensi, 8 • 20152 Milano •  
[info.it.isover@saint-gobain.com](mailto:info.it.isover@saint-gobain.com) | [www.isover.it](http://www.isover.it)

Registro Imprese: Milano n. 08312170155 • R.E.A.: Milano n. 1212939  
 Capitale Sociale: Euro 77.305.082,40 i.v. • Codice Fiscale e P. IVA: 08312170155  
 Soggetta ad attività di direzione e coordinamento di Saint-Gobain Produits Pour la Construction S.A.S.

**ISOVER**  
 SAINT-GOBAIN

Le informazioni contenute in questa scheda tecnica sono il risultato delle conoscenze disponibili alla data di pubblicazione. Saint-Gobain Italia S.p.A. non si assume alcuna responsabilità per danni a persone o cose derivanti da un uso improprio di tali informazioni e si riserva il diritto di modificare i dati senza preavviso.

03/2022

- Planimetrie dell'edificio con le zone termiche

### PIANTA ZONE TERZO PIANO



ZONA UFFICI NORD P3    ZONA LABORATORI EST P3    ZONA COMUNI P3    ZONA SERVIZI P3    ZONA UFFICI OVEST P3    ZONA UFFICI EST P3

### PIANTA ZONE SECONDO PIANO



ZONA UFFICI NORD P2    ZONA LABORATORI EST P2    ZONA COMUNI P2    ZONA SERVIZI P2    ZONA UFFICI OVEST P2    ZONA UFFICI EST P2

### PIANTA ZONE PRIMO PIANO



ZONA LABORATORI EST P1    ZONA COMUNI P1    ZONA SERVIZI P1    ZONA UFFICI OVEST P1    ZONA UFFICI EST P1

### PIANTA ZONE PIANO TERRA



ZONA LABORATORI OVEST PT    ZONA LABORATORI EST PT    ZONA COMUNI PT    ZONA SERVIZI PT    ZONA UFFICI OVEST PT    ZONA UFFICI EST PT

### PIANTA ZONE PIANO INTERRATO



ZONA LABORATORI OVEST ST    ZONA LABORATORI EST ST    ZONA COMUNI ST    ZONA SERVIZI ST