

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

**Diagnosi Energetica e Riqualificazione della sede ARPA
Piemonte di Novara**



Relatori

Prof. Vincenzo Corrado
Prof. Marco Filippi

Candidato

Gioele Salvatore Marino

Marzo 2024

Abstract

La tesi si concentra sulla diagnosi energetica della sede ARPA di Novara, condotta in condizioni reali di utilizzo. L'obiettivo è identificare e quantificare i fattori che influenzano maggiormente il consumo energetico per proporre degli interventi mirati ad ottimizzare l'efficienza energetica dell'edificio. L'analisi viene svolta utilizzando il metodo dinamico orario, in linea con le norme UNI EN 52016-1 e UNI EN 52017-1, che considera le variazioni orarie e giornaliere delle condizioni meteorologiche e di funzionamento, nonché le interazioni dinamiche per il riscaldamento e il raffreddamento, attraverso il software Edilclima. La ricerca si articola in tre parti: raccolta dati attraverso sopralluoghi e analisi dei consumi, realizzazione e calibrazione del modello dello stato di fatto e valutazione delle misure di efficienza energetica. Lo studio segue un duplice approccio: progressivo, in linea con il "Passaporto di Ristrutturazione" della Direttiva EPBD, e integrato, che considera l'implementazione simultanea di tutte le misure proposte. I risultati evidenziano un miglioramento significativo dell'efficienza energetica, con interventi che includono l'isolamento dell'involucro opaco, la sostituzione degli attuali impianti per il riscaldamento e il raffrescamento e l'integrazione di fonti rinnovabili. Il lavoro offre una panoramica completa delle sfide e delle opportunità nel campo dell'efficienza energetica, offrendo soluzioni concrete per il futuro e contribuendo agli sforzi nazionali ed europei per un futuro energetico sostenibile, in accordo con gli obiettivi dell'Unione Europea.

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine ai miei relatori, i professori Vincenzo Corrado e Marco Filippi, per essere stati guide fondamentali durante l'elaborazione della mia tesi. La loro disponibilità e generosità nel condividere le proprie conoscenze hanno arricchito significativamente il mio lavoro di ricerca, permettendomi di affrontare con chiarezza gli argomenti trattati.

Un ringraziamento particolare va al professor Marco Carlo Masoero, che ha giocato un ruolo cruciale nel mio percorso accademico proponendomi il tema della presente tesi e manifestando fiducia nelle mie capacità.

Desidero ringraziare Arpa Piemonte, in particolare il Dott. Mauro Porta, l'Ing. Herbert Sarri e tutto il team dell'Ufficio Tecnico, per avermi fornito tutti gli strumenti e le informazioni necessarie per il mio lavoro. La loro disponibilità quotidiana e il loro supporto hanno reso il mio percorso di ricerca estremamente produttivo e gratificante. Inoltre, l'accoglienza ricevuta presso i loro uffici ha ulteriormente arricchito la mia esperienza sia dal punto di vista formativo che umano.

Non posso non ringraziare immensamente la mia famiglia, cuore pulsante del mio viaggio accademico e personale, per il loro sostegno e incoraggiamento costanti. È grazie ai sacrifici e all'amore dei miei genitori che ho potuto dedicarmi con serenità agli studi, concentrandomi pienamente sui miei obiettivi e al raggiungimento di questo traguardo. Ringrazio le mie sorelle e mio fratello: insieme abbiamo condiviso momenti di gioia e spensieratezza che hanno alleggerito le sfide più impegnative di questo percorso.

Voglio fare un ringraziamento speciale a Serena, la mia ragazza, per essere stata la mia roccia e la mia certezza in questi anni. Senza di lei, senza il suo amore, non sarei riuscito a superare gli ostacoli che ho incontrato dentro e fuori l'ambito universitario. Mi ha reso migliore giorno dopo giorno, mi ha insegnato a credere nelle mie capacità

e a non arrendermi, incoraggiandomi costantemente e rimanendo al mio fianco in ogni situazione.

Un sincero e profondo ringraziamento va alla famiglia Miglietta per avermi fatto sentire parte del loro splendido nucleo. Non posso dimenticare l'affetto, l'ospitalità e la generosità che mi hanno dimostrato in questi anni.

Grazie a tutti gli amici, quelli veri, che hanno scelto di dedicare tempo e impegno alla nostra amicizia. Essere importanti per qualcuno e ricambiare quel sentimento è un dono prezioso che non andrebbe mai dato per scontato.

Ringrazio calorosamente i miei parenti per il loro sostegno e le parole di incoraggiamento. Hanno assistito alla mia crescita e al raggiungimento di questo traguardo, festeggiando ogni successo come fosse il loro.

Infine, desidero ringraziare il personale medico e sanitario che mi ha assistito nel periodo più difficile della mia vita. La loro competenza e umanità hanno reso possibile la mia guarigione, consentendomi di abbracciare di nuovo la vita e di sognare un futuro di gioia e successi insieme alle persone che mi vogliono bene.

Indice

ABSTRACT	I
RINGRAZIAMENTI	III
INTRODUZIONE.....	1
1 LO SCENARIO ENERGETICO	3
1.1 CRISI ENERGETICA: L'ANALISI DELLA IEA	3
1.2 POLITICHE EUROPEE E NAZIONALI	5
2 L'EFFICIENTAMENTO DEGLI EDIFICI	8
2.1 QUADRO DEGLI INTERVENTI.....	8
2.2 LA DIAGNOSI ENERGETICA NEL SETTORE PUBBLICO	9
2.3 STRUMENTI DI INCENTIVAZIONE.....	16
3 IL SOFTWARE DI MODELLAZIONE	18
3.1 IL METODO DINAMICO ORARIO	18
3.1.1 DATI DI INPUT	20
3.1.2 ALGORITMO DI CALCOLO.....	21
3.2 EDILCLIMA	23
4 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO (STATO DI FATTO)	25
4.1 PRESENTAZIONE GENERALE DEL SITO	25
4.2 DATI CLIMATICI.....	27
4.3 DESCRIZIONE DELL'INVOLUCRO	28
4.3.1 MURO ESTERNO PERIMETRALE.....	30
4.3.2 MURO INTERNO DIVISORIO	31
4.3.3 SOLAIO DI TERRA.....	33
4.3.4 SOLAIO INTERPIANO.....	34
4.3.5 SOLAIO DI COPERTURA	35
4.3.6 SERRAMENTI CON VETRO SINGOLO	36

4.3.7 SERRAMENTI CON VETRO DOPPIO	37
4.3.8 PONTI TERMICI.....	38
4.4 DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI.....	42
4.4.1 IMPIANTO DI RISCALDAMENTO E DI PRODUZIONE DELL'ACS.....	42
4.4.2 INTEGRAZIONI DELL'IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	49
4.4.3 IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO.....	49
4.4.4 IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	50
4.4.5 SISTEMA DI ASPIRAZIONE MECCANICA.....	51
4.5 ZONE TERMICHE.....	53
4.6 ANALISI DEI CONSUMI	54
4.6.1 CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA	55
4.6.2 CONSUMI DI GAS METANO.....	58
4.7 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE POST CALIBRAZIONE	60
4.7.1 FIRMA ENERGETICA E CALIBRAZIONI	61
4.7.2 INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA	65
5 MISURE DI EFFICIENZA ENERGETICA	68
5.1 INTERVENTI SULL'INVOLUCRO.....	68
5.1.1 COIBENTAZIONE DELLA COPERTURA	69
5.1.2 ISOLAMENTO DEL MURO PERIMETRALE.....	71
5.1.3 SOSTITUZIONE DEI SERRAMENTI E DELLE CHIUSURE OSCURANTI	73
5.1.4 CORREZIONE DEI PONTI TERMICI.....	75
5.1.5 PROGETTO COMPLESSIVO DELL'INVOLUCRO.....	81
5.2 INTERVENTI SUGLI IMPIANTI.....	81
5.2.1 SOSTITUZIONE DELL'IMPIANTO TERMICO.....	81
5.2.2 SOSTITUZIONE DELLE UNITÀ AUTONOME A POMPA DI CALORE.....	91
5.2.3 INSTALLAZIONE DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO	96
5.3 PROGETTO INTEGRATO	100
5.3.1 L'IMPIANTO TERMICO	101
5.3.2 L'IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO	102
5.4 ANALISI DEI RISULTATI POST EFFICIENTAMENTO.....	103
5.4.1 FIRMA ENERGETICA POST EFFICIENTAMENTO	104

5.4.2 INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA POST EFFICIENTAMENTO	105
6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	110
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	
RIFERIMENTI LEGISLATIVI	
RIFERIMENTI NORMATIVI	

Introduzione

L'inizio del XXI secolo è caratterizzato da sfide globali senza precedenti: il cambiamento climatico, la sostenibilità ambientale e la sicurezza energetica hanno assunto un ruolo centrale all'interno dei dibattiti internazionali. La crescente consapevolezza dell'importanza delle questioni energetiche ha portato a una rapida evoluzione delle tecnologie e delle politiche in questo settore. Tuttavia, la transizione energetica verso un futuro più pulito e sostenibile è un percorso complesso che richiede impegno e tempo per realizzare cambiamenti concreti e duraturi.

L'efficienza energetica degli edifici emerge come elemento fondamentale nel processo di transizione. In Italia, grazie agli incentivi e ai bonus governativi recenti, si è registrata una tendenza positiva in questo ambito. Tali miglioramenti hanno portato e porteranno vantaggi sia dal punto di vista economico che ambientale, riducendo la domanda energetica e determinando una diminuzione delle emissioni di gas serra. Nonostante ciò, è necessario effettuare ulteriori sforzi per allinearsi agli obiettivi stabiliti dall'Unione Europea [1].

La maggior parte degli edifici in Italia è stata costruita prima dell'adozione di standard energetici rigorosi. Questo rappresenta un'opportunità significativa per potenziare l'efficienza energetica attraverso interventi mirati di riqualificazione [2]. In questa prospettiva, la tesi in oggetto si propone di analizzare e valutare le possibili ottimizzazioni energetiche applicabili alla sede dell'ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) di Novara, classificata in classe D, considerando diverse strategie, come la sostituzione degli impianti o la modifica dell'involucro edilizio.

In Tab.1 si evidenzia il valore mediano dell'Indice di Prestazione energetica per l'edificio (EP_{GL}) per ogni classe energetica, sia nel settore residenziale che in quello non residenziale. Quest'ultimo, di interesse per il presente studio, mostra valori dell'indice più elevati e variabili rispetto al residenziale a causa delle molteplici destinazioni d'uso e dei servizi energetici che lo caratterizzano [2].

	Classe energetica	n.	EP _{gi} [kWh/m ² anno]		Classe energetica	n.	EP _{gi} [kWh/m ² anno]
Residenziale	A4	42.215	69,3	Non residenziale	A4	1.526	97,0
	A3	16.448	94,3		A3	1.392	160,5
	A2	20.919	85,3		A2	2.353	202,4
	A1	24.451	91,2		A1	3.942	251,8
	B	27.197	104,8		B	7.582	323,0
	C	44.677	120,7		C	13.918	341,6
	D	88.376	139,7		D	20.779	345,1
	E	132.927	160,9		E	18.456	313,9
F	197.170	196,3	F	17.740	278,8		
G	246.592	290,2	G	31.094	254,6		

Tabella 1 – Valore mediano di EP_{GL} per ogni classe energetica [2]

È possibile notare il numero elevato di edifici che appartengono attualmente alle classi più basse a causa dei fabbisogni energetici elevati. In risposta a ciò, il Parlamento europeo ha recentemente dato il via libera alla Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD o Direttiva Case Green) a Strasburgo, concentrandosi sulla realizzazione di edifici ecosostenibili. Questa prevede che entro il 2030 tutti gli immobili residenziali soddisfino almeno i requisiti minimi della classe energetica E e, successivamente nel 2033, raggiungano la classe D, puntando ad avere emissioni zero entro il 2050. Inoltre, l'Art.10 della Direttiva EPBD introduce il "Passaporto di Ristrutturazione" (Building Renovation Passport), un documento che propone un percorso graduale di interventi per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità a lungo termine fissati dalla UE.

La sede di ARPA, come molti altri edifici nel nostro Paese, rappresenta una perfetta opportunità per dimostrare come le tecniche e le tecnologie moderne di efficienza energetica possano essere applicate per ottenere dei cambiamenti significativi nel parco edilizio esistente. Attraverso un'analisi dettagliata dei dati e dell'utilizzo dell'edificio, questa ricerca vuole fornire una panoramica completa delle sfide e delle opportunità nel campo dell'efficienza energetica, offrendo soluzioni concrete e raccomandazioni per il futuro.

1 Lo scenario energetico

1.1 Crisi energetica: l'analisi della IEA

L'International Energy Agency (IEA) svolge un ruolo cruciale nel fornire dati accurati e previsioni affidabili riguardo lo scenario energetico. Attraverso la pubblicazione annuale del World Energy Outlook (WEO), rapporto riconosciuto come un punto di riferimento autorevole, l'organizzazione internazionale mostra una panoramica completa delle tendenze energetiche globali e delle potenziali traiettorie di transizione energetica. Le informazioni contenute all'interno del documento sono fondamentali per orientare i responsabili delle decisioni politiche, gli esperti del settore energetico e gli accademici che lavorano alle questioni di sviluppo economico e ambientale.

All'interno di questo rapporto viene evidenziato come il panorama energetico globale sia oggi caratterizzato da sfide significative. Tra queste, emerge l'instabilità energetica causata dall'invasione russa dell'Ucraina, che ha innescato una drastica riduzione dell'approvvigionamento di gas naturale da parte del principale esportatore mondiale di combustibili fossili. Le difficoltà del commercio energetico globale hanno provocato un aumento dei prezzi del gas e dell'elettricità e un incremento significativo delle importazioni di gas naturale liquefatto. L'insicurezza persistente ha inoltre alimentato l'inflazione e ha rischiato di scatenare una recessione, mettendo a dura prova l'economia dei Paesi in via di sviluppo [3].

In risposta alla crisi energetica, i governi hanno stanziato oltre 500 miliardi di dollari per cercare fonti alternative di combustibili e per accelerare i progetti di energia rinnovabile. È previsto un aumento degli investimenti nell'energia pulita e si stimano oltre 2 trilioni di dollari entro il 2030. Tuttavia, per raggiungere l'obiettivo di emissioni nette zero entro il 2050, questi dovrebbero superare i 4 trilioni di dollari entro lo stesso anno. Come sottolineato all'interno del WEO, le carenze di

investimenti in energia pulita sono più pronunciate e preoccupanti nelle economie emergenti, considerando la prevista rapida crescita della domanda di servizi energetici in questi Paesi. Di conseguenza, risulta necessario uno sforzo internazionale nell'immediato futuro per aumentare i finanziamenti per il clima [4].

Un altro aspetto fondamentale è il progresso sull'efficienza energetica mondiale, raddoppiato nel 2022 rispetto alla media del quinquennio precedente. Proprio grazie a questo risultato, la domanda globale di energia è cresciuta solo dell'1% nello stesso anno. Questi miglioramenti sono stati guidati da politiche energetiche più forti a livello globale, in particolare hanno riguardato Paesi che rappresentano il 70% del consumo energetico mondiale. Nell'ultimo anno, inoltre, i governi hanno supportato i consumatori spendendo oltre 900 miliardi di dollari per limitare l'aumento delle bollette energetiche e avviando grandi campagne di sensibilizzazione per ridurre il consumo di energia [5].

Anche dal punto di vista tecnologico sono stati fatti passi in avanti: le vendite di unità a pompa di calore sono aumentate di oltre il 10% a livello globale, e quasi il 40% in Europa. La quota di veicoli elettrici venduti nel 2022 è stata del 14% e si prevede che aumenterà al 18% nel 2023. Questi sono soltanto alcuni degli step necessari per raddoppiare il miglioramento dell'efficienza energetica a oltre il 4% e per allinearsi allo scenario "Net Zero" dell'IEA. Ciò comporterebbe, infatti, una riduzione della domanda globale di energia di 190 EJ e delle emissioni di 11 Gt di CO₂ entro il 2030. L'accelerazione di tutte le politiche esistenti potrebbe permettere di raggiungere i tre quarti dell'obiettivo entro la fine del decennio e creerebbe più di 12 milioni di posti di lavoro in più, nonché l'accesso all'elettricità per oltre 800 milioni di persone. Tuttavia, questo target richiederà un aumento dell'investimento annuo legato all'efficienza, da 600 miliardi di dollari oggi a 1,8 trilioni di dollari [5].

Come dunque evidenziato più volte dalla IEA, la crisi energetica attuale sottolinea l'importanza di una transizione verso un sistema energetico più sicuro, sostenibile e accessibile. Un aumento degli investimenti in energia pulita, elettrificazione e

migliore gestione delle reti può ridurre sia le emissioni che i costi dell'elettricità mentre la riqualificazione energetica può svolgere un ruolo significativo in questo processo, contribuendo alla creazione di un sistema energetico più efficiente e resiliente. Sebbene le attuali premesse non siano all'altezza dell'obiettivo di stabilizzare il riscaldamento globale a 1,5 °C, il decennio imminente sarà fondamentale per stimolare un'azione più energica verso uno scenario energetico migliore [3].

1.2 Politiche europee e nazionali

Le questioni legate all'energia e all'ambiente hanno assunto un ruolo centrale nel dibattito politico internazionale e, pertanto, l'Unione Europea e l'Italia hanno sviluppato una serie di politiche e piani strategici per promuovere un uso dell'energia più efficace e sostenibile.

In Europa, il settore energetico è regolato da un quadro normativo robusto e complesso in continua evoluzione, composto di un'ampia gamma di strumenti politici, tra cui direttive, regolamenti, decisioni e accordi internazionali, che insieme formano la cosiddetta politica energetica comune europea. Tra le politiche più importanti vi è l'EPBD, che punta a migliorare l'efficienza energetica degli stessi attraverso pratiche di costruzione sostenibile e di riqualificazione. Introdotta originariamente nel 2002, l'EPBD è stata rivista e aggiornata nel 2010 e nel 2018 con l'obiettivo di incentivare la ristrutturazione di edifici privati e pubblici per ridurre i consumi energetici e le emissioni di CO₂ del parco immobiliare dei 27 Stati membri dell'UE. In effetti, la direttiva evidenzia che gli edifici sono responsabili del 40% del consumo finale di energia e del 36% delle emissioni di gas serra associate all'energia in Europa, e sottolinea che il 75% del patrimonio edilizio complessivo non è efficiente dal punto di vista energetico.

Attualmente all'esame del Parlamento Europeo, la direttiva prevede che entro il primo gennaio 2030 tutti gli immobili residenziali dovranno rientrare nella classe energetica E, e che entro il 2033 sarà obbligatorio passare alla classe D, con l'obiettivo finale di

raggiungere emissioni zero entro il 2050. Nonostante la direttiva non preveda sanzioni, la sua efficacia sarà determinata dalla realizzazione pratica di politiche di supporto dei vari membri dell'UE attraverso i rispettivi piani nazionali di ristrutturazione.

L'Italia, come ogni altra nazione europea, ha posto l'energia e il clima al centro della sua agenda politica. In particolare, la politica energetica italiana è fortemente a favore delle energie rinnovabili tanto che il Paese ha sperimentato in questi anni una crescita impressionante in questo settore [6]. Per raggiungere gli obiettivi dell'Unione Europea, l'Italia ha definito un quadro politico basato sulle indicazioni del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) e del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).

Il PNIEC rappresenta uno strumento fondamentale per delineare le politiche e le misure necessarie al raggiungimento degli obiettivi del 2030 e nasce per monitorare e verificare il percorso che ogni nazione intraprende rispetto agli impegni stabiliti dall'Accordo di Parigi. In base al Regolamento europeo 2018/1999, la presentazione del PNIEC è obbligatoria per ogni Stato membro e deve essere fornita ogni dieci anni (fine 2019, 2030, 2040, ecc.), tuttavia, sono previsti diversi aggiornamenti nel corso del decennio, non ultimo quello proposto dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) nel 2023 [7]. Il PNIEC si articola in cinque obiettivi chiave: la decarbonizzazione, che implica la riduzione delle emissioni di gas serra; l'efficienza energetica, per ridurre la domanda di energia; la sicurezza energetica, per garantire un approvvigionamento affidabile; il mercato interno dell'energia, con l'obiettivo di creare un mercato energetico europeo integrato; e la ricerca e innovazione, per promuovere la competitività delle imprese europee nel settore energetico globale.

Parallelamente, il PNRR, nato dal Recovery Plan dell'Unione Europea in risposta alla crisi causata dalla pandemia di COVID-19, rappresenta un'opportunità per l'Italia per rilanciare la crescita economica sostenibile. Con un totale di oltre 191,5 miliardi di

euro derivanti in gran parte dal piano NextGeneration UE, esso si articola in sei missioni riguardanti la digitalizzazione, l'innovazione, la transizione ecologica e l'inclusione sociale [8]. È opportuno sottolineare che solamente una quota di 60 miliardi di euro corrisponde a sovvenzioni non rimborsabili, mentre la parte residua del finanziamento è costituita da prestiti che l'Italia si impegna a rimborsare nell'arco temporale di trent'anni a tassi di interesse più bassi rispetto a quelli con cui si finanzia sui mercati. Per accedere ai fondi, l'Italia deve rispettare semestralmente una serie di scadenze e richiedere successivamente la distribuzione di una delle dieci rate previste. L'impegno dell'Italia è quello di raggiungere 527 obiettivi qualitativi e quantitativi entro giugno 2026, traguardo ambizioso e non garantito che necessiterà di un notevole lavoro da parte della politica italiana [9].

2 L'efficientamento degli edifici

2.1 Quadro degli interventi

L'implementazione dell'EPBD in Italia è stata avviata con il Decreto 192/2005, successivamente modificato dal Decreto Legislativo 311/2006. Questo quadro legislativo ha innescato una serie di misure complementari volte a rinnovare i criteri minimi per gli edifici, i loro componenti e i sistemi tecnici. Queste misure hanno stabilito linee guida per la certificazione delle prestazioni energetiche nel 2009 e hanno definito i requisiti per i valutatori e le specifiche per l'ispezione dei sistemi tecnici degli edifici nel 2013. La Legge 90/2013 ha rappresentato un ulteriore passo avanti, attuando la Direttiva 2010/31/EU e introducendo modifiche sostanziali rispetto alla prima implementazione del 2005. Nel giugno 2015, la trasposizione della EPBD è stata completata con l'emanazione di tre decreti interministeriali che hanno introdotto requisiti minimi più stringenti per i nuovi edifici, le ristrutturazioni importanti e le riqualificazioni, hanno definito gli Edifici a Energia Quasi Zero (NZEB), le regole per l'inclusione delle fonti di energia rinnovabile (RES) negli edifici e hanno fornito nuove linee guida nazionali per i Certificati di Prestazione Energetica (EPC) [10].

All'interno del D.M. Requisiti Minimi vengono delineati una serie di interventi edilizi, presentati qui di seguito:

1. Nuova costruzione;
2. Demolizione e ricostruzione;
3. Ampliamento ed elevazione di un edificio esistente;
4. Ristrutturazione importante di primo livello;
5. Ristrutturazione importante di secondo livello;
6. Riqualificazione energetica.

Per quanto riguarda la presente tesi, l'attenzione è focalizzata sulle ristrutturazioni e le riqualificazioni in quanto essi rappresentano un elemento fondamentale all'interno della diagnosi energetica degli edifici, oggetto del prossimo sottocapitolo.

La ristrutturazione importante è un intervento che riguarda più del 25% della superficie totale di dispersione di un edificio, includendo elementi come pareti, solai, tetti e coperture che delimitano un volume a temperatura controllata dall'ambiente esterno o da ambienti non climatizzati. Le ristrutturazioni di primo livello coinvolgono più del 50% della superficie di dispersione esterna e includono necessariamente la ristrutturazione degli impianti termici. In questi casi, i requisiti di prestazione energetica si applicano all'intero edificio. Le ristrutturazioni importanti di secondo livello coinvolgono tra il 25 e 50% della superficie di dispersione esterna e possono anche includere la ristrutturazione degli impianti termici.

Gli interventi di riqualificazione energetica, invece, non rientrano nelle categorie precedenti ma influenzano comunque la prestazione energetica dell'edificio. Questi interventi coinvolgono una superficie inferiore o uguale al 25% della superficie totale di dispersione dell'edificio e possono includere la nuova installazione o la ristrutturazione di un impianto termico. In questi casi, i requisiti di prestazione energetica si applicano solo ai componenti e agli impianti interessati dall'intervento.

2.2 La Diagnosi Energetica nel settore pubblico

L'ottimizzazione dell'efficienza energetica degli edifici e la scelta degli interventi più appropriati per raggiungere tale obiettivo richiedono un'analisi dettagliata e accurata del sistema edificio-impianto oggetto di studio. Questa analisi è conosciuta come Diagnosi Energetica (DE) ed è condotta dal Referente della Diagnosi Energetica (REDE). Per eseguire la DE in modo efficace, il REDE può fare riferimento alle linee guida pubblicate da ENEA nel 2019, che fanno parte del Progetto ENEA ES-PA "Energia e Sostenibilità per la Pubblica Amministrazione". Esse svolgono un ruolo fondamentale per due ragioni principali: assicurano un'omogeneità nell'esecuzione

della DE e permettono un confronto efficace dei risultati ottenuti con un database che ne contiene altre [11]. La definizione di Diagnosi Energetica è riportata nell'Art.2 del D.lgs 115/2008, ed è la seguente:

“Procedura sistematica volta a fornire una adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività e/o impianto industriale o di servizi pubblici o privati, ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e riferire in merito ai risultati”.

Si tratta dunque di una valutazione dei consumi in condizioni effettive di utilizzo, elemento che la distingue dalla Certificazione Energetica, la quale viene redatta in condizioni di uso standard [12].

La norma sulla quale è costruita la metodologia della DE e che raccoglie i riferimenti normativi precedenti è la UNI/TR 11775:2020 e, come indicato dalla norma UNI CEI EN 16247-2, la procedura generale di Diagnosi Energetica prevede le seguenti fasi:

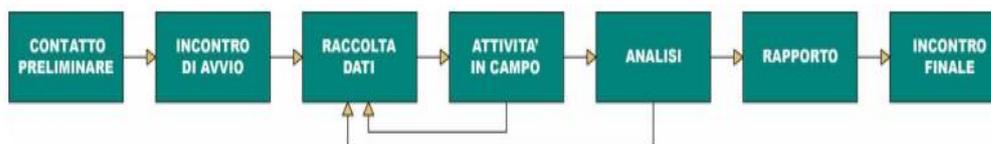


Figura 1 - Fasi della Diagnosi Energetica

Lo schema sopra rappresentato è una sintesi che non descrive in maniera esaustiva le fasi della DE. Per questo motivo viene riportata la Fig.2, un diagramma di flusso che permette di approfondire l'iter procedurale che guida il REDE. Qui di seguito vengono riassunti i punti presenti all'interno del diagramma [11]:

1. Contatto preliminare.

Consiste nell'identificazione dei soggetti coinvolti: il REDE, il referente della proprietà e il personale cooperante. Successivamente il REDE e il committente concordano lo scopo, il grado di accuratezza e le finalità della diagnosi in modo da delinearne i confini e pianificare le attività future. I fini concordati della diagnosi energetica sono la riduzione dei costi/consumi di energia e/o dell'impatto ambientale

e la conformità agli obblighi legislativi. Lo scopo invece seleziona il target da indagare a livello di sistema.

2. Incontro di avvio.

Il REDE informa tutte le parti interessate in merito agli obiettivi definiti nella fase del contatto preliminare, e procede con l'organizzazione delle modalità operative di esecuzione della DE.

3. Raccolta documentazione tecnica.

Come concordato nell'incontro d'avvio, il REDE procede all'organizzazione e all'acquisizione dei seguenti dati:

- Documenti tecnici esistenti in merito a geometria e dimensione dell'edificio, elementi tecnologici ed impianti;
- Valori di impostazione di parametri ambientali interni;
- Profili di occupazione relativi alle diverse attività svolte all'interno dell'edificio;
- Eventuali cambiamenti avvenuti negli ultimi tre anni o per il periodo di disponibilità dei dati;
- Certificazione energetica dell'edificio e relazione tecnica (ex legge 10) se disponibili;
- Documentazione relativa ad interventi di manutenzione/riqualificazione precedentemente eseguiti;
- Consumi energetici (lettura dei contatori e/o tramite dati da bolletta);
- Energia prodotta ed esportata per ogni vettore energetico se disponibile;
- Elenco apparecchiature presenti e relativi consumi e profili di utilizzo;
- Fattori in grado di influenzare i consumi energetici.

4. Attività in campo.

Consiste in sopralluoghi con i quali il REDE deve convalidare i dati precedentemente raccolti e, se necessario, integrare i dati mancanti con ulteriori rilievi. È possibile avvalersi di apposita strumentazione per le misure legate prettamente a dati fisici e di interviste agli occupanti per la valutazione dei profili di utilizzo e di potenza.

5. Analisi dei consumi reali e costruzione dell'inventario energetico.

Si analizzano i dati di consumo reale desunti da letture e/o bollette per delineare un consumo di riferimento, utile come baseline di confronto per la successiva valutazione degli interventi migliorativi. Per poter delineare il consumo di riferimento è necessario che il REDE costruisca l'inventario energetico nel quale sono censiti e dettagliati gli impianti, e di conseguenza sono valutati i consumi relativi ad ogni vettore energetico per servizio energetico.

6. Indicatori di prestazione energetica.

Definizione e confronto dei principali indici per la rappresentazione dell'uso specifico di energia, espressi come consumo di riferimento per unità di superficie o volume:

- EP_{EF} : Indicatore di prestazione energetica effettivo ricavato da misure effettive;
- EP_{OP} : Indicatore di prestazione energetica operativo ricavato teoricamente dal modello energetico.

7. Individuazione delle azioni di incremento dell'efficienza energetica.

Dallo studio dell'involucro edilizio e degli impianti presenti, è possibile individuare le criticità sulle quali studiare un intervento migliorativo.

8. Simulazione del sistema operativo e validazione del modello energetico.

Nel caso di interventi migliorativi è indispensabile la costruzione di un modello energetico che simuli il sistema edificio-impianto al fine di poter valutare le opportunità di risparmio energetico.

Il calcolo della prestazione energetica può essere svolto con due diversi metodi:

- Quasi stazionario;
- Dinamico.

Successivamente si procede con la seguente procedura:

- Inserimento dati climatici: il periodo considerato deve coincidere con quello dei consumi reali;
- Definizione dei confini del fabbricato e delle zone termiche;
- Definizione dei servizi energetici presenti e degli impianti;

- Risultati della simulazione per ciascuna zona termica.

La validazione del modello si ottiene dal confronto tra i consumi operativi e quelli effettivi (reali). Per poter ritenere accettabile la simulazione, è necessario che lo scostamento tra i due consumi non sia superiore al 5%. Nei casi che presentano maggiori incertezze nei dati (stratigrafie ipotizzate, impossibilità o mancanza di misurazioni, ecc.) lo scostamento può essere maggiorato del doppio del limite normativo, e quindi si può estendere il limite al 10%.

9. Simulazione del sistema post operam e valutazione dei risparmi energetici conseguibili.

Per valutare i risparmi energetici conseguibili in seguito ad interventi migliorativi è necessario simulare il sistema edificio-impianto post operam e confrontare i consumi ottenuti con quelli del sistema ante operam: la differenza tra i consumi ante e post operam definisce il risparmio energetico. Al termine il referente dovrà stilare un report di diagnosi contenente la descrizione dettagliata degli interventi e l'indicazione dei risparmi energetici conseguibili come singolo intervento o come scenario di più interventi.

10. Analisi costi benefici.

In seguito alla simulazione degli interventi migliorativi, si procede con delle valutazioni di carattere economico al fine di individuare la soluzione con rapporto costi/benefici più favorevole. Un parametro spesso utilizzato in ambito residenziale è il Simple Payback Time che definisce la redditività dell'investimento, quantificato in numero di anni necessari a recuperare il capitale investito nella fase iniziale. Questo valore nasce dal rapporto tra l'importo dell'investimento e il risparmio economico conseguito.

In fase di compilazione è necessario valutare questo parametro per ogni intervento, e per ogni scenario, evidenziando il risparmio in termini percentuali.

In questa fase il REDE può prendere in considerazione i meccanismi di incentivazione sugli interventi di efficientamento energetico, strumenti di sostegno per recuperare

parte degli investimenti, in modo da poter valutare quali siano utilizzabili e quali siano più convenienti per l'edificio in esame.

11. Redazione dell'attestato di prestazione energetica.

Una volta conclusasi la diagnosi il REDE deve redigere l'APE dell'edificio in condizioni ante e post operam per individuare l'impatto che gli interventi migliorativi hanno avuto sulla classe energetica dell'edificio. Il documento è quindi redatto solo a scopo di valutazione, ma al tempo stesso può essere utilizzato per ottenere gli incentivi fiscali. L'APE valuta l'edificio reale in condizioni standard, e quindi rappresenta la qualità energetica dell'edificio con riferimento alle condizioni standard normalizzate.

12. Il rapporto.

L'ultimo passaggio prevede la redazione del rapporto di diagnosi energetica, documento finale da consegnare al committente.

13. L'incontro finale.

Nell'incontro finale il REDE consegna il rapporto di diagnosi energetica e presenta i risultati al fine di agevolare il processo decisionale.

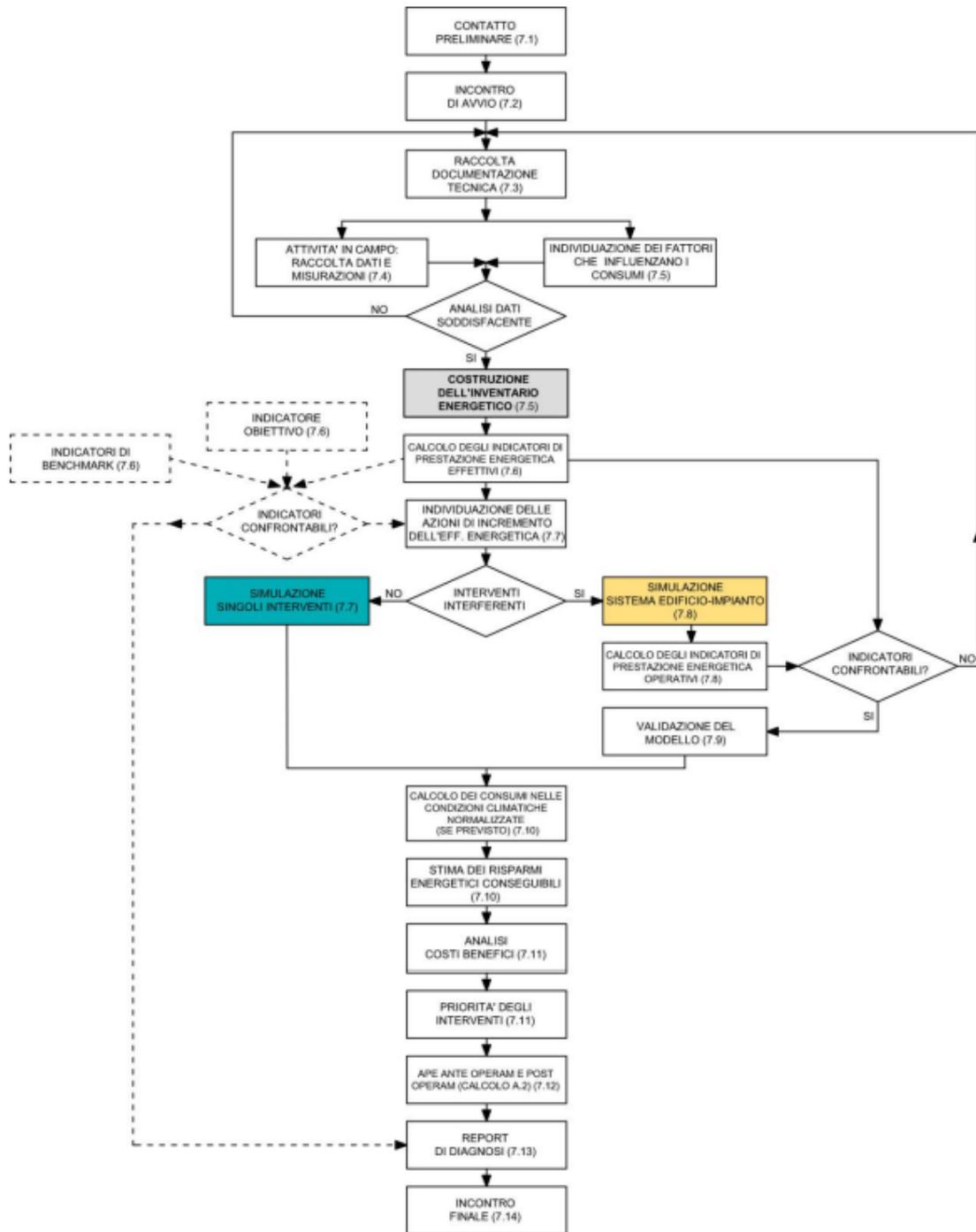


Figura 2 - Diagramma di flusso della Diagnosi Energetica

2.3 Strumenti di incentivazione

Le incentivazioni energetiche rappresentano uno degli elementi chiave utilizzati dai governi e dalle autorità competenti per promuovere la transizione verso una realtà energetica più sostenibile. Attraverso strumenti come sgravi fiscali, contributi diretti o meccanismi di mercato, le incentivazioni spingono le aziende, la Pubblica Amministrazione (PA) e i privati a implementare tecnologie più efficienti e a ridurre il proprio impatto ambientale. In Italia, per quanto riguarda il settore pubblico, si può usufruire del Conto Termico 2.0 (CT) e dei Titoli di Efficienza Energetica (TTE) o Certificati Bianchi. Complementari a queste misure, esistono vari incentivi regionali, diversificati per territorio, che ampliano le opportunità di sostenibilità energetica.

Il Conto Termico è un sistema di incentivi per l'incremento dell'efficienza energetica e la produzione di energia termica da fonti rinnovabili, rivolto principalmente alle PA a cui sono destinati annualmente 400 milioni di euro. La versione 2.0, rinnovata rispetto a quella introdotta nel 2012, prevede nuovi interventi di efficienza energetica e un ampliamento dei soggetti ammissibili, nonché procedure semplificate di accesso. Per la prenotazione dell'incentivo, si può presentare una domanda a preventivo, trasmettendo al Gestore dei Servizi Energetici (GSE) una Diagnosi Energetica e un atto amministrativo all'interno del quale devono essere presenti gli interventi che si vogliono realizzare.

Gli incentivi previsti oscillano tra il 40% e il 65%, in funzione della tipologia e della quantità di interventi proposti, tra i quali:

- Miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro edilizio;
- Sostituzione di infissi e pannelli vetrati con altri a minor dispersione termica e introduzione di schermature;
- Sostituzione dei sistemi per l'illuminazione con sistemi più efficienti;
- Sostituzione dei sistemi per la climatizzazione con tecnologie ad alta efficienza;
- Produzione di energia termica da fonti rinnovabili;

- Introduzione di sistemi avanzati di controllo e gestione dell'illuminazione e della ventilazione.

Vengono inoltre coperti i costi della Diagnosi Energetica effettuata ed è possibile cumulare questa tipologia di incentivo con altri di natura non statale.

I Certificati Bianchi, invece, sono dei titoli che attestano il raggiungimento di risparmi energetici in seguito ad interventi di incremento dell'efficienza energetica. Ad ogni titolo è associato un valore economico che li rende elementi negoziabili e scambiabili sul mercato. Le regole di questo meccanismo sono reperibili sul sito del GSE mentre le procedure di accesso al mercato sono reperibili sul sito del Gestore dei Mercati Energetici (GME).

Per quanto riguarda le agevolazioni e gli incentivi regionali, il Piemonte permette di partecipare a diversi bandi riguardanti l'energia e l'ambiente. Nel 2023, ad esempio, sono stati proposti incentivi per l'efficientamento delle imprese, per la promozione delle energie rinnovabili o ancora per la sostituzione di generatori a biomassa legnosa [13].

3 Il software di modellazione

3.1 Il metodo dinamico orario

Nel presente lavoro di tesi si è scelto di calcolare le prestazioni energetiche dell'edificio oggetto di studio con il metodo dinamico orario secondo le norme UNI EN 52016-1 e UNI EN 52017-1, facenti parte della serie ISO 52000.

In particolare, attraverso la UNI EN 52016-1, evoluzione della precedente EN ISO 13790:2008, è possibile valutare su base oraria, considerando un periodo di calcolo annuale:

- Il carico sensibile per riscaldamento e raffreddamento;
- Il carico latente per umidificazione e deumidificazione;
- La temperatura interna (aria, media radiante, operativa);
- Il carico di progetto sensibile per riscaldamento e raffreddamento;
- Il carico di progetto latente per umidificazione e deumidificazione.

L'obiettivo principale di questo metodo è analizzare come le variazioni orarie e giornaliere delle condizioni meteorologiche e delle operazioni interne influenzano dinamicamente i sistemi di riscaldamento e raffreddamento. In particolare, si valuta la temperatura interna di una stanza o zona dell'edificio risolvendo, su base oraria, un sistema di equazioni dei trasferimenti di calore tra l'ambiente esterno e interno attraverso gli elementi opachi e trasparenti che delimitano l'involucro della stanza o zona. Questi componenti dell'involucro non sono aggregati in pochi parametri concentrati (come nella ISO 13790), ma ogni elemento costruttivo è modellato separatamente.

Il risultato del calcolo è la temperatura oraria di ogni componente, compresa l'aria interna e, se presenti, i carichi di riscaldamento o raffreddamento orari. Va evidenziato, inoltre, che durante il calcolo del fabbisogno, alcuni dei dati in input dipendono da quelli in output. Per questo motivo, per ogni intervallo di tempo, il

calcolo viene ripetuto utilizzando i dati di input aggiornati o, in alternativa, vengono utilizzati i dati di output del precedente intervallo di tempo per determinare quelli in input nel successivo.

Il metodo orario si distingue per la capacità di analizzare separatamente i flussi di calore che attraversano componenti edilizi esposti a condizioni ambientali differenti, come la copertura e il piano terra, senza la necessità di aggregarli in un calcolo generalizzato. Questo supera un limite comune dei metodi di analisi energetica tradizionali, che richiedevano una combinazione semplificata dei flussi termici a causa di restrizioni computazionali e di disponibilità di dati. Tali metodi utilizzavano un valore aggregato per rappresentare la capacità termica complessiva della zona in esame, nonostante le diverse risposte termiche dei materiali e le variazioni di esposizione alle condizioni esterne. Il metodo orario, invece, permette di mantenere distinte le caratteristiche termiche dei singoli elementi costruttivi e di modellare in modo più preciso la loro interazione dinamica con l'ambiente circostante.

Questa metodologia fa uso sia della temperatura media radiante (TMR) che della temperatura dell'aria per un'accurata valutazione del comfort termico e del fabbisogno energetico. La TMR, definita come la temperatura uniforme delle pareti di un ambiente fittizio (nero, con epsilon pari a 1) in cui un soggetto scambierebbe per irraggiamento la stessa potenza termica che scambia effettivamente nel locale reale, è cruciale per modellare gli scambi termici, influenzando direttamente la percezione di calore degli occupanti. La gestione dettagliata di queste dinamiche necessita di un software di simulazione robusto per risolvere le numerose equazioni associate ai componenti costruttivi, ciascuno caratterizzato da una capacità e resistenza termica.

Nei paragrafi che seguono vengono esaminati dettagliatamente i dati di input necessari e l'algoritmo di calcolo impiegato da questo metodo.

3.1.1 Dati di input

Per l'implementazione del metodo dinamico orario, la normativa UNI EN ISO 52016-1 richiede inizialmente la disponibilità di dati climatici definiti su base oraria. Questi includono:

- La temperatura dell'aria esterna della località in esame $\vartheta_{e,a,t}$ (°C);
- Il contenuto di umidità dell'aria esterna $x_{e,a,t}$ (kg/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 $I_{sol,dir/dif,tot,k,t}$ (W/m²);
- La velocità del vento v_w (m/s).

Per ogni zona termica condizionata (ZTC) e per ogni intervallo temporale ($\Delta t = 1$ ora), si richiedono inoltre una serie di parametri relativi alle condizioni di utilizzo e ai sistemi tecnici:

- Set-point di temperatura $\vartheta_{int,set,H,ztc,t}$ (°C) per il riscaldamento e $\vartheta_{int,set,C,ztc,t}$ (°C) per il raffrescamento;
- Potenza disponibile dell'impianto $\Phi_{H,disp,ztc,t}$ (W) per il riscaldamento e $\Phi_{C,disp,ztc,t}$ (W) per il raffrescamento;
- Flusso di ventilazione entrante $q_{V,k,t}$ (m³/s);
- Apporti interni totali distinguendo le quote prodotte dagli occupanti $q_{int,oc,ztc,t}$ (W/m²), dalle apparecchiature $q_{intA,ztc,t}$ (W/m²) e dall'illuminazione $q_{int,L,ztc,t}$ (W/m²).

Altri parametri importanti includono la capacità termica specifica dell'aria e degli arredi interni alla zona, le frazioni convettive degli apporti interni della zona, degli apporti solari nella zona termica e degli apporti del sistema di riscaldamento e raffrescamento della zona termica, differenziate in base alla tipologia di impianto installato.

Infine, la norma richiede la definizione delle caratteristiche geometriche degli spazi (superfici utili e volumi d'aria) e dei componenti dell'edificio, e relativi parametri termofisici:

- Resistenza termica $R_{c,k}$ (m^2K/W);
- Coefficienti convettivi e radiativi per le superfici interna ed esterna $h_{ci,k}$, $h_{ce,k}$, $h_{ri,k}$, $h_{re,k}$ (W/m^2K);
- Potenza specifica dispersa attraverso i ponti termici $H_{tr,tb,ztc}$ (W/K) di lunghezza $l_{tb,k}$ (m) e trasmittanza termica lineica $y_{tb,k}$ (W/mK);
- Inclinazione e orientamento degli elementi opachi esterni;
- Coefficiente di assorbimento solare delle strutture opache esterne $\alpha_{sol,k}$ (-);
- Trasmittanza termica dei serramenti $U_{w,k}$ (W/m^2K), anche in presenza di chiusure oscuranti $U_{wsht,k}$ (W/m^2K);
- Trasmittanza di energia solare totale delle chiusure trasparenti per incidenza normale $g_{gl,n,k}$ (-) o includendo le chiusure oscuranti $g_{gl,sh,k}$ (-).

Queste caratteristiche geometriche e termofisiche sono sostanzialmente in linea con il metodo di calcolo attuale delle UNI/TS 11300. Gli elementi costruttivi (opachi e trasparenti) sono discretizzati spazialmente in una serie di nodi che delimitano "strati convenzionali", con schematizzazioni diverse per gli elementi trasparenti e opachi.

3.1.2 Algoritmo di calcolo

L'algoritmo di calcolo definito dalla norma UNI EN ISO 52016-1 produce, per ogni zona termica e per ogni ora, valori di parametri per la valutazione del comfort interno e dell'efficienza energetica degli edifici. Tra questi ci sono la temperatura interna dell'aria, la temperatura media radiante interna e la temperatura operativa interna, oltre al carico effettivo di riscaldamento o raffrescamento. Il processo di calcolo avviene in più passaggi:

1. Si valuta la temperatura operativa interna senza impianti attivi e si confronta con le temperature di set-point per riscaldamento e raffrescamento. Se la temperatura è nel range desiderato, l'impianto non viene attivato;

2. Se necessario, si calcolano le potenze di riscaldamento/raffrescamento per raggiungere la temperatura di set-point;
3. Si verifica se la potenza disponibile dell'impianto di riscaldamento o raffrescamento è adeguata a coprire il fabbisogno energetico calcolato nel punto precedente;
4. Se la potenza non è sufficiente, si calcola la temperatura operativa interna (che potrebbe non essere nel range di set-point) e le temperature dei nodi delle strutture;
5. Si determina il carico effettivo di energia 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. Questo bilancio termico di zona include la valutazione della capacità termica interna, degli scambi termici convettivi, dello scambio termico per ventilazione, dei ponti termici, e degli apporti interni totali, solari e del sistema di riscaldamento/raffrescamento.

I bilanci termici degli elementi edilizi (Fig.3) sono effettuati, invece, per ciascun nodo e variano a seconda della loro posizione nella stratigrafia dell'elemento costruttivo. Si distinguono quindi:

- Bilanci dei nodi sulla superficie interna: considerano scambi termici convettivi con l'aria interna, scambi termici conduttivi con il nodo interno adiacente, scambi termici per irraggiamento, la capacità termica del nodo superficiale e contributi aggiuntivi come gli apporti interni, gli apporti solari e del sistema di riscaldamento/raffrescamento;
- Bilanci dei nodi interni: includono scambi termici conduttivi con nodi adiacenti e le capacità termiche associate;
- Bilanci dei nodi sulla superficie esterna: considerano scambi termici convettivi con l'aria esterna, scambi termici per irraggiamento con la volta celeste e apporti solari, in funzione di vari fattori come il coefficiente di assorbimento solare.

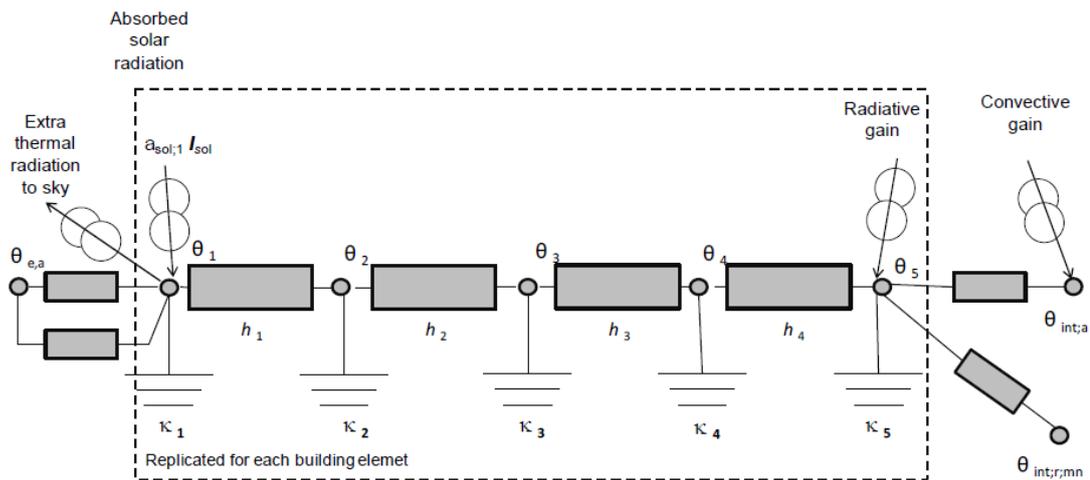


Figura 3 - Rappresentazione del modello R-C per un componente edilizio

L'analisi e la risoluzione di questi bilanci termici richiedono l'uso di software capaci di gestire un complesso sistema matriciale, la cui dimensione dipende dal numero di strutture che delimitano la zona termica e dal numero di strati in ogni pacchetto costruttivo.

3.2 Edilclima

All'interno dell'Art. 7 del D.M. Requisiti Minimi del 26/06/25 vengono indicati gli strumenti e i software per l'applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche. Essi sono garantiti dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) che assicura che i valori degli indici di prestazioni energetica, calcolati attraverso questi software, abbiano uno scostamento massimo di più o meno il 5% rispetto ai corrispondenti parametri determinati con l'applicazione dello strumento nazionale di riferimento [14].

L'ENEA, in collaborazione con il CTI, organizza diversi studi per valutare l'aggiornamento della classificazione degli edifici e degli spazi in base a diverse condizioni di utilizzo, anche all'interno di edifici appartenenti alla stessa categoria. Per garantire gli aggiornamenti necessari agli strumenti di calcolo delle prestazioni energetiche in conformità con il decreto legislativo, le eventuali modifiche delle

norme dovranno essere applicate entro 90 giorni dalla data della loro pubblicazione [15].

Il software utilizzato per la realizzazione del presente progetto di tesi è prodotto da Edilclima S.r.l. e si trova all'interno del Registro dello Strumento Nazionale. La versione 7.2.0 è stata validata in data 13/01/2022 ed è denominata "EC700". Essa consente di calcolare le prestazioni energetiche degli edifici sia con metodo mensile secondo la UNI/TS 11300 che con metodo dinamico orario secondo la UNI EN ISO 52016-1. Il software costituisce il motore di calcolo base e, grazie all'integrazione con molteplici moduli correlati, consente di assolvere a tutte le attività connesse ai calcoli progettuali ed energetici: bonus fiscali, attestati di prestazione energetica, verifica dei requisiti di legge, diagnosi energetiche, contabilizzazione del calore, progettazione integrata ed acustica [15].

4 Descrizione del caso studio (stato di fatto)

4.1 Presentazione generale del sito

La sede di ARPA in questione si trova a Novara, precisamente in Viale Roma 7/A, alle coordinate geografiche 45°26' di latitudine nord e 8°37' di longitudine est, ad un'altitudine di 159 m. L'edificio ha una superficie totale di 4384 m², di cui 3280 m² sono climatizzati, e un volume complessivo di 14029 m³.

Per quanto riguarda le condizioni climatiche invernali, la struttura rientra nella zona climatica E, con 2463 gradi giorno e una temperatura esterna di progetto di -5 °C. Durante l'estate, la temperatura di bulbo secco raggiunge i 30,7 °C, mentre quella di bulbo umido si attesta sui 21,3 °C, con un'escursione termica giornaliera di 11,5 °C e un'umidità relativa del 44%. Inoltre, la direzione prevalente del vento è nord, con una velocità media di 1,40 m/s.



Figura 4 - Vista satellitare della sede Arpa Novara

L'edificio, categorizzato E.2-E.8 secondo il DPR 412/93, è articolato in tre sezioni principali: Produzione, Tutela e Vigilanza, Laboratorio. All'interno di esse vengono svolte attività di laboratorio per l'analisi delle matrici ambientali campionate e servizi

di tutela e vigilanza del territorio. Tale configurazione rende l'utilizzo della struttura di natura ibrida, come evidenziato nel modello energetico associato che verrà descritto in seguito.

In Fig.4 si osserva la forma a ferro di cavallo dell'edificio, con un cortile interno destinato al parcheggio dei veicoli. L'area circostante è posta ad un livello leggermente più basso rispetto al piano stradale. Ciò è evidenziato nella vista in sezione di Fig.5, dove si può notare che il primo dei tre piani dell'edificio è parzialmente interrato. I piani superiori riprendono la configurazione del piano terra senza specifiche peculiarità.

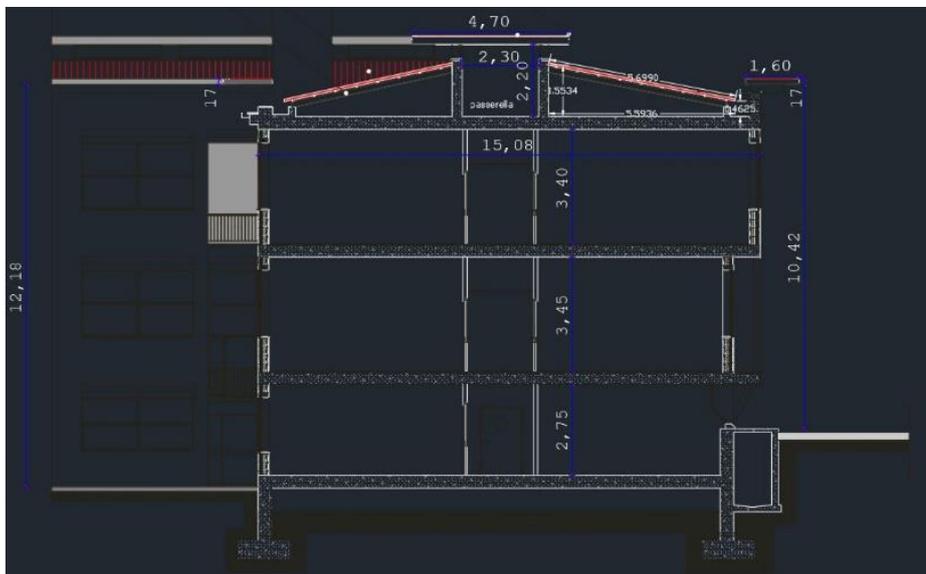


Figura 5 - Vista in sezione dell'edificio

Il piano interrato ospita una sottocentrale con una sala dedicata alle pompe per la distribuzione dell'acqua e due serbatoi destinati all'acqua calda sanitaria. Qui sono inoltre situati i pannelli elettrici e l'intero sistema di gestione delle temperature per il riscaldamento. Un piano sottotetto, non climatizzato, si estende per circa i due terzi dell'intera struttura. Questo piano, caratterizzato da un tetto a falde, presenta un corridoio multifunzionale che funge da passerella e dà spazio per l'alloggio dei motori e delle canalizzazioni delle cappe di aspirazione.

All'esterno della struttura principale si trova una centrale termica che ospita una caldaia per la produzione di acqua calda sanitaria e acqua tecnica per il riscaldamento.

Vi sono poi due laboratori esterni, separati dalla struttura principale e climatizzati grazie a due unità frigorifere.



Figura 6 – Pianta del piano terra

4.2 Dati climatici

Per una valutazione accurata del consumo energetico di un edificio, è fondamentale considerare l'analisi dei dati climatici. Questi ultimi offrono una panoramica dettagliata del contesto territoriale, delle variabili ambientali e delle condizioni meteo. Esistono vari metodi per selezionare queste informazioni: a seconda dell'obiettivo dello studio, si può optare per dati standard o, quando disponibili, per dati di maggiore precisione o reali.

Il software Edilclima s.r.l. mette a disposizione un database di dati climatici orari che, per ciascun comune italiano, include temperatura esterna, irradianza solare diretta e diffusa, umidità relativa, pressione del vapore e velocità del vento, come illustrato in

Fig.7. Sebbene questi dati siano attendibili, essendo basati su registrazioni storiche di stazioni meteorologiche, potrebbero non rappresentare fedelmente le attuali condizioni climatiche. Di conseguenza, per l'analisi in questione, sono stati utilizzati dati forniti direttamente da ARPA, le cui rilevazioni provengono da una stazione meteorologica situata a circa 200 metri dalla sede di Novara.

Dati geografici

Comune: Novara
 Provincia: Novara
 Gradi giorno DPR 412/93: 2463 gg
 Altezza s.l.m.: 159 m
 Latitudine Nord: 45° 26'
 Longitudine Est: 8° 37'
 Codice Catastale: F952 CAP: 28100
 Codice ISTAT: 3106

Dati invernali

Stazione di rilevazione per: NO - Cameri
 Temperatura: NO - Cameri
 Irraggiamento: NO - Cameri
 Ventosità: NO - Cameri

Temperatura esterna: Località di rif.: Novara
 Temperatura: -5,0 °C
 Variazione: 0,0 °C
 Adottata: -5,0 °C

Periodo convenzionale riscaldamento:
 Zona climatica: E
 Durata: 183 giorni
 Dal giorno: 15 ottobre
 Al giorno: 15 aprile

Irradianza solare massima sul piano orizzontale: 270,8 W/m²

Dati estivi

Località riferimento estiva: Novara

Temperatura bulbo secco: 30,7 °C
 Temperatura bulbo umido: 21,3 °C
 Umidità relativa: 44,0 %
 Umidità assoluta: 12,5 g/kg

Figura 7 – Schermata di inserimento dei dati climatici in Edilclima

4.3 Descrizione dell'involucro

La costruzione, risalente agli anni '70, è caratterizzata da un involucro con pareti verticali a cassa vuota, con uno spessore medio di 40 cm e prive di isolamento termico. I solai interpiano, della stessa misura in termini di spessore, sono realizzati in laterocemento e calcestruzzo e al loro interno sono integrate le serpentine per il riscaldamento a pavimento radiante. Tale sistema è implementato al primo e al secondo piano, mentre al piano terra sono presenti dei radiatori. La copertura del secondo piano, illustrata in Fig.8, è strutturalmente analoga ai solai interpiano con alcune distinte modifiche: una sezione è stata realizzata con l'aggiunta di uno strato di cemento bituminoso, il quale ha una funzione impermeabilizzante che protegge la

4.3.1 Muro esterno perimetrale

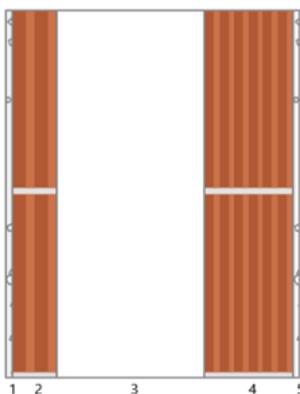


Figura 9 – Sezione del muro esterno perimetrale

Muro esterno perimetrale (400 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conduttività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	1,259
1	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
2	Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%)	60	0,3600	0,167	1000	1,00	
3	Intercapedine non ventilata $A_v < 500$ mm ² /m	200	-	0,180	-	-	
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120	0,4700	0,255	1000	1,00	
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	

Tabella 2 – Caratteristiche del muro esterno perimetrale

4.3.2 Muro interno divisorio

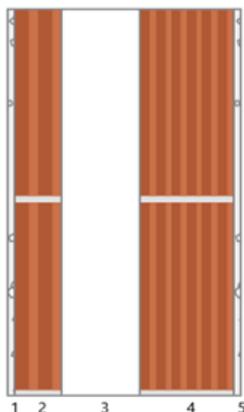


Figura 10 - Sezione del muro interno divisorio Tipo 1

Muro interno divisorio Tipo 1 (300 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conduktività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	1,131
1	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
2	Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%)	60	0,3600	0,167	1000	1,00	
3	Intercapedine non ventilata $A_v < 500$ mm ² /m	100	-	0,180	-	-	
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120	0,4700	0,255	1000	1,00	
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	

Tabella 3 – Caratteristiche del muro interno divisorio Tipo 1

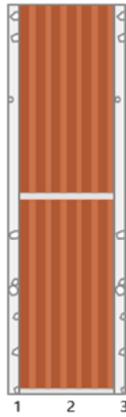


Figura 11 - Sezione del muro interno divisorio Tipo 2

Muro interno divisorio Tipo 2 (150 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conduttività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	1,585
1	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,8000	0,019	1600	1,00	
2	Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%)	120	0,3600	0,333	1000	1,00	
3	Intonaco di gesso e sabbia	15	0,8000	0,019	1600	1,00	
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,130	-	-	

Tabella 4 - Caratteristiche del muro interno divisorio Tipo 2

4.3.3 Solaio di terra

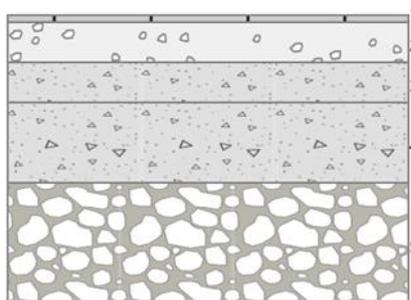


Figura 12 – Sezione del solaio di terra (contro terra)

Solaio di terra (contro terra) (360 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conduttività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	1,934
1	Piastrelle in ceramica	10	1,3000	0,008	2300	0,84	
2	Massetto Autolivellante	50	1,4000	0,036	1950	1,00	
3	Sottofondo di cemento magro	50	0,7000	0,071	1600	0,88	
4	Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	100	1,4900	0,067	2200	0,88	
5	Ghiaia grossa senza argilla (um. 5%)	150	1,2000	0,125	1700	1,00	
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	

Tabella 5 – Caratteristiche del solaio di terra (contro terra)

4.3.4 Solaio Interpiano

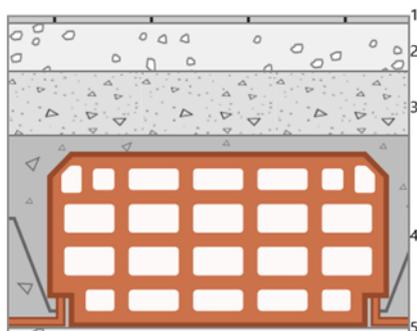


Figura 13 - Sezione del solaio interpiano

Solaio interpiano (400 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conduttività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	1,063
1	Piastrelle in ceramica	10	1,3000	0,008	2300	0,84	
2	Massetto Autolivellante	60	1,4000	0,043	1950	1,00	
3	C.l.s. con massa volumica media	80	1,3500	0,059	2000	1,00	
4	Soletta in laterizio	240	0,5000	0,480	1450	0,84	
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,170	-	-	

Tabella 6 - Caratteristiche solaio interpiano

4.3.5 Solaio di copertura

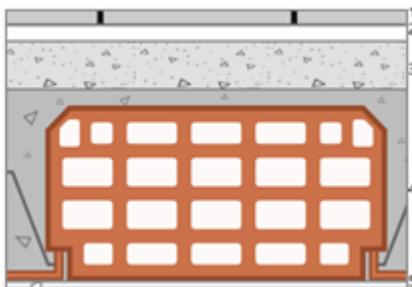


Figura 14 - Sezione del solaio di copertura

Solaio di copertura (350 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conduktività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	1,220
1	Piastrelle in granito	20	4,1000	0,011	3000	1,00	
2	Intercapedine debolmente ventilata	20	-	-	-	-	
3	C.I.s. con massa volumica media	60	1,3500	0,059	2000	1,00	
4	Soletta in laterizio	240	0,5000	0,400	1450	0,84	
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	

Tabella 7 - Caratteristiche del solaio di copertura

4.3.6 Serramenti con vetro singolo

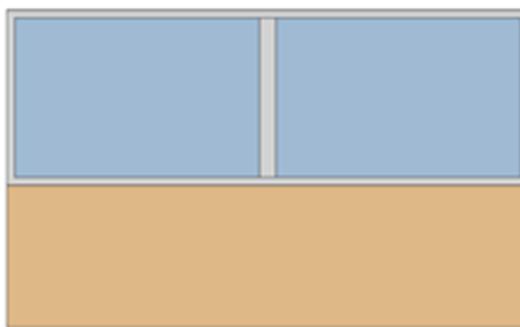


Figura 15 - Esempio di finestra con vetro singolo, a sinistra



Figura 16 - Esempio di porta finestra con vetro singolo, a destra

Serramenti con vetro singolo				
		Spessore s (mm)	Conduttività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)
Vetro	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
	Primo vetro	6	1,00	0,006
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040
Telaio	Trasmittanza termica del telaio U_F [W/m ² K]	4,50		
	K distanziale [W/mK]	0,000		
Serramento	Tipologia di serramento	Singolo		
	Classe di permeabilità	Classe 1 da Norma UNI EN 12207		
Dati per il calcolo degli apporti solari e delle schermature	Emissività epsilon	0,837		
	Fattore di trasmittanza solare $g_{gl,n}$	0,850		
	Fattore tendaggi (invernale) $f_{c,inv}$	0,45		
	Fattore tendaggi (estivo) $f_{c,est}$	0,45		
	Fattore trasmissione solare totale g_{gl+sh}	0,378		
Chiusure oscuranti	Resistenza termica chiusure [m ² K/W]	0,09		
	F_{SHUT}	0,6		
Trasmittanza totale	U_w [W/m ² K]	4,776		

Tabella 8 - Caratteristiche dei serramenti con vetro singolo

4.3.7 Serramenti con vetro doppio

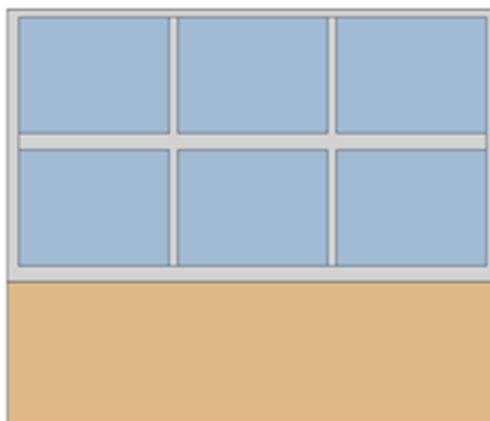


Figura 17 - Esempio di finestra con vetro doppio

Serramenti con vetro doppio				
		Spessore s (mm)	Conduttività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)
Vetro	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130
	Primo vetro	6	0,50	0,012
	Intercapedine	-	-	0,259
	Secondo vetro	8	0,50	0,016
	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071
Telaio	Trasmittanza termica del telaio U _f [W/m ² K]	2,20		
	K distanziale [W/mK]	0,080		
Serramento	Tipologia di serramento	Singolo		
	Classe di permeabilità	Classe 1 da Norma UNI EN 12207		
Dati per il calcolo degli apporti solari e delle schermature	Emissività epsilon	0,837		
	Fattore di trasmittanza solare g _{gl,n}	0,750		
	Fattore tendaggi (invernale) f _{c,inv}	0,45		
	Fattore tendaggi (estivo) f _{c,est}	0,45		
	Fattore trasmissione solare totale g _{gl+sh}	0,331		
Chiusure oscuranti	Resistenza termica chiusure [m ² K/W]	0,09		
	F _{SHUT}	0,6		
Trasmittanza totale	U _w [W/m ² K]	2,291		

Tabella 9 - Caratteristiche dei serramenti con vetro doppio

4.3.8 Ponti termici

I ponti termici sono parti dell'involucro che presentano una resistenza termica non uniforme rispetto alle aree circostanti e che generalmente determinano maggiori dispersioni termiche verso l'esterno, discomfort e potenziali problemi di condensa e muffa. Questo fenomeno si verifica in caso di compenetrazione di materiali con conduttività termica diversa nell'involucro, variazione dello spessore nella costruzione e in caso di differenze tra l'area della superficie disperdente sul lato interno ed esterno. Nell'edificio in esame si possono identificare diverse tipologie di ponti termici, di forma e di struttura, ognuna con caratteristiche specifiche: parete-pilastro (Fig.18 e Fig.19), parete-solaio interpiano e controterra, parete-copertura, parete-balcone (Fig.20 e Fig.21), parete-telaio, angolo tra pareti sporgente e rientrante.

All'interno della UNI EN 14683:2018 vengono indicati i metodi di calcolo possibili per la valutazione dei ponti termici. Nel caso in esame è stato condotto uno studio FEM (Finite Element Method o Metodo ad Elementi Finiti) utilizzando il software IRIS, sviluppato da TEP S.r.l. e distribuito da ANIT [16]. Questo strumento analitico ha permesso di determinare con precisione la trasmittanza termica lineica Ψ (W/mK), cioè il flusso di calore che attraversa un metro di lunghezza del ponte termico per ogni grado di differenza di temperatura (ΔT di 1 K). La formula, indicata nella UNI EN ISO 10211, è la seguente:

$$\Psi = \frac{\Phi}{\Delta T \cdot L} = \sum_i U_i \cdot l_i \text{ [W/(mK)]}$$

Dove:

- Φ è il flusso termico totale bidimensionale [W];
- L è la lunghezza totale della parte bidimensionale [m];
- ΔT è la differenza di temperatura l'ambiente interno ed esterno [K];
- U è la trasmittanza termica del componente i -esimo [W/m²K];
- l è la lunghezza del componente i -esimo [m].

A titolo d'esempio, vengono riportate alcune figure ricavate tramite il software che illustrano graficamente i ponti termici nell'edificio e, in particolare, le variazioni di temperatura e i flussi termici presenti.

In Fig.18 è possibile osservare l'andamento delle temperature nel nodo parete-pilastro. Come suggerisce la scala a destra, la zona blu evidenzia le temperature più basse mentre quella rossa quelle più alte, espresse in gradi Celsius (°C). L'immagine fa riferimento al mese di gennaio, mese critico per la formazione di muffa o condense se si considerano le condizioni al contorno espresse nel sottocapitolo 4.2. L'analisi mostra che il pilastro introduce una discontinuità termica nell'ambiente, evidenziata dal cambiamento di colori nel termogramma e confermata dal valore di trasmittanza termica lineica (riferita alle dimensioni esterne) pari a 0,241 W/mK.

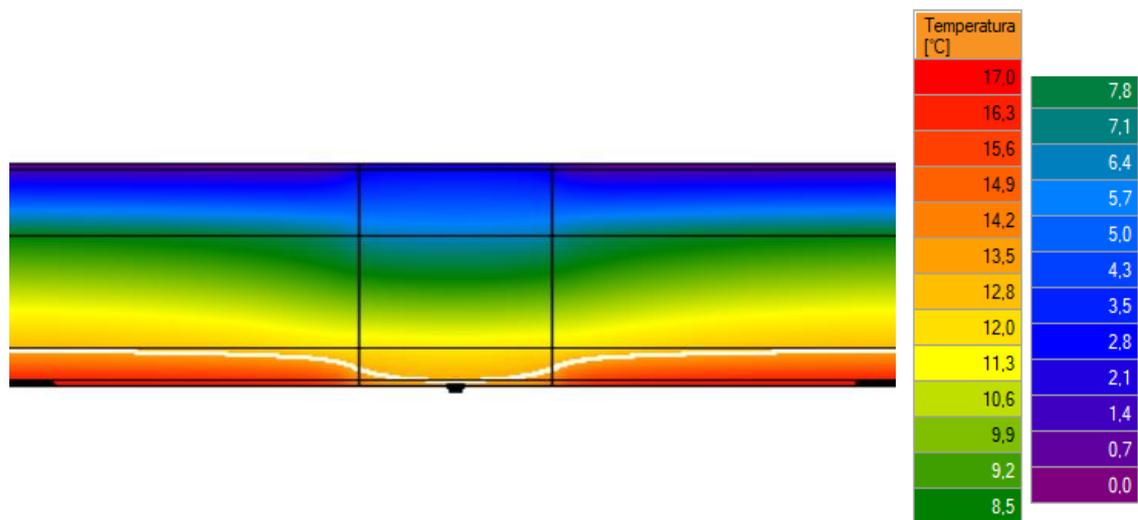


Figura 18 - Andamento della temperatura nel nodo parete-pilastro

La Fig.19 illustra il profilo dei flussi termici attraverso il nodo parete-pilastro, quantificati in W/m². Le linee permettono di osservare la direzione del flusso che attraversa perpendicolarmente il tamponamento poiché esso delimita due ambienti a temperature diverse. La gradazione di colori riflette l'intensità dei flussi termici, con i valori più alti concentrati in prossimità dell'intersezione tra il pilastro e la parete, in particolare all'interfaccia tra il pilastro e l'intercapedine non ventilata.

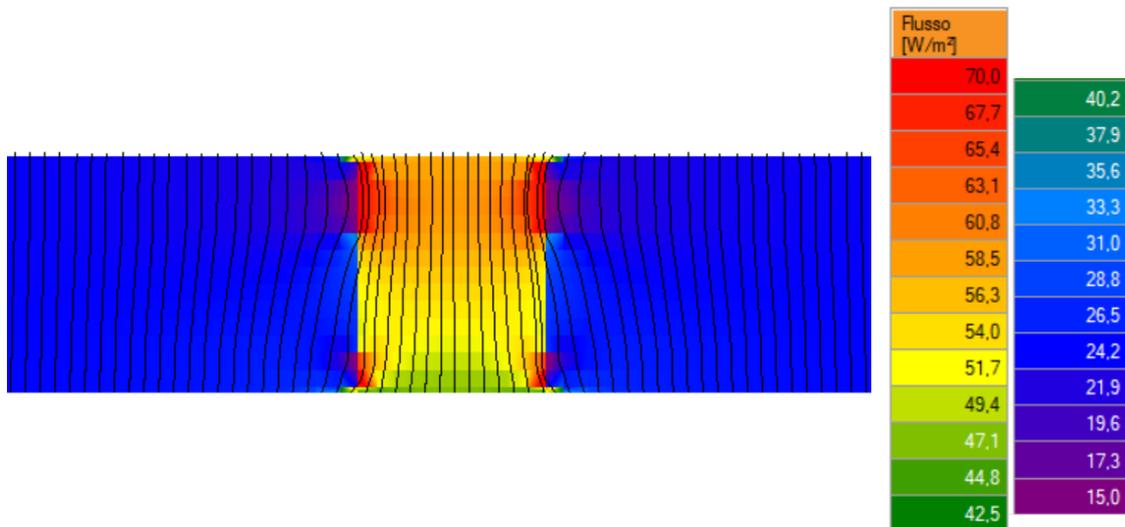


Figura 19 - Andamento dei flussi nel nodo parete-pilastro

La Fig.20 mostra l'analisi termografica del nodo parete-balcone, evidenziando visivamente l'effetto del ponte termico. Il gradiente di colore dal rosso al blu mostra un notevole scambio termico tra il balcone e la parete che determina una trasmittanza termica lineica di 0,199 W/mK, un valore leggermente inferiore rispetto a quello del nodo visto in precedenza.

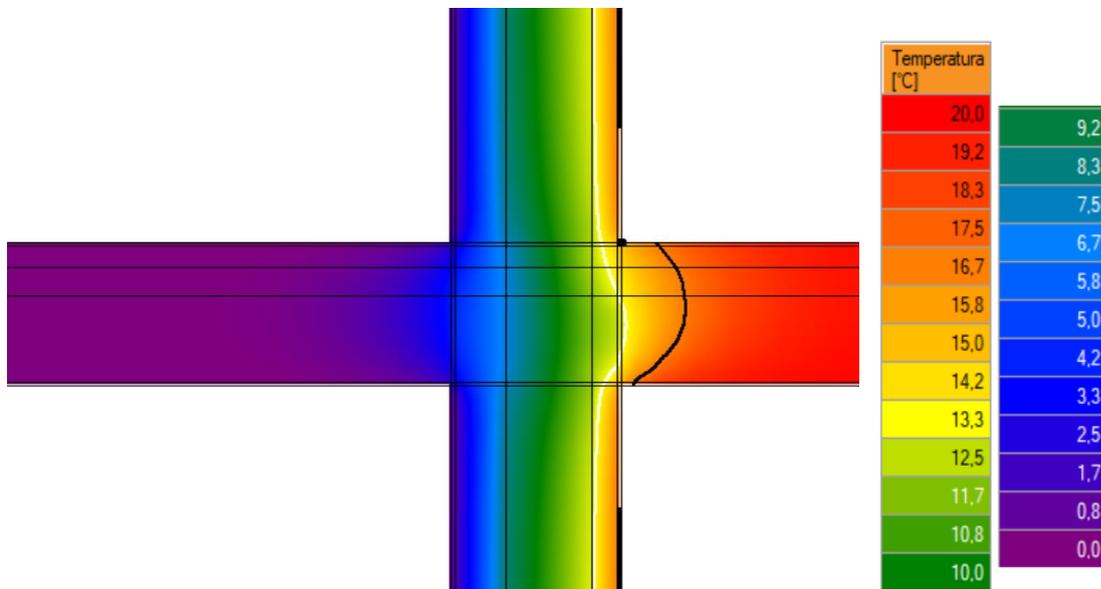


Figura 20 - Andamento delle temperature nel nodo parete-balcone

Infine, in Fig.21 viene rappresentato l'andamento del flusso termico, espresso in W/m^2 . La maggior perdita di calore avviene all'intersezione tra il balcone, il solaio e i tamponamenti, come evidenziato dai colori più tendenti verso il verde e il rosso.

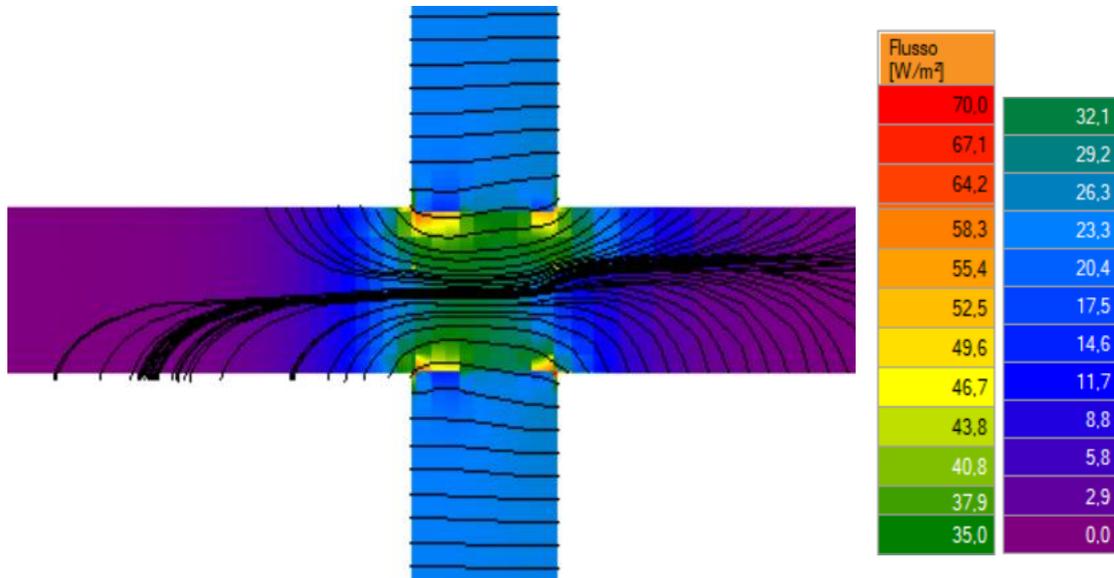


Figura 21 - Andamento dei flussi nel nodo parete-balcone

La Tab.10 riporta i valori di Ψ_e (riferita dunque alle dimensioni esterne) per ciascuna tipologia di ponte termico riscontrata.

Tipologia	Ψ_e (W/mK)	Lunghezza (m)
Parete - Pilastro	0,234	895
Parete - Balcone	0,199	147
Parete - Solaio Interpiano	0,270	808
Parete - Solaio Controtterra	0,059	1225
Parete - Copertura	-0,640	530
Parete - Telaio	0,168	1342
Angolo tra pareti sporgente	-0,465	188
Angolo tra pareti rientrante	0,178	121

Tabella 10 - Trasmittanza termica lineica per ponte termico

Si possono osservare trasmittanze termiche lineari negative per il nodo angolo tra pareti sporgente e nel nodo parete-copertura. È importante sottolineare che questi valori non implicano un'ottima prestazione termica dell'involucro ma sono semplicemente legati al metodo di calcolo e non hanno un reale significato fisico.

Esaminando queste informazioni, è possibile valutare le strategie più efficaci per il miglioramento del comfort e l'efficienza energetica complessiva dell'edificio.

4.4 Descrizione degli impianti

La struttura è dotata di impianti di tipologia differente che garantiscono gli obiettivi di comfort per i lavoratori. Qui di seguito vengono riportati l'impianto di riscaldamento e produzione dell'acqua calda sanitaria (ACS), l'impianto di raffrescamento, di illuminazione e il sistema di aspirazione meccanica.

4.4.1 Impianto di riscaldamento e di produzione dell'ACS

Questo impianto assicura una temperatura ideale durante i mesi invernali e garantisce l'approvvigionamento di acqua calda sanitaria. Il riscaldamento è centralizzato poiché l'intera rete è alimentata da una caldaia posizionata esternamente alla struttura, una BKLIM da 697 kWt di potenza termica utile, presente in Fig.22.



Figura 22 - Caldaia BKLIM da 697 kW

La centrale si occupa di distribuire il calore agli ambienti dell'edificio ed è composta da diversi elementi tra i quali: pompe di circolazione, scambiatori di calore, valvole di regolazione, collettori, valvole di intercettazione, strumentazione di controllo (termostati e sonde di misurazione), vasi di espansione e serbatoi di accumulo (questi ultimi in Fig.23).



Figura 23 - Serbatoio di accumulo

Sono presenti due circuiti di distribuzione dell'acqua calda per il riscaldamento, gestiti dal pannello in Fig.24, distinti in funzione dei terminali di emissione:

- Circuito Radiatori: distribuisce l'acqua tecnica ai radiatori del piano terra, installati su parete interna non isolata, ad una temperatura di 75°C;
- Circuito Pannelli: distribuisce l'acqua tecnica alle serpentine dei pannelli radianti del primo e secondo piano ad una temperatura di 40°C.

Il pannello permette di regolare le temperature di mandata attraverso due curve climatiche semplici, ciascuna per circuito, che possono essere modificate in funzione delle condizioni metereologiche esterne e delle esigenze specifiche degli ambienti, cioè della temperatura interna di set-point desiderata. La regolazione è infatti di tipo climatica ed è affidata a una sonda che misura la temperatura esterna e consente alla centralina di compensare di conseguenza.

Per entrambi i circuiti, la distribuzione avviene attraverso montanti non isolati, posizionati all'interno dell'intercapedine dei tamponamenti.



Figura 24 - Pannello di gestione dei circuiti di riscaldamento

I locali riscaldati per mezzo di radiatori sono dotati di valvole on-off che non permettono la regolazione della temperatura negli ambienti. Questo comporta la mancata gestione delle singole zone, in quanto non vengono tenuti in conto né gli apporti gratuiti di calore né gli sbilanciamenti nel sistema di distribuzione idronica.

I locali riscaldati per mezzo di pannelli radianti sono dotati di valvole on-off che, quando aperte, permettono di lavorare alla massima resa. Tuttavia, questo sistema dipende direttamente dalla programmazione del pannello di controllo.

Nella Fig.25 viene mostrata la planimetria generale che evidenzia la posizione della centrale termica (Fig.26 e Fig.27) e del locale pompe o sottocentrale (Fig.28).



Figura 25 - Planimetria con posizionamento della centrale termica e della sottocentrale [17]

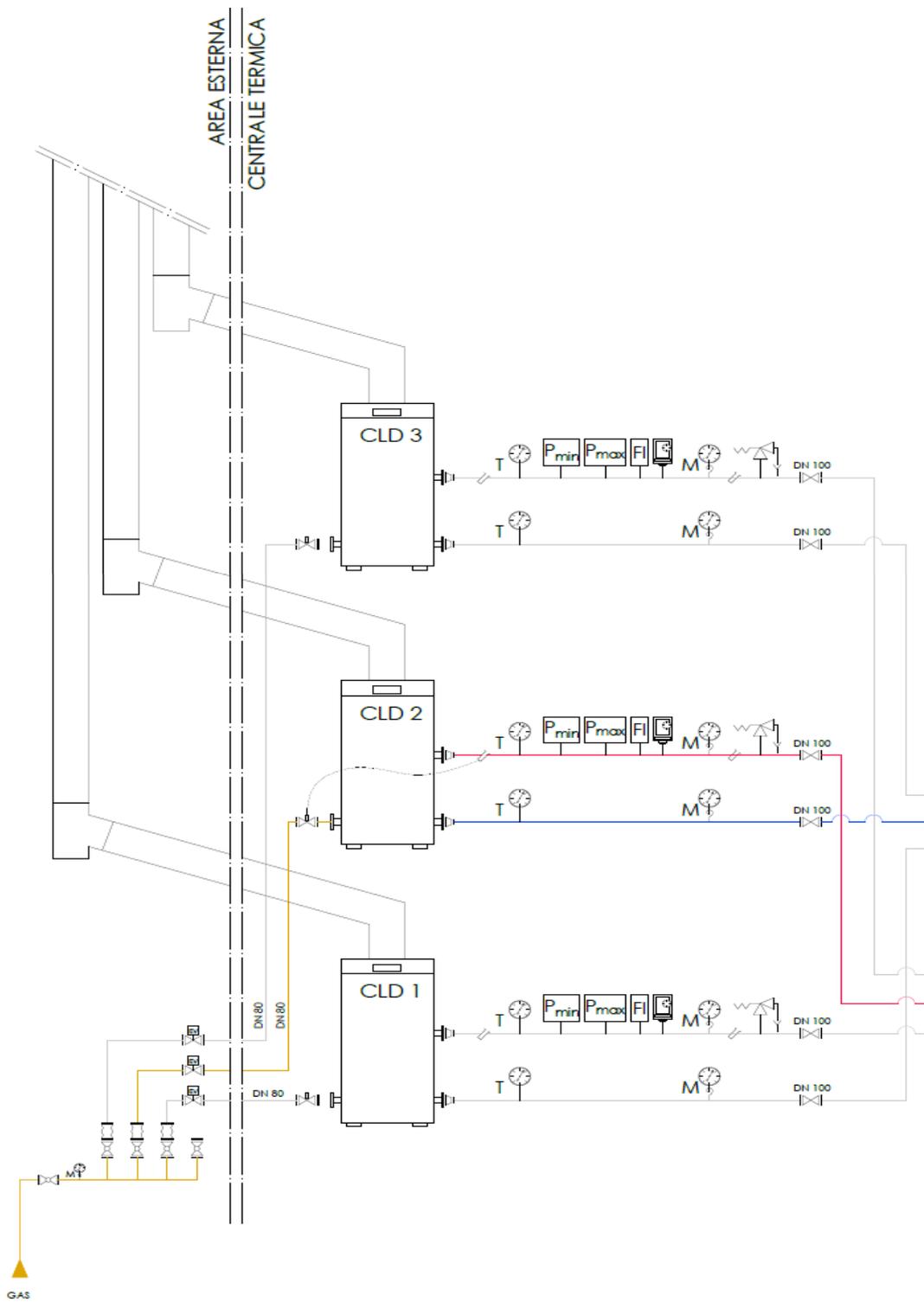


Figura 26 - Schema d'impianto – Centrale termica Parte 1 [17]

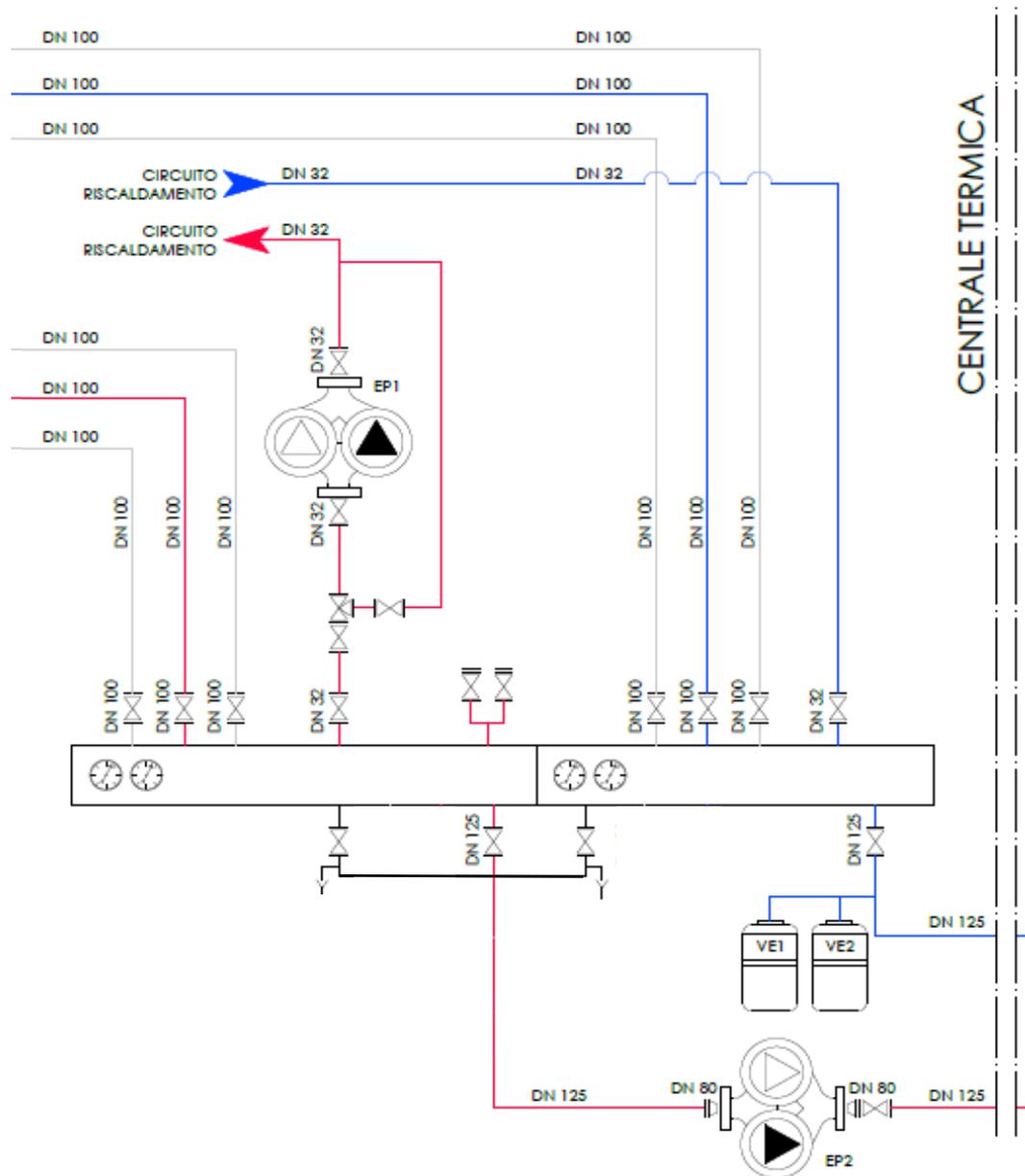


Figura 27 - Schema d'impianto - Centrale Termica Parte 2 [17]

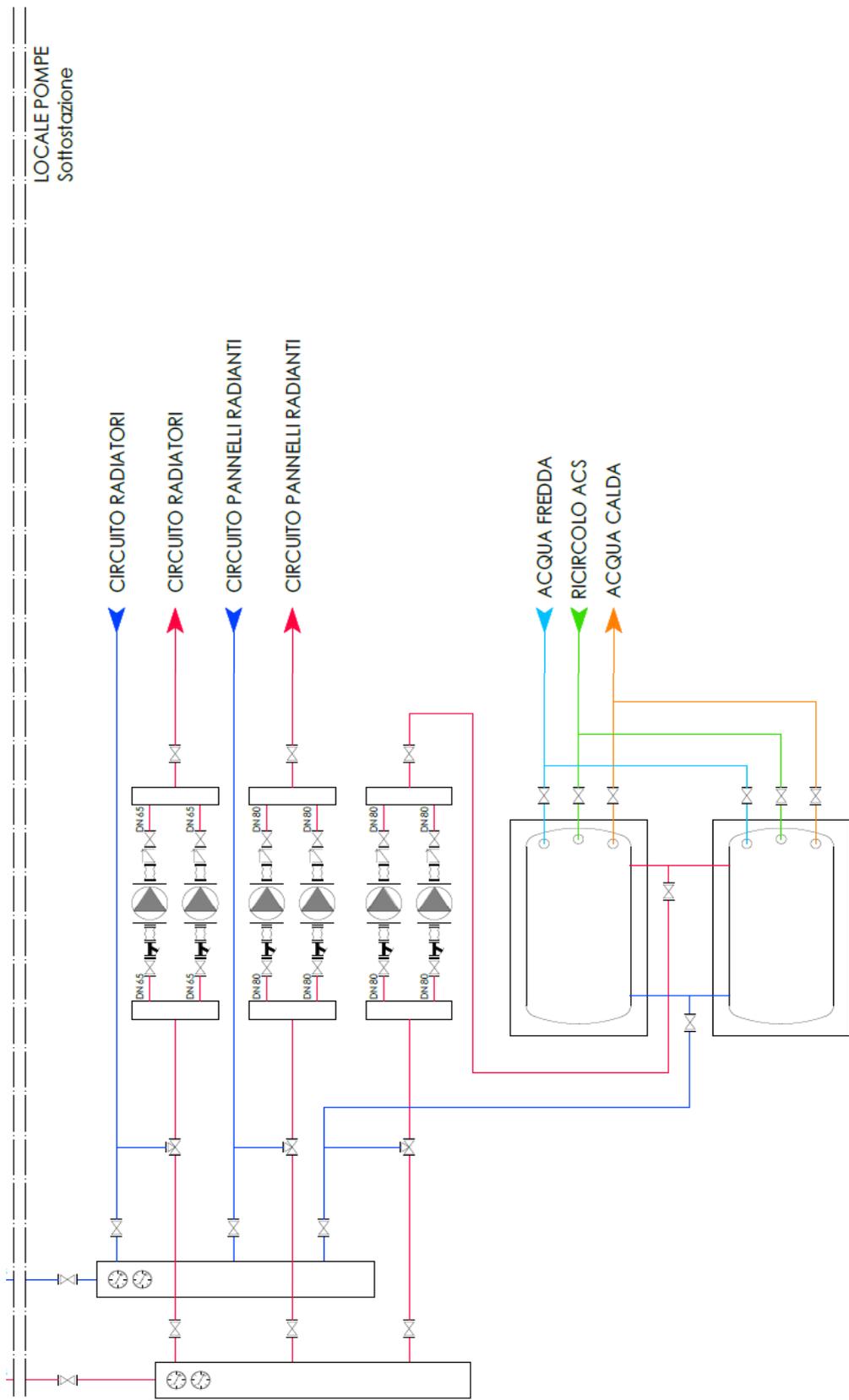


Figura 28 - Schema d'impianto – Sottocentrale [17]

4.4.2 Integrazioni dell'impianto di riscaldamento

Oltre all'impianto di riscaldamento centralizzato, per soddisfare il fabbisogno termico, l'edificio beneficia del contributo delle integrazioni fornite da unità autonome a pompa di calore. Queste sono presenti solamente in alcuni locali, come uffici e laboratori, e vengono adoperate in caso di necessità. Non sono invece installate nei corridoi e nei servizi.

In totale le unità sono 50 ed assorbono una potenza elettrica complessiva di 107 kWe di cui 16 kWe al piano terra, 35 kWe al primo piano e 56 kWe al secondo. Dei 107 kWe, il 53% è dedicato agli uffici mentre il 47% ai laboratori.

4.4.3 Impianto di raffrescamento

La gestione del raffrescamento nell'edificio differisce da quella del riscaldamento. Il sistema radiante a pavimento, infatti, non assolve alla funzione di raffrescamento, e non è stato implementato un ulteriore sistema centralizzato per questo scopo. Ad oggi sono presenti dei condizionatori autonomi (tipo split), come in Fig.29, che sono stati aggiunti col passare degli anni con l'obiettivo di sopperire alle necessità crescenti.



Figura 29 - Condizionatori autonomi (tipo split) del primo piano

Quindi, in aggiunta alle unità autonome a pompa di calore, sono presenti 15 unità dedicate esclusivamente al raffrescamento di uffici e laboratori che assorbono una potenza elettrica di circa 23 kWe totali di cui 10 kWe al piano terra, 6 kWe al primo

piano e 7 kWe al secondo. Dei 23 kWe, il 77% è dedicato agli uffici mentre il 23% ai laboratori.

Sono presenti, inoltre, dei locali raffrescati per la quasi totalità dell'anno, e definiti "Locali Frigo" nel file CAD fornito da ARPA. Questi locali, presenti sia al piano terra che al primo, sono raffrescati con l'ausilio di 5 unità autonome a pompa di calore che assorbono circa 8 kWe di potenza elettrica.

4.4.4 Impianto di illuminazione

L'edificio viene illuminato per mezzo di lampade individuate nel corso dei rilievi effettuati presso la struttura, in Fig.30 e Fig.31. Si tratta di lampade fluorescenti la cui taglia varia tra i 72 e i 36 W, in funzione del numero di tubi presenti all'interno (ciascuno da 18 o da 36 W) e con una potenza totale installata pari a 26 kWe.



Figura 30 - Lampada di tipologia 1



Figura 31 - Lampada di tipologia 2

Qui di seguito viene riportata la Tab.11 contenente le potenze installate per ogni locale dell'edificio. Con le sigle PT, PP e PS ci si riferisce rispettivamente al piano terra, piano primo e piano secondo. I locali identificati con la sigla SA e SB sono esterni all'edificio mentre i VS sono i vani scala.

Locale	Potenza installata [W]
Corridoio PT	1080
Uffici PT	2700
Locali Frigo PT	360
Laboratori PT	2016
Servizi PT	792
Uffici PP	4104
Corridoio PP	1224
Servizi PP	864
Locali Frigo PP	360
Laboratori PP	1152
Corridoio PS	1224
Servizi PS	792
Uffici PS	2988
Laboratori PS	2772
Magazzino PT	720
Archivio PT	216
SA 23-24	72
SA 29-32 + VS03	1008
SB35	144
VS03	108
SB10B	72
SB01	180
VS01	108

Tabella 11 - Potenze installate in ciascun locale dell'edificio

4.4.5 Sistema di aspirazione meccanica

Ciascun laboratorio è dotato di un sistema di aspirazione che, per mezzo di numerose cappe, si occupa di prelevare costantemente aria dall'ambiente. L'obiettivo primario è di estrarre dall'ambiente gli aerosol di agenti patogeni e le sostanze volatili chimiche tossiche che potrebbero essere presenti nei laboratori biologici e chimici. Ciò assicura un ambiente di lavoro sicuro e salubre per gli operatori.

I motori di aspirazione (Fig.32) sono posti prevalentemente nel piano sottotetto e la potenza totale installata è di circa 35 kWe.



Figura 32 - Motori di aspirazione delle cappe

Dopo un'accurata analisi e censimento delle cappe in uso, sono state registrate specifiche metriche legate al loro utilizzo. In particolare, nella seguente tabella si riportano i valori di portata di estrazione e di potenza elettrica installata:

Descrizione	Portata di estrazione m ³ /h	Potenza elettrica ventilatori kWe
Laboratori PT	2943	5,9
Laboratori PP	1817	3,7
Laboratori PS	17089	25,8

Tabella 12 - Specifiche delle cappe per ogni laboratorio

I valori di portata di estrazione sono valori medi che sono stati valutati per via di alcune restrizioni presenti nel software di simulazione utilizzato per il caso in esame.

In Edilclima, infatti, non è possibile inserire un profilo con differenti valori di portata (ad esempio portata massima dalle 8:00 alle 17:00 e portata minima nel resto della giornata) ed è stato quindi necessario imporre un valore medio per un ciclo di funzionamento sulle 24 ore.

4.5 Zone termiche

L'edificio è composto da 101 locali climatizzati, di cui 5 dedicati esclusivamente al raffrescamento, e 18 locali non climatizzati. Al fine di semplificare la gestione e l'organizzazione degli ambienti, i locali sono stati raggruppati in zone termiche.

I criteri di selezione per definire una zona termica includono la destinazione d'uso dei locali, la tipologia di sistema di condizionamento adottato e le particolari esigenze termiche. L'obiettivo principale è creare gruppi di locali che richiedono condizioni climatiche analoghe per ottimizzare l'efficienza energetica e garantire il comfort degli occupanti.

Nel caso in questione la scelta delle zone termiche è stata basata sia sull'osservazione durante l'ispezione dell'edificio, sia prendendo in considerazione i dati e le informazioni raccolte in merito alle caratteristiche degli ambienti e ai sistemi di riscaldamento presenti. Tale valutazione ha permesso di individuare le zone termiche in base a criteri oggettivi, finalizzati a semplificare l'organizzazione e la gestione degli ambienti all'interno dell'edificio.

Le zone termiche climatizzate sono le seguenti:

Descrizione	Superficie netta [m ²]	Volume lordo [m ³]	Superficie lorda [m ²]	S/V [m ⁻¹]
Corridoio PT	255	973	600	0,62
Uffici PT	270	1030	592	0,57
Locali Frigo PT	52	204	116	0,57
Laboratori PT	241	89	504	0,56
Servizi PT	48	190	134	0,71
Uffici PP	516	2283	691	0,30
Corridoio PP	293	1265	201	0,16
Servizi PP	58	277	111	0,40
Locali Frigo PP	52	235	70	0,30
Laboratori PP	198	850	201	0,24
Corridoio PS	253	1132	436	0,39
Servizi PS	37	185	115	0,62

Tabella 13 - Zone termiche climatizzate

Le zone non climatizzate risultano:

Descrizione	Superficie utile [m ²]	Volume netto [m ³]	btr _u [-]
Magazzino PT	208	571	0,70
Archivio PT	40	109	0,46
SA 23-24	16	43	0,29
SA 29-32 + VS03	106	292	0,53
SB35	24	83	0,25
VS03	14	48	0,22
SB10B	16	55	0,21
SB01 + VS01	68	236	0,41
VS01	58	198	0,54
Passerella	181	399	0,61

Tabella 14 - Zone termiche non climatizzate

Le zone termiche climatizzate sopra elencate possono essere ulteriormente aggregate in cinque macrocategorie perché presentano le stesse impostazioni, fatta eccezione per la tipologia di circuito di riscaldamento. Esse sono: corridoio, servizi, locali celle frigo, uffici e laboratori.

I valori per gli apporti sensibili sono stati ricavati nel seguente modo:

- Per gli occupanti è stato impostato un valore standard preso dall'archivio di Edilclima. Il software, infatti, assegna ad ogni tipologia di locale un valore standard ricavabile dalle norme UNI 10349 e 11300;
- Per l'illuminazione sono stati inseriti i valori di potenza presenti in ogni locale, ottenuti con i sopralluoghi in sede;
- Per le apparecchiature è stato utilizzato l'elenco della strumentazione fornito da ARPA.

4.6 Analisi dei consumi

L'analisi che segue è stata effettuata prendendo in considerazione il consumo di gas metano e quello elettrico. Il primo è legato al riscaldamento e alla produzione di acqua

calda sanitaria mentre il secondo alle apparecchiature grandi e piccole della struttura, all'illuminazione, alle cappe, ai macchinari nei laboratori e alle macchine termiche.

4.6.1 Consumi di energia elettrica

Attraverso le bollette elettriche fornite dall'ARPA, sono stati analizzati i consumi elettrici mensili a partire dal 2012. Tuttavia, come mostrato in Fig.33, i profili di consumo differiscono notevolmente tra loro. Di conseguenza, è stata avviata un'analisi approfondita per stabilire una baseline adeguata al caso di studio. La scelta dell'anno rappresentativo sul quale calibrare il modello ha portato ad escludere tutti gli anni remoti poiché poco rappresentativi del consumo attuale dell'edificio e, a causa delle peculiari circostanze generate dalla pandemia di SARS-CoV-2, si è scelto di non considerare gli anni 2020 e 2021. In definitiva, si è scelto di focalizzarsi sui dati del 2022, anno in cui si registra un consumo di circa 445 MWh di energia elettrica totale.

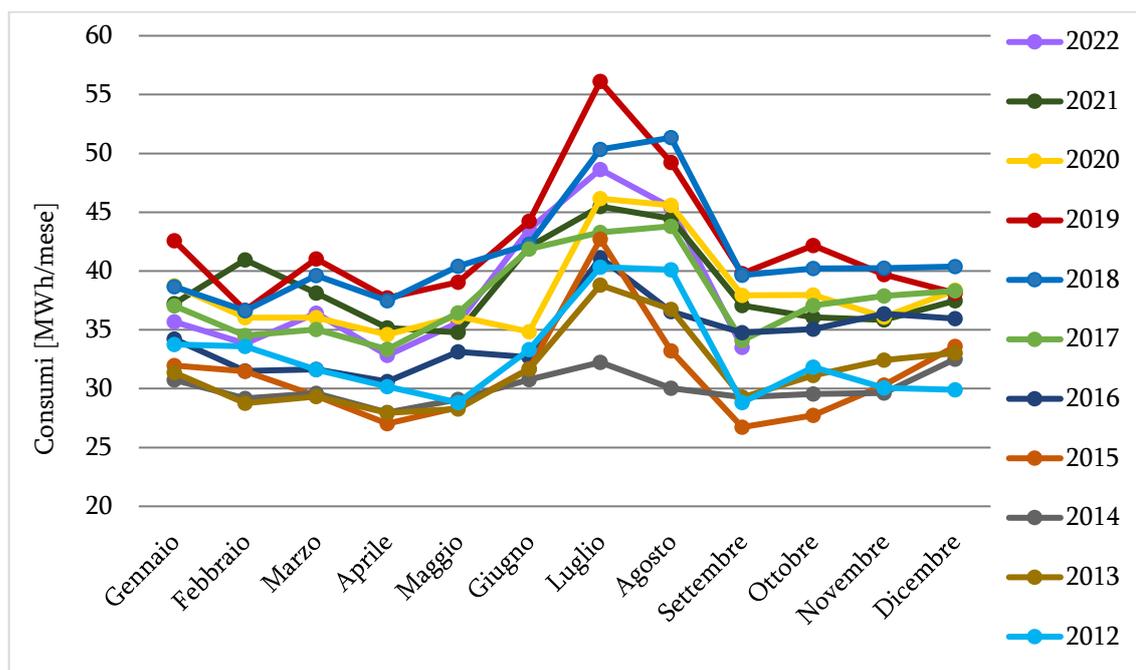


Figura 33 - Profilo dei consumi elettrici dal 2012 al 2022

Analizzando la media giornaliera dei consumi elettrici per le diverse fasce orarie, è emerso che, come illustrato nella Fig.34, i consumi notturni e festivi sono costanti, con una lieve impennata estiva dovuta alle unità a pompa di calore destinate al raffrescamento dei laboratori. Durante le ore diurne, i consumi raggiungono il picco a

luglio, tendendo a diminuire verso l'autunno. Durante l'inverno, la maggior parte delle unità a pompa di calore è spenta, tranne quelle destinate al raffrescamento dei locali frigo.

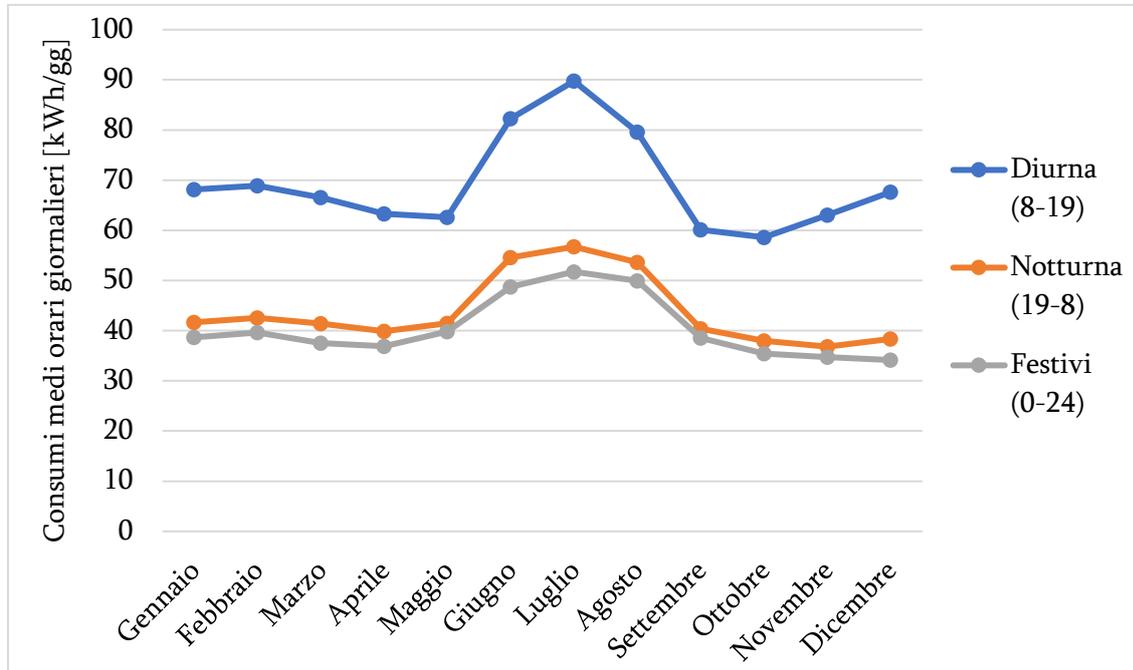


Figura 34 - Consumi medi orari giornalieri

Le misurazioni mostrate nella Fig.35 indicano un consumo notturno medio di circa 30 kWh per il laboratorio. Nei mesi estivi, i sistemi di raffrescamento negli uffici non sono attivi di notte mentre nei laboratori sì, a causa di alcuni strumenti in funzione e della necessità di mantenere una temperatura ottimale per i macchinari. Il consumo energetico legato all'illuminazione e alle cappe rimane pressoché invariato di notte, così come le pompe di calore delle celle frigo.

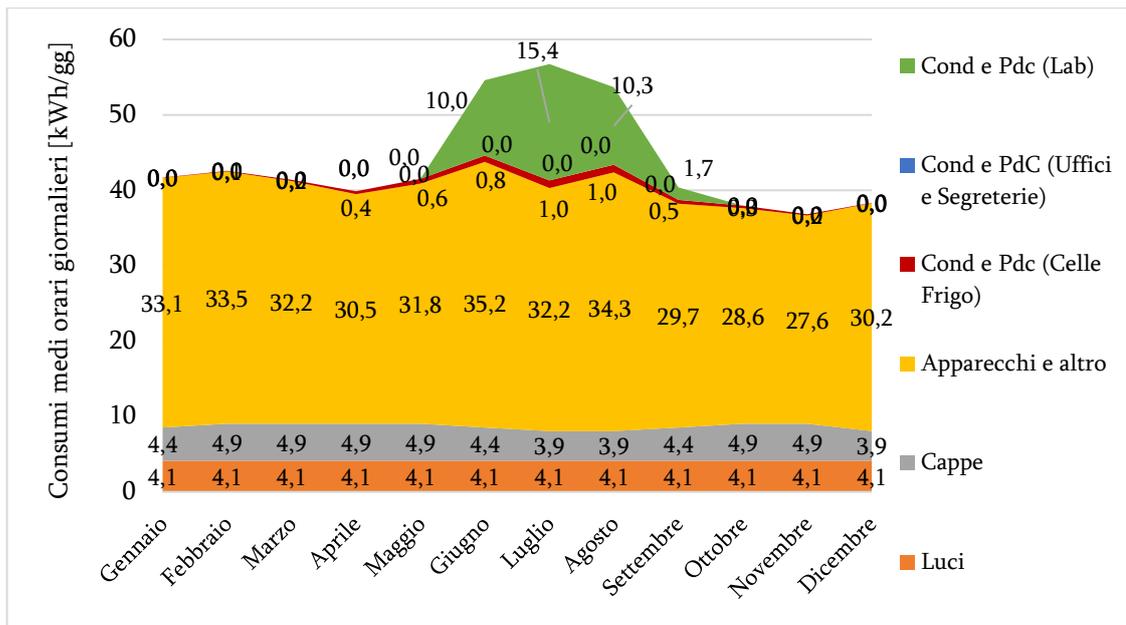


Figura 35 - Consumi medi orari giornalieri feriali (notturno)

Durante le ore diurne lavorative, la Fig.36 mostra un aumento complessivo dei consumi, con le apparecchiature di laboratorio che contribuiscono in modo significativo, raggiungendo una media di 40 kWh. Gli impianti supplementari presentano un consumo variabile a seconda della stagione: maggiore in estate, minimo o nullo nei mesi intermedi e ridotto in inverno, dove entrano in funzione solo quando l'impianto principale non è sufficiente. Osservando con dettaglio i consumi nei mesi estivi si evidenzia un picco a luglio. I mesi successivi sono invece influenzati dalla riduzione del personale e giustificano un consumo inferiore malgrado le temperature più alte soprattutto nel mese di agosto.

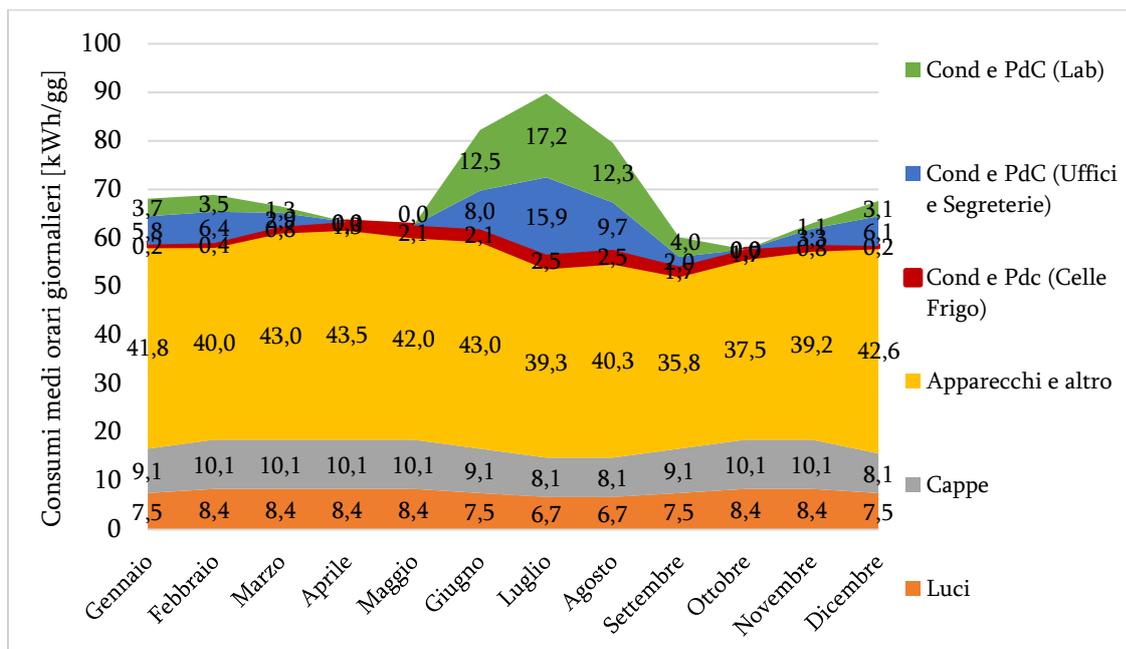


Figura 36 - Consumi medi orari giornalieri feriali (diurno)

4.6.2 Consumi di gas metano

La documentazione fornita per i consumi di gas è relativa al periodo 2012-2022 ed è stata ottenuta dai dati presenti in bolletta. Nella Fig.37 che segue sono rappresentati gli andamenti mensili ad eccezione degli anni 2019, 2020 e 2021 in quanto non è stato possibile identificare dei valori attendibili di consumo in seguito all'errata rendicontazione da parte dell'azienda fornitrice di gas. Come fatto nell'analisi dei consumi di energia elettrica, tutti i dati remoti sono stati esclusi dall'analisi e si è scelto di proseguire lo studio considerando i consumi dell'anno 2022 pari a circa 91.000 standard metri cubi di gas totale (sia ACS che riscaldamento).

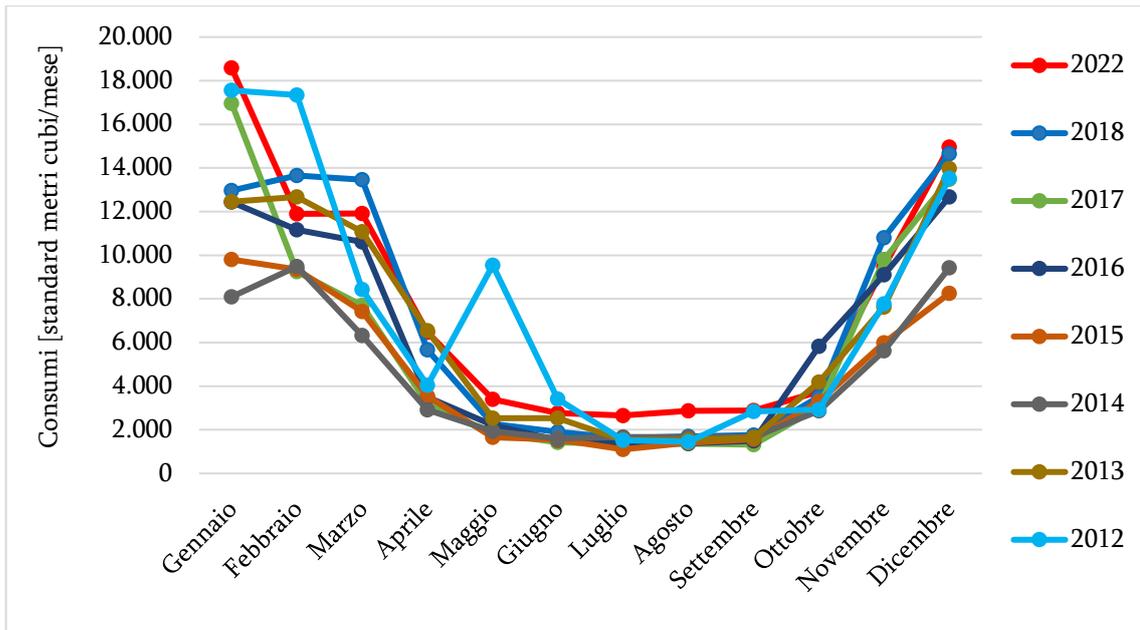


Figura 37 – Profilo dei consumi mensili di gas nel periodo 2012-2022

Considerando che nei mesi estivi il riscaldamento non è in funzione, è possibile isolare e identificare una quota pressoché fissa di acqua calda sanitaria che costituisce circa il 40% del totale consumato. Ciò permette di identificare il profilo di consumo di gas legato esclusivamente al riscaldamento. La Fig.38 illustra dettagliatamente i consumi del 2022, suddivisi per servizio energetico.

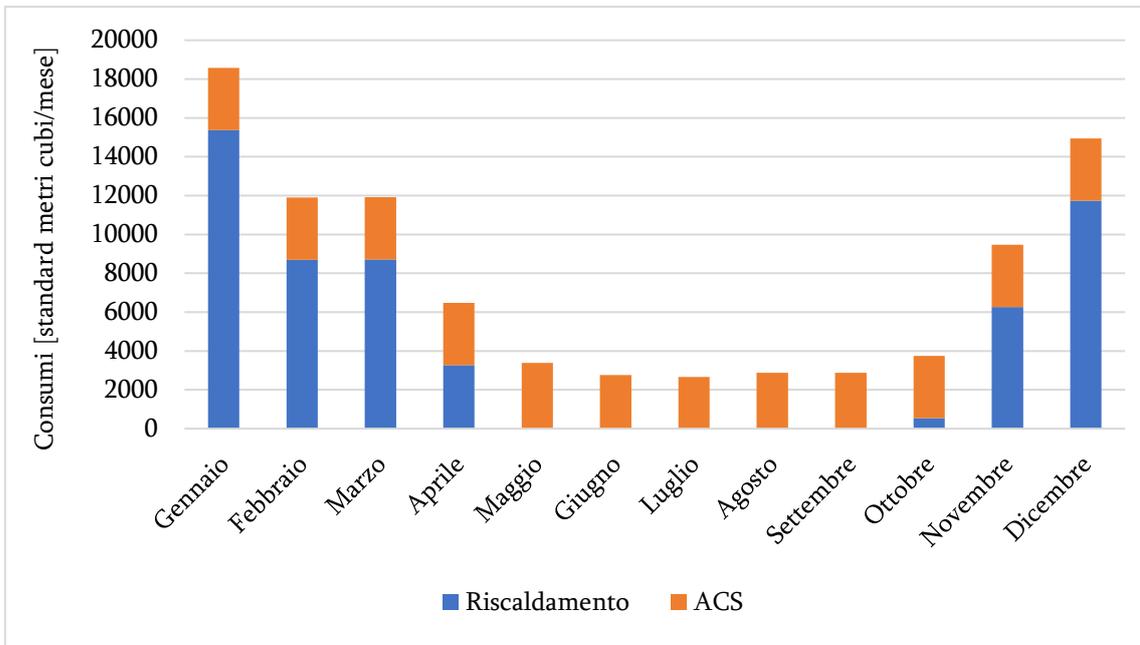


Figura 38 – Profilo dei consumi di gas in funzione dei servizi energetici nell'anno 2022

4.7 Risultati della simulazione post calibrazione

In questo sottocapitolo viene ripresa l'analisi svolta da Mario Carchia all'interno della sua tesi 'Modellazione e calibrazione della sede di ARPA Novara', presentata al Politecnico di Torino nel 2023 [18]. Parte della sezione è dedicata a una rivisitazione dettagliata di questo lavoro; successivamente, si introducono nuovi approfondimenti e considerazioni che mirano ad ampliare la comprensione delle prestazioni energetiche dell'edificio oggetto di studio.

La calibrazione è un passaggio fondamentale nello sviluppo di un modello energetico di un edificio e il suo obiettivo è allineare i risultati simulati del modello (S) ai dati reali misurati (M). Per fare ciò, si utilizzano criteri statistici che confrontano i valori mensili di consumo energetico del modello con quelli effettivi. Questo processo è iterativo e prevede l'aggiustamento dei dati di input, concentrandosi su parametri con significative incertezze, come il profilo di utilizzo dell'edificio da parte degli occupanti, il funzionamento degli impianti o dettagli costruttivi dell'involucro. Quando il modello raggiunge una precisione accettabile secondo gli indicatori statistici scelti, viene ritenuto rappresentativo della realtà e può essere utilizzato per misure di efficienza energetica e per decisioni ottimizzate di gestione dell'energia.

La discrepanza tra dati simulati e misurati può essere analizzata attraverso diversi metodi. Una prima valutazione può avvenire visivamente, tramite grafici come la firma energetica. Quest'ultima rappresenta come il consumo energetico varia rispetto a fattori come la temperatura esterna. In particolare, più quest'ultima aumenta, minore sarà il consumo energetico per riscaldare l'edificio. La pendenza della firma energetica è legata alla dispersione termica dell'edificio e alle perdite dell'impianto. Miglioramenti energetici dovrebbero portare a una riduzione di essa, mentre confronti tra diverse firme energetiche negli anni possono indicare l'efficienza del sistema.

Un altro tipo di analisi fa uso di metodologie quantitative come quelle suggerite dalla Guideline 14 dell'ASHRAE. Due indici chiave sono l'Errore di Bias Medio (MBE) e il Coefficiente di Variazione dell'Errore Quadratico Medio (CVRMSE). L'MBE confronta il consumo energetico simulato con quello misurato, fornendo una percentuale di errore, mentre il CVRMSE rappresenta la dispersione o variabilità tra i dati.

Gli strumenti descritti offrono una visione dettagliata delle differenze tra previsioni e dati reali e sono stati usati entrambi all'interno di questa trattazione.

Per definire un modello come calibrato, la Guideline 14 suggerisce che, usando dati orari, l'MBE debba essere compreso tra $\pm 10\%$ e il CVRMSE tra $\pm 30\%$. Questi limiti riguardano la presente trattazione e sono stati rispettati per ogni calibrazione effettuata. Se, invece, si utilizzano dati mensili, l'MBE dovrebbe rientrare tra $\pm 5\%$ e il CVRMSE tra $\pm 15\%$.

4.7.1 Firma energetica e calibrazioni

In Fig.39 viene mostrata la firma energetica ottenuta a seguito della calibrazione del modello. Questa è riferita sia al riscaldamento (integrazioni escluse) che alla produzione di acqua calda sanitaria.

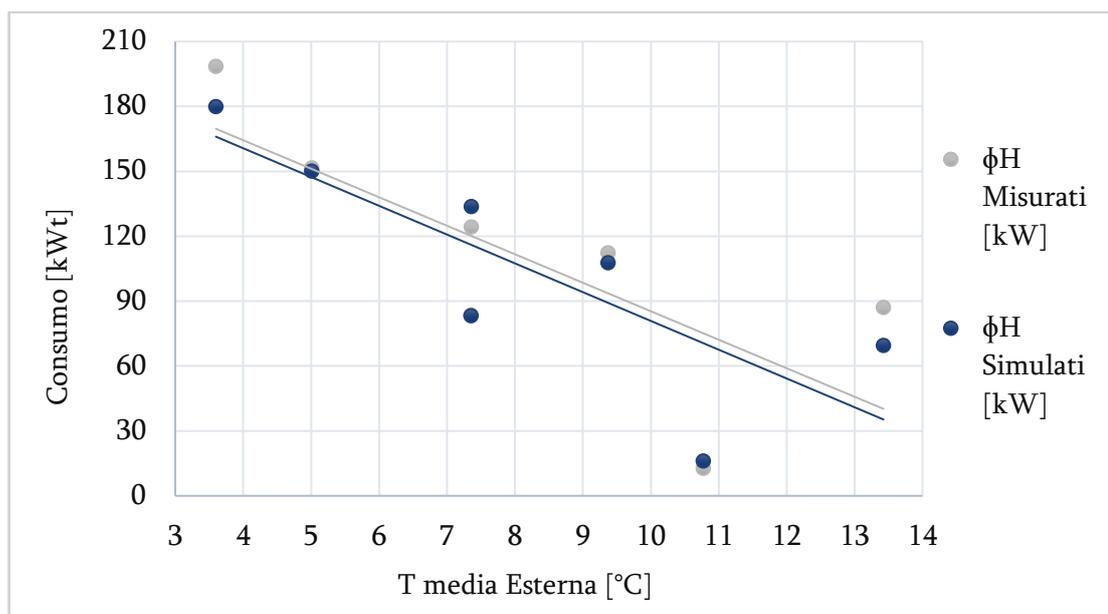


Figura 39 – Confronto tra la firma energetica dei dati misurati e simulati [18]

In Tab.15 vengono riportati gli indici statistici ottenuti in funzione degli standard metri cubi di gas metano per quanto riguarda il solo riscaldamento. I consumi misurati totali sono pari a 54600 sm³ mentre quelli simulati sono pari a 52818 sm³.

Riscaldamento	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Ottobre	Novembre	Dicembre
Simulati [sm ³]	13942	9364	8349	2607	681	6242	11633
Misurati [sm ³]	15379	8697	8708	3268	540	6266	11745
Simulati / Misurati [-]	91%	108%	96%	80%	126%	100%	99%
Misurati – Simulati [sm ³]	1437	-667	359	660	-142	23	112
MBE Totale [-]	3,3%						
RMSE [sm ³]	666						
CV(RMSE) [-]	8,5%						

Tabella 15 - Indici statistici per il riscaldamento [18]

In Tab.16, invece, vengono riportati gli indici statistici riguardanti la produzione di acqua calda sanitaria. I consumi misurati totali sono pari a 36985 sm³ mentre quelli simulati sono pari a 36909 sm³.

ACS	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Simulati [sm ³]	3145	2837	3138	3035	3131	3026	3127	3126	3029	3134	3038	3143
Misurati [sm ³]	3203	3203	3203	3203	3393	2760	2657	2874	2877	3203	3203	3203
Simulati / Misurati	98%	89%	98%	95%	92%	110%	118%	109%	105%	98%	95%	98%
Misurati – Simulati [sm ³]	59	366	65	169	262	-266	-470	-252	-152	69	166	61
MBE Totale	0,2%											
RMSE	233											
CV(RMSE)	7,6%											

Tabella 16 - Indici statistici per l'ACS [18]

Anche il sistema di riscaldamento integrato è stato calibrato. Qui di seguito vengono riportate le Tab.17 e Tab.18 contenenti gli indici statistici sia per i laboratori che per gli uffici. L'energia assorbita totale misurata è pari a 8,7 MWh mentre quella simulata è di 8,6 kWh.

Integrazioni Laboratori	Gennaio	Febbraio	Marzo	Novembre	Dicembre
Simulati [kWh]	794	797	303	263	788
Misurati [kWh]	764	773	334	274	788
Misurati - Simulati [kWh]	-30	-24	31	11	0
MBE [-]	-0,4%				
RMSE [kWh]	23				
CV(RMSE) [-]	3,8%				

Tabella 17 - Indici statistici delle integrazioni presenti nei laboratori [18]

Integrazioni Uffici	Gennaio	Febbraio	Marzo	Novembre	Dicembre
Simulati [kWh]	1032	1586	698	812	1527
Misurati [kWh]	1217	1417	733	805	1548
Misurati - Simulati [kWh]	185	-169	35	-7	21
MBE [-]	1,2%				
RMSE [kWh]	114				
CV(RMSE) [-]	9,9%				

Tabella 18 - Indici statistici delle integrazioni presenti negli uffici [18]

L'ultima calibrazione effettuata riguarda il raffrescamento all'interno dei laboratori, degli uffici e dei locali frigorifero. È possibile osservare gli indici ottenuti all'interno delle Tab.19, Tab.20 e Tab.21. L'energia assorbita totale misurata per il raffrescamento è pari a 38,4 MWh mentre quella simulata è di 38,5 MWh.

Raffrescamento Locali nelle frigorifere	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Simulati [kWh]	51	199	344	581	921	1097	1234	1114	821	687	297	76
Misurati [kWh]	72	163	361	572	985	1033	1281	1281	763	722	349	72
Misurati - Simulati [kWh]	21	-36	17	-9	64	-64	47	167	-58	35	52	-4
MBE [-]	-3,1%											
RMSE [kWh]	63											
CV(RMSE) [-]	9,9%											

Tabella 19 - Indici statistici del raffrescamento dei locali nelle frigorifere [18]

Raffrescamento Laboratori	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Simulati [kWh]	0	0	0	0	0	6176	8797	6577	1378	0	0	0
Misurati [kWh]	0	0	0	0	0	6208	8722	6421	1435	0	0	0
Misurati - Simulati [kWh]	0	0	0	0	0	32	-75	-156	57	0	0	0
MBE [-]	0,6%											
RMSE [kWh]	92,6											
CV(RMSE) [-]	1,6%											

Tabella 20 - Indici statistici del raffrescamento dei laboratori [18]

Raffrescamento Uffici	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Simulati [kWh]	0	0	0	0	0	1806	3608	2270	440	0	0	0
Misurati [kWh]	0	0	0	0	0	1754	3608	2210	432	0	0	0
Misurati - Simulati [kWh]	0	0	0	0	0	-52	0	-60	-8	0	0	0
MBE [-]	1,5%											
RMSE [kWh]	40											
CV(RMSE) [-]	2,0%											

Tabella 21 - Indici statistici del raffrescamento degli uffici [18]

4.7.2 Indici di prestazione energetica

Per quantificare e valutare l'efficienza energetica di un edificio, vengono utilizzati gli indici di prestazione energetica (IPE o, dall'inglese, EP). Questi sono espressi in energia primaria, che può essere non rinnovabile (indicizzata come "N,REN"), rinnovabile (indicizzata con "REN") o globale (indicizzata come "GL"), e sono misurati in kWh/m². L'energia primaria fa riferimento all'energia non trasformata, come quella ottenuta direttamente da fonti fossili o rinnovabili, prima che subisca qualsiasi tipo di trasformazione o conversione. Questi indici sono calcolati applicando i fattori $f_{P,REN}$ e $f_{P,NREN}$ la cui somma determina l' f_p . A questo proposito viene riportata la Fig.40 contenente i fattori di conversione dell'energia primaria.

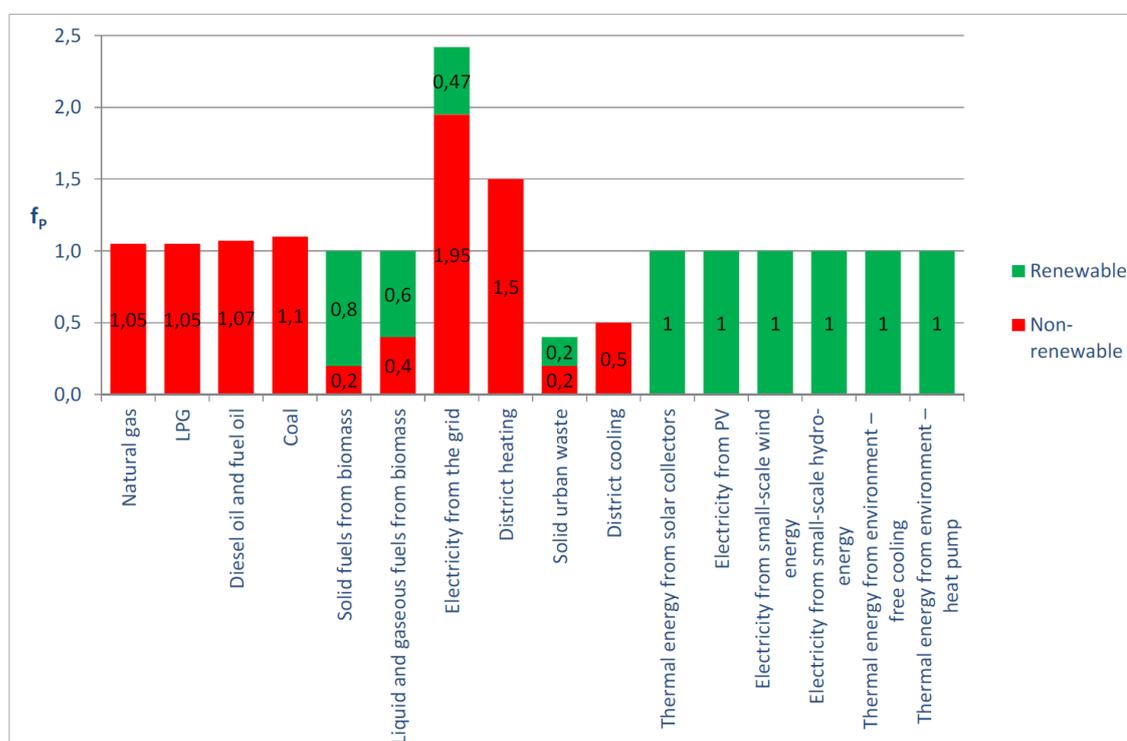


Figura 40 - Fattori di conversione dell'energia primaria

Di seguito vengono elencati i diversi indici che, se sommati, determinano l' EP_{GL} che rappresenta la prestazione energetica complessiva dell'edificio:

- EP_H : Indice di prestazione energetica per il riscaldamento;
- EP_w : Indice di prestazione energetica per la produzione di acqua calda sanitaria;
- EP_c : Indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva;

- EP_V: Indice di prestazione energetica per la ventilazione;
- EP_L: Indice di prestazione energetica per l'illuminazione artificiale;
- EP_T: Indice di prestazione energetica dei servizi per il trasporto di persone e cose.

Secondo le disposizioni del D.M. 26/06/2015, l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) deve riflettere la prestazione energetica complessiva dell'edificio, focalizzandosi sull'energia primaria non rinnovabile. In particolare, la classe energetica di un edificio viene determinata sulla base dell'EP_{GL,NREN}, che rappresenta la somma degli indici specifici per le diverse prestazioni energetiche. Questa metodologia permette di classificare ogni edificio in una scala di classi che varia da A4 a G.

In Tab.22 e in Fig. 41 sono illustrati gli IPE dell'edificio in esame per ciascun servizio energetico. Il riscaldamento rappresenta il 44% del totale, la produzione di ACS contribuisce per il 30% mentre le altre voci non superano complessivamente il 26%.

Servizio	EP _{N,REN} [kWh/m ²]	EP _{REN} [kWh/m ²]	EP _{TOT} [kWh/m ²]
Riscaldamento (H)	166	6	172
Acqua calda sanitaria (W)	114	4	118
Raffrescamento (C)	23	6	29
Ventilazione (V)	18	4	22
Illuminazione (I)	38	9	47
Globale	359	30	388

Tabella 22 - Indici di prestazione per servizio energetico

Ipotizzando di voler svolgere una DE senza l'utilizzo del calcolo dinamico orario, il software identifica l'edificio all'interno della classe E. Edilclima fornisce inoltre la classe per ogni zona termica individuata. Ciò può essere utile per condurre meglio l'analisi sugli interventi di efficientamento dell'edificio.

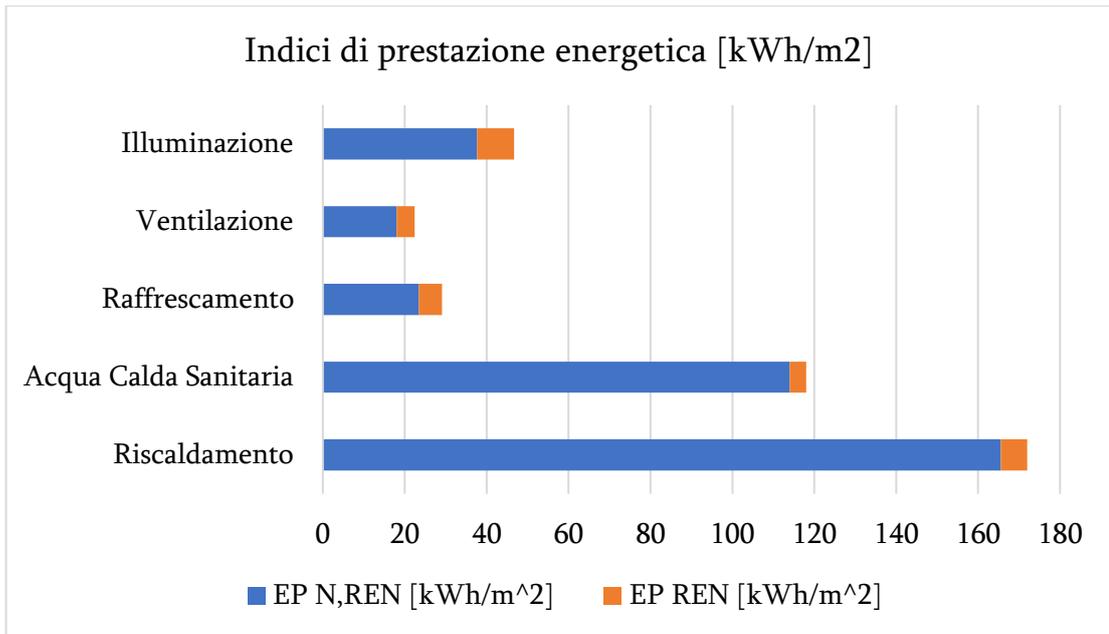


Figura 41 – Indice di prestazione per servizio energetico

5 Misure di efficienza energetica

Dall'analisi dello stato attuale dell'edificio, emergono le necessità e le opportunità di interventi specifici per ridurre il consumo energetico. Questo capitolo presenta dunque delle proposte di efficientamento, evidenziando le soluzioni previste sia sull'involucro che sugli impianti.

A seguito di numerosi incontri con i rappresentanti di ARPA Piemonte emerge che, a causa di limitazioni di natura finanziaria, tecnico-amministrativa e organizzativa, l'ente potrebbe optare per la realizzazione di interventi singoli o in sequenza. Questo approccio si allinea con il piano proposto dal "Passaporto di Ristrutturazione" nell'Art.10 della Direttiva EPBD, che prevede una roadmap di miglioramenti in un periodo di tempo ben definito. Pertanto, si è scelto di esporre sia ciascun intervento individualmente, mettendo in luce gli impatti energetici, sia un progetto complessivo che integri più soluzioni.

Le soluzioni proposte rispettano sia i requisiti minimi del Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 che quelli più stringenti del Conto Termico 2.0, incentivo promosso dal Decreto M.I.S.E. del 16 febbraio 2016 accessibile alle Pubbliche Amministrazioni. Questa scelta anticipa eventuali richieste di finanziamenti incentivi, garantendo che gli interventi proposti siano già conformi dal punto di vista prestazionale. Va inoltre sottolineato che sono stati presi in considerazione i limiti del D.R.M. che fanno riferimento alle ristrutturazioni importanti di secondo livello, inferiori a quelli di primo livello e a quelli della riqualificazione.

5.1 Interventi sull'involucro

Vengono di seguito proposte misure di efficientamento che riguardano la copertura, l'involucro esterno e gli infissi.

5.1.1 Coibentazione della copertura

La copertura si estende per 1148 m², ovvero il 31,8% della superficie totale esterna. L'intervento migliorativo prevede l'aggiunta di un pannello strutturale e portante in poliuretano espanso da 120 cm. La schiuma polyiso rigida a celle chiuse, di colore giallo, presenta una struttura cellulare chiusa e permette di avere ottime prestazioni termiche, mantenendole inalterate col passare del tempo [19]. L'azienda fornitrice è Ediltec e il prodotto prende il nome di POLIISO TEGOLA (Fig.42). Sono stati inoltre aggiunti due strati: il primo è costituito da una barriera al vapore in fogli di polietilene che ha il compito di impedire o limitare la diffusione di vapore acqueo attraverso la struttura, evitando così la condensazione del vapore all'interno dello strato isolante o in altre parti della costruzione; il secondo è costituito da un impermeabilizzante a base di bitume che protegge la struttura da infiltrazione d'acqua.



Figura 42 - POLIISO TEGOLA

La nuova trasmittanza è pari a 0,158 W/m²K, inferiore sia rispetto ai limiti del D.R.M. sia a quelli del Conto termico 2.0, equivalenti rispettivamente a 0,24 e 0,20 W/m²K. Poiché la superficie interessata è superiore al 25% ed inferiore al 50%, questo intervento può far parte, se preso singolarmente, di una ristrutturazione importante di 1° livello e non di una riqualificazione o di una ristrutturazione di 2° livello.

L'impatto di questo intervento riguarda principalmente il riscaldamento. La potenza dispersa attraverso la copertura si riduce notevolmente, passando da 35 kW a 5 kW,

con un decremento dell'87%. L'energia primaria globale per il riscaldamento diminuisce del 15%, scendendo da 540 MWh/anno a 461 MWh/anno. Di conseguenza l'indice di prestazione energetica $EP_{GL,H}$ si riduce anch'esso, passando da 172 kWh/m² a 147 kWh/m². In Fig.43 e Tab.23 viene mostrata la stratigrafia della copertura.

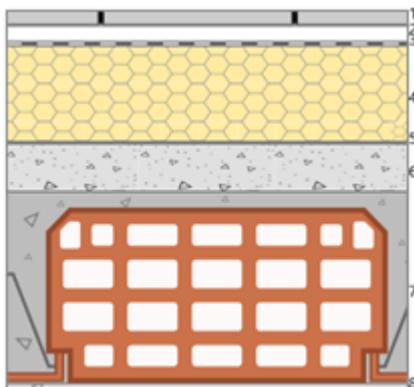


Figura 43 - Sezione del solaio di copertura coibentato

Solaio di copertura coibentato (476 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conduttività λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza sup. interna	-	-	0,170	-	-	0,158
1	Piastrelle in granito	20	4,1000	0,011	3000	1,00	
2	Intercapedine debolmente ventilata	20	-	-	-	-	
3	Impermeabilizzante a base di bitume	5	0,1700	-	1200	1,00	
4	POLIISO TEGOLA - Pannello in schiuma di poliuretano espanso	120	0,0220	-	40	1,50	
5	Barriera vapore in fogli di polietilene	1	0,3300	-	920	2,20	
6	C.l.s. con m.v. media	60	1,3500	0,059	2000	1,00	
7	Soletta in laterizio	240	0,5000	0,400	1450	0,84	
8	Malta di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
-	Resistenza sup. esterna	-	-	0,071	-	-	

Tabella 23 - Stratigrafia del solaio di copertura coibentato

5.1.2 Isolamento del muro perimetrale

I tamponamenti si estendono per 1514 m², ovvero il 41,9% della superficie totale esterna. L'intervento migliorativo prevede l'insufflaggio di lana minerale di vetro all'interno dell'intercapedine spesso 20 cm. Questa tecnica consiste nell'inserimento di materiale isolante sciolto nelle murature perimetrali e permette di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio con una procedura relativamente semplice (Fig.44). L'insufflaggio si distingue, infatti, per la facilità di installazione e i costi ridotti rispetto ad altre soluzioni di isolamento. Tuttavia, esistono alcune limitazioni come la mancanza di controllo visivo sull'inserimento del materiale che può causare una distribuzione non omogenea dello stesso. Inoltre, questa tecnica può comportare sia la riduzione che la formazione o l'accentuazione di ponti termici. Questo rappresenta un aspetto critico che va valutato in fase di progetto e che verrà esaminato più nel dettaglio nelle sezioni successive del presente documento.

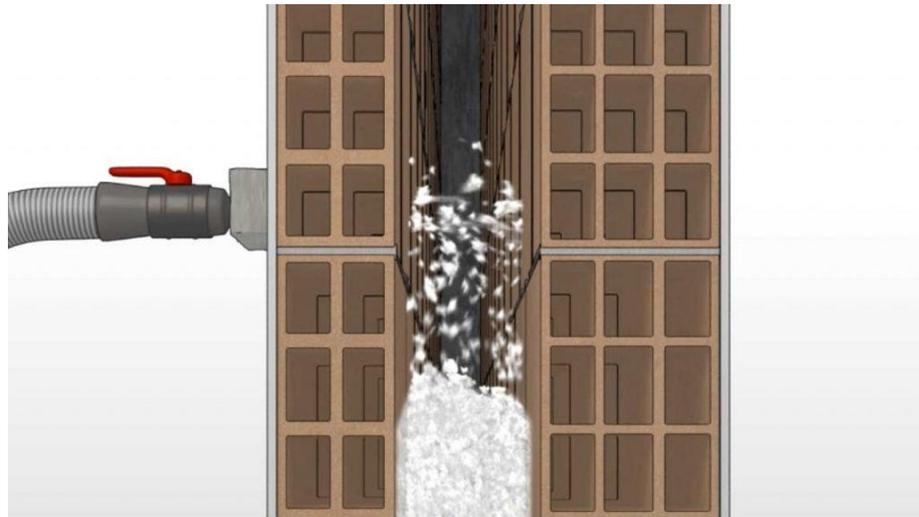


Figura 44 - Inserimento dell'isolante in intercapedine [20]

Il materiale isolante utilizzato, la lana minerale di vetro in formato fiocchi, è priva di leganti e prodotta con altissima percentuale di materiale proveniente da riciclo (fino al 90%) [21]. L'azienda fornitrice è Knauf Insulation e il prodotto prende il nome di SUPAFIL LOFT 045, Fig.45.



Figura 45 - SUPAFIL LOFT 045

La nuova trasmittanza è pari a $0,196 \text{ W/m}^2\text{K}$, inferiore sia rispetto ai limiti del D.R.M. sia del Conto termico 2.0, equivalenti rispettivamente a $0,28$ e $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$. Poiché la superficie interessata è superiore al 25% ed inferiore al 50%, questo intervento può far parte, se preso singolarmente, di una ristrutturazione importante di 1° livello e non di una riqualificazione o di una ristrutturazione di 2° livello.

L'impatto di questo intervento riguarda principalmente il riscaldamento. La potenza dispersa attraverso il muro esterno perimetrale si riduce notevolmente, passando da 51 kW a 8 kW , con un decremento dell'84%. L'energia primaria globale per il riscaldamento diminuisce del 18%, scendendo da 540 MWh/anno a 442 MWh/anno . Di conseguenza l'indice di prestazione energetica $EP_{GL,H}$ si riduce anch'esso, passando da 172 kWh/m^2 a 141 kWh/m^2 . In Fig.46 e Tab.24 viene mostrata la stratigrafia del muro esterno perimetrale.

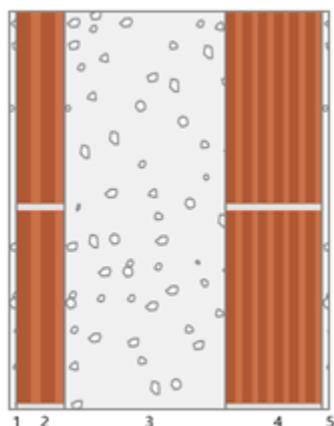


Figura 46 - Sezione del muro esterno perimetrale isolato

Muro esterno perimetrale isolato (400 mm)							
N.	Descrizione strato	Spessore s (mm)	Conducibilità λ (W/mK)	Resistenza termica R (m ² K/W)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico (J/kgK)	Trasmittanza Termica U (W/m ² K)
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	0,198
1	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
2	Muratura in laterizio pareti interne (um. 0.5%)	60	0,3600	0,167	1000	1,00	
3	SUPAFIL LOFT 045 – Lana di vetro per insufflaggio	200	0,0450	4,444	12	1,03	
4	Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1.5%)	120	0,4700	0,255	1000	1,00	
5	Malta di calce o di calce e cemento	10	0,9000	0,011	1800	1,00	
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,071	-	-	

Tabella 24 - Stratigrafia del muro esterno perimetrale isolato

5.1.3 Sostituzione dei serramenti e delle chiusure oscuranti

I serramenti si estendono per 787 m², ovvero il 21,8% della superficie totale esterna. L'intervento migliorativo prevede la sostituzione dei componenti finestrati attuali con nuovi elementi aventi un vetro doppio basso emissivo e telaio in alluminio con taglio

termico (Fig.47). Lo spessore dei due vetri è di 33 mm, distanti tra di loro 15 mm. L'azienda fornitrice è Crepaldi Serramenti.



Figura 47 - Serramento scelto con vetro doppio

La nuova trasmittanza media è pari a $1,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, inferiore sia rispetto ai limiti del D.R.M. sia del Conto termico 2.0, equivalenti rispettivamente a $1,30$ e $1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$. Poiché la superficie interessata è inferiore al 25%, questo intervento può far parte, se preso singolarmente, di una riqualificazione e non di una ristrutturazione di 1° o 2° livello.

L'impatto di questo intervento riguarda principalmente il riscaldamento. La potenza dispersa attraverso i serramenti si riduce notevolmente, passando da 112 kW a 23 kW , con un decremento del 79%. L'energia primaria globale per il riscaldamento diminuisce del 28%, scendendo da 540 MWh/anno a 388 MWh/anno . Di conseguenza l'indice di prestazione energetica $EP_{GL,H}$ si riduce anch'esso, passando da 172 kWh/m^2 a 124 kWh/m^2 . In Fig.48 e Tab.25 vengono mostrate le caratteristiche dei componenti finestrati.

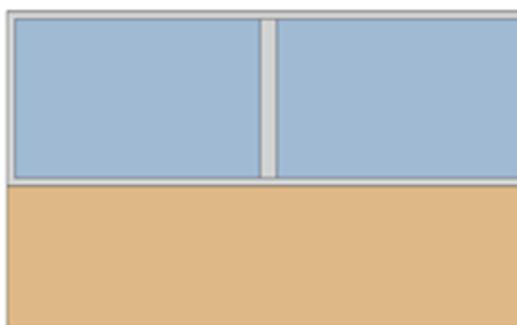


Figura 48 - Esempio di serramento con vetro doppio

Serramenti con vetro doppio		
		Spessore s (mm)
Vetro	Primo vetro	33
	Intercapedine	15
	Secondo vetro	33
Serramento	Tipologia di serramento	Singolo
	Classe di permeabilità	Classe 4 da Norma UNI EN 12207
Dati per il calcolo degli apporti solari e delle schermature	Emissività epsilon	0,100
	Fattore di trasmittanza solare $g_{gl,n}$	0,350
Dati per il calcolo degli apporti solari e delle schermature	Fattore trasmissione solare totale g_{gl+sh}	0,344
	Resistenza termica chiusure [m ² K/W]	0,09
Chiusure oscuranti	F_{SHUT}	0,6
Trasmittanza totale	U_w [W/m ² K]	1,100

Tabella 25 - Caratteristiche del serramento con vetro doppio

5.1.4 Correzione dei ponti termici

Gli interventi visti possono determinare, come spiegato nelle sezioni precedenti, la formazione o l'accentuazione di ponti termici. In questo paragrafo si vuole dunque analizzare l'impatto degli isolamenti effettuati facendo un focus sui nodi già trattati all'interno del paragrafo 4.3.8. La Tab.26 mette in evidenza la differenza tra la trasmittanza termica lineica pre e post-intervento.

Tipologia	Ψ_e (W/mK)	
	Pre Intervento	Post Intervento
Parete - Pilastro	0,234	0,527
Parete - Balcone	0,199	0,442
Parete - Solaio Interpiano	0,270	0,579
Parete - Solaio Controtterra	0,059	0,594
Parete - Copertura	-0,640	0,317
Parete - Telaio	0,168	0,007
Angolo tra pareti sporgente	-0,465	-0,049
Angolo tra pareti rientrante	0,178	0,027

Tabella 26 - Trasmissione termica lineica pre e post intervento

Si può osservare che la Ψ_e di alcuni nodi è diminuita in valore assoluto. In particolare, questo riguarda il nodo parete-telaio, l'angolo tra pareti rientrante e l'angolo tra pareti sporgente. Al contrario, altri nodi hanno evidenziato un incremento della loro trasmittanza termica lineica e, pertanto, potrebbero beneficiare di interventi mirati per la riduzione del ponte termico. Un caso particolare è invece rappresentato dal nodo parete-copertura, che ha subito una variazione di segno, passando a un valore positivo. A differenza degli altri nodi, non è immediato stabilire se ci sia stato un miglioramento o un peggioramento nella trasmissione di calore attraverso di esso. In ogni caso, è possibile ricorrere ad un intervento mirato anche per questo nodo.

L'intervento di miglioramento prende il nome di "correzione del ponte termico", definito nel D.lgs 192/2005. Il ponte termico corretto si verifica quando la trasmittanza termica della parete fittizia (il tratto di parete esterna in corrispondenza del ponte termico) non supera per più del 15% la trasmittanza termica della parete corrente. Tuttavia, nel corso degli anni questa definizione si è rivelata problematica, soprattutto per la difficoltà nel determinare le dimensioni precise della parete fittizia in casi complessi, come gli angoli. Il D.M. 26/06/2015 ha dunque abbandonato questa definizione, orientandosi verso norme tecniche che richiedono la quantificazione di tutti i ponti termici esclusivamente attraverso il coefficiente lineico [22].

Il materiale isolante utilizzato nella realizzazione degli interventi di riduzione del ponte termico varia in base alle specifiche esigenze. La scelta ricade spesso sull'aerogel,

materiale solido e leggero che presenta una conducibilità termica molto bassa. Queste proprietà lo rendono particolarmente efficace, poiché non necessita di ampi spazi per l'installazione, permettendo un'ottimizzazione sia in termini di efficienza termica che di ingombro.

Qui di seguito vengono riportati gli interventi specifici per i nodi interessati:

- Nodo parete-pilastro (Fig.49): il ponte viene corretto isolando il pilastro esternamente. Questo intervento non è sempre possibile poiché dipende dalla posizione del pilastro all'interno dei tamponamenti.

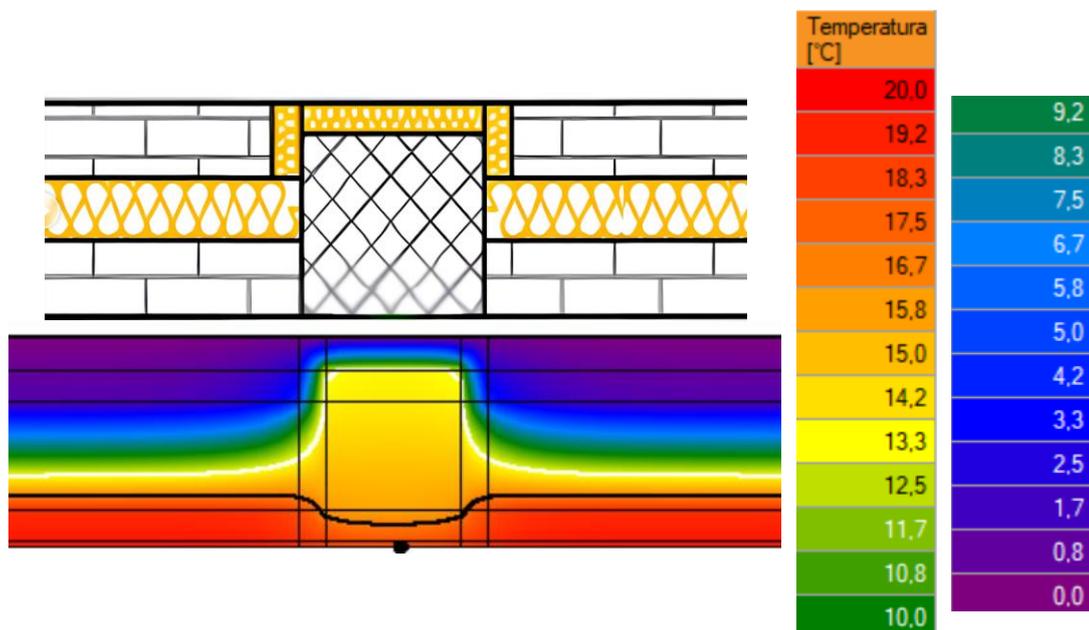


Figura 49 - Correzione del ponte termico e gradiente di temperatura per il nodo parete-pilastro

- Nodo parete-balcone (Fig.50): il ponte termico viene corretto attraverso taglio, con inserimento di materiale isolante tra il solaio interpiano e il balcone. Qualora questo metodo non fosse applicabile, un'altra soluzione potrebbe essere l'impacchettamento, cioè l'applicazione dell'isolante intorno all'oggetto.

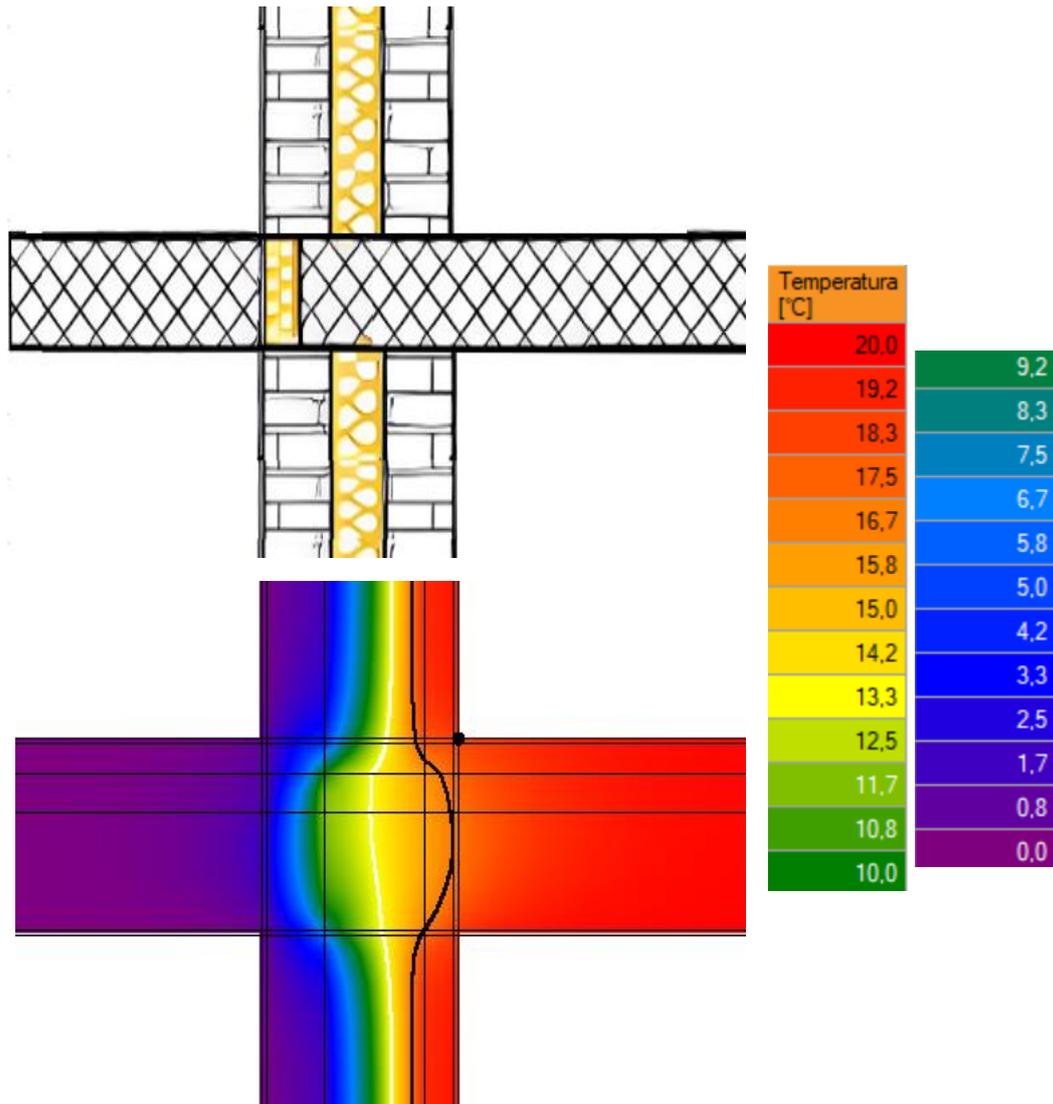


Figura 50 - Correzione del ponte termico e gradiente di temperatura per il nodo parete-balcone

- Nodo parete-solaio interpiano: similmente al caso precedente, viene applicato il taglio termico all'interno del solaio.
- Nodo parete-solaio controterra (Fig.51): la correzione del ponte termico si realizza posizionando materiale isolante nella parte più esterna del solaio controterra. Dove possibile, si può valutare l'aggiunta di ulteriore materiale isolante sotto la trave di fondazione, come mostrato in figura.

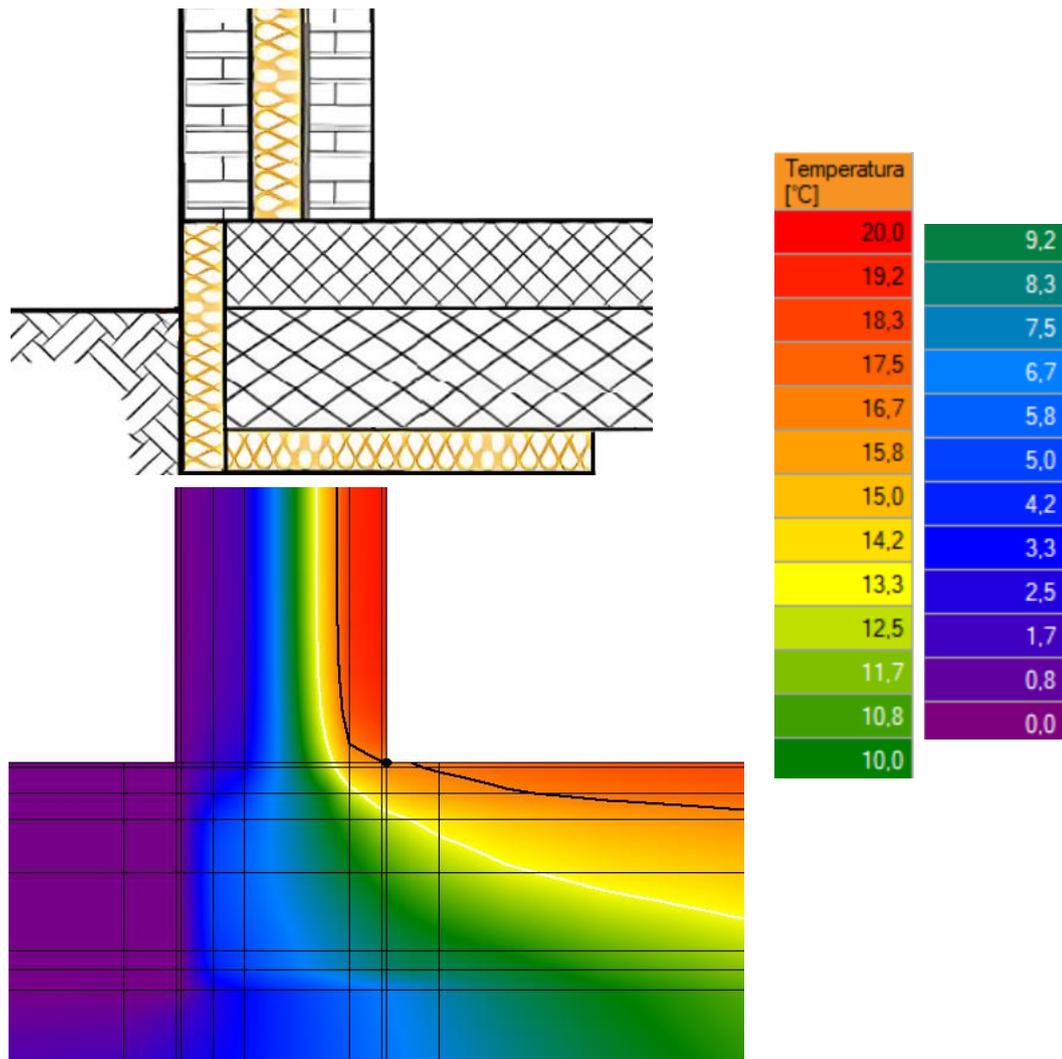


Figura 51 - Correzione del ponte termico e gradiente di temperatura per il nodo parete-solaio controterra

- Nodo parete-copertura (Fig.52): la mitigazione del ponte termico si ottiene mediante l'applicazione di materiale isolante sulla superficie esterna del solaio di copertura, come mostrato in figura. In situazioni dove la copertura si estende oltre il perimetro dell'edificio, si può considerare l'adozione di un isolamento esterno specificamente per queste aree sporgenti.

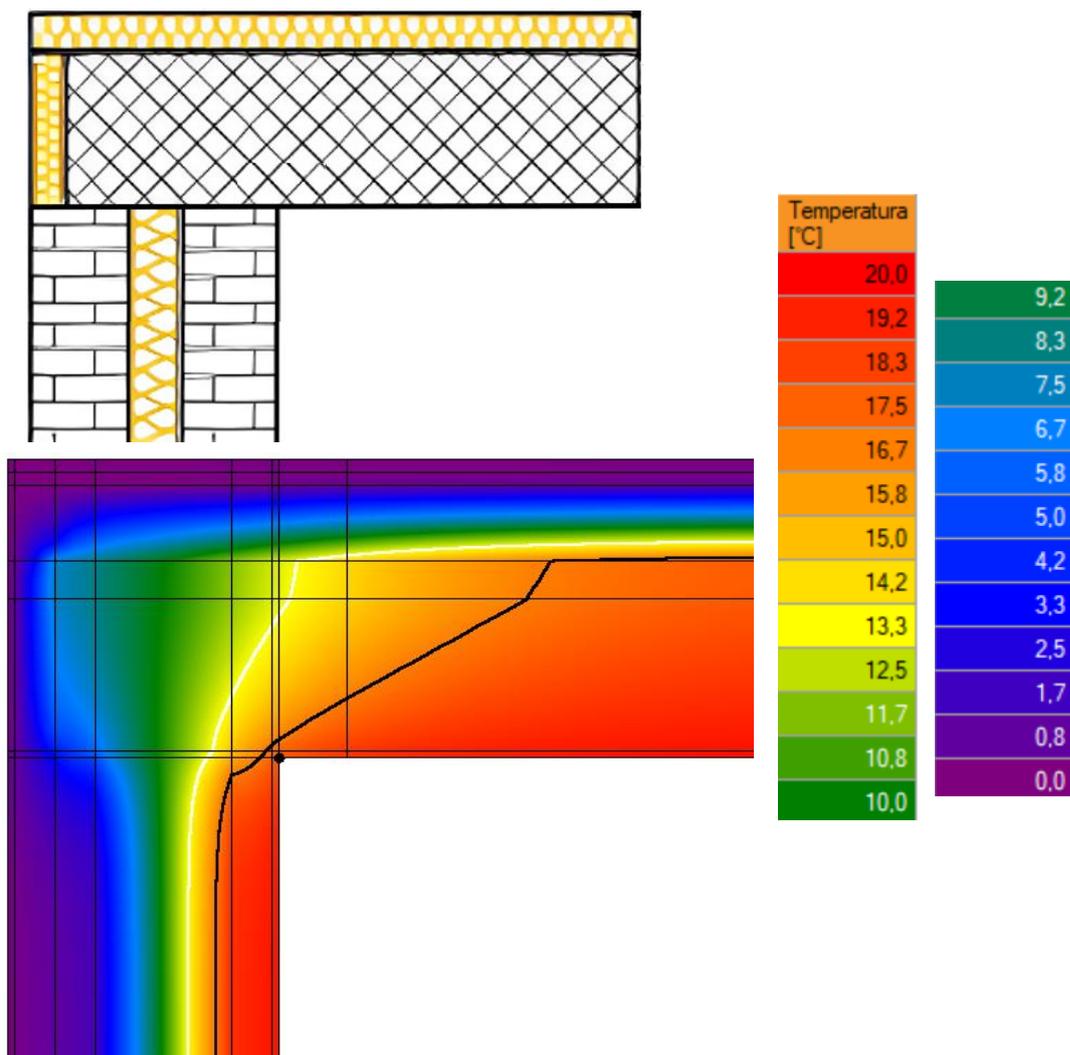


Figura 52 - Correzione del ponte termico e gradiente di temperatura per il nodo parete-copertura

Le trasmittanze termiche lineiche ottenute a seguito di correzione vengono riportate nella Tab.27. Questa non riporta i ponti termici non oggetti di miglioramento.

Tipologia	Ψ_e (W/mK)	
	Post Intervento	Con Correzione
Parete - Pilastro	0,527	0,149
Parete - Balcone	0,442	0,254
Parete - Solaio Interpiano	0,579	0,281
Parete - Solaio Controtterra	0,594	0,292
Parete - Copertura	0,317	0,125

Tabella 27 – Trasmittanza termica lineica post intervento e a seguito di correzione

5.1.5 Progetto complessivo dell'involucro

Integrando le soluzioni precedentemente esaminate, si può elaborare un progetto complessivo per l'intero involucro. L'effetto principale di tale approccio riguarda il riscaldamento, con una riduzione della potenza dispersa da 197 kW a 36 kW, che corrisponde a una diminuzione dell'82%. L'energia primaria totale necessaria per il riscaldamento subisce una riduzione del 54%, passando da 540 MWh/anno a 250 MWh/anno. Di conseguenza, si registra anche una diminuzione dell'indice di prestazione energetica $EP_{GL,H}$, che scende da 172 kWh/m² a 80 kWh/m². Considerando che il riscaldamento rappresenta il 44% dell'indice di prestazione energetica totale, l'adozione di questi interventi potrebbe portare questa quota al 27%. Questo si traduce in un passaggio dell' $EP_{GL,TOT}$ da 388 kWh/m² a 296 kWh/m², con una riduzione globale del 24%.

Poiché questa soluzione prevede un rifacimento della superficie esterna superiore al 50%, l'insieme degli interventi fanno necessariamente parte di una ristrutturazione importante di secondo livello. Di conseguenza, bisogna effettuare anche un rifacimento dell'impianto termico. Questo intervento verrà approfondito nel capitolo successivo.

5.2 Interventi sugli impianti

Vengono di seguito proposte misure di efficientamento che riguardano l'impianto termico, l'involucro esterno e gli infissi.

5.2.1 Sostituzione dell'impianto termico

La riqualificazione della centrale termica fa parte dei lavori di efficientamento energetico programmato da ARPA ed è stata concretizzata grazie al contributo di un professionista esterno [23]. Il progetto ha visto la sostituzione dell'attuale caldaia a basamento BIKLIM PR1-H da 697 kWt con un sistema ibrido VIESSMANN. Esso è composto da una pompa di calore aria/acqua integrata con una caldaia compatta a

condensazione, entrambi realizzati e concepiti dal fornitore per funzionare in abbinamento fra loro. Infine, è stata prevista l'installazione di un puffer per ottimizzare l'uso combinato delle due unità. I dati di questo progetto vengono utilizzati per valutare l'efficienza e l'efficacia dell'intervento attraverso la simulazione. L'impianto ibrido installato permette di gestire le diverse esigenze energetiche dell'edificio in maniera flessibile ed efficiente. Il sistema di controllo, infatti, monitora costantemente le condizioni operative come la temperatura esterna, la domanda di energia dell'edificio e la temperatura di mandata. Questo permette di ottimizzare il funzionamento di entrambe le unità, identificando il momento ottimale in cui attivare la caldaia, in funzione del carico energetico che la pompa di calore non è in grado di coprire autonomamente. In Fig.53 viene mostrata la configurazione descritta che prevede dunque il funzionamento esclusivo della pompa di calore quando la temperatura esterna è più alta mentre un funzionamento combinato al diminuire di essa.

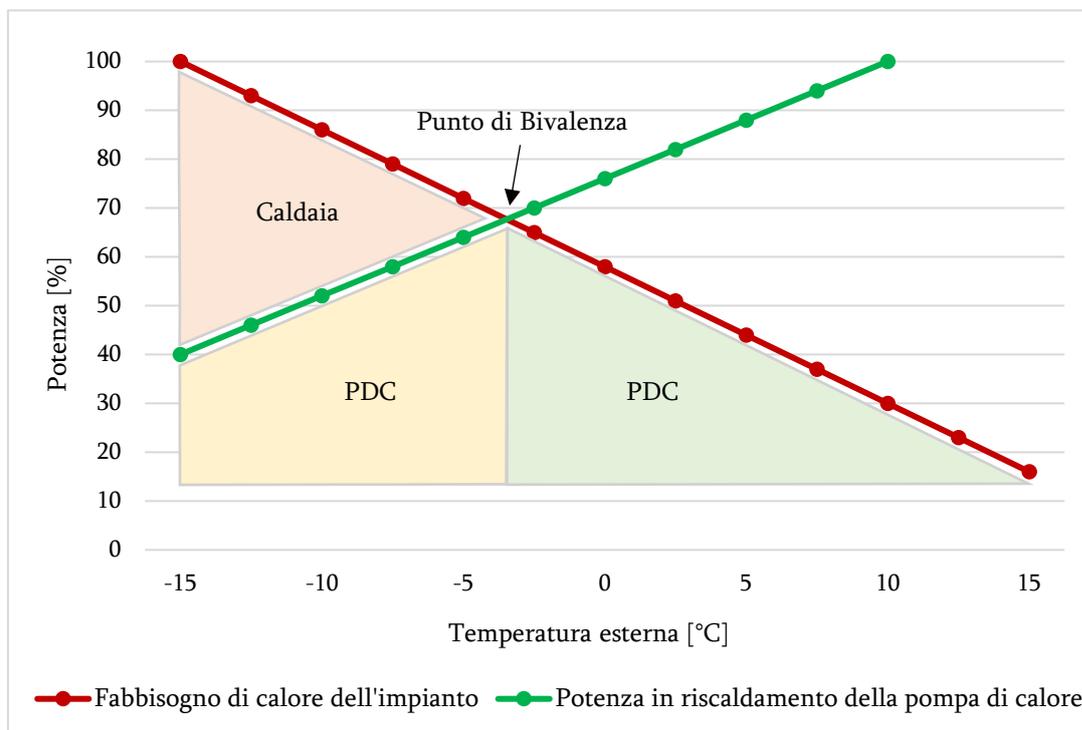


Figura 53 – Configurazione del sistema ibrido

La caldaia, modello VITOCROSSAL 100 CIB-640 D, è composta da due caldaie modulari per una potenza termica utile complessiva in riscaldamento di 582 kW. Essa viene alimentata dalla rete gas esistente mediante l'installazione di una nuova rampa gas e la realizzazione di un nuovo collegamento con la rete. Sulla tubazione di mandata, entro il primo metro di tubazione dalla caldaia, è previsto un tronchetto di ispezione INAIL completo di tutte le sicurezze come indicato nella Raccolta "R" Edizione 2009, al cui interno è presente la regolamentazione tecnica sugli impianti di riscaldamento ad acqua calda. Lo scarico fumi avviene per via di un collettore collegato alla canna fumaria esistente. Qui di seguito viene riportata la Tab.28 contenente i dati tecnici mentre in Fig.54 è presente un'immagine della macchina.

02 - CALDAIA A CONDENSAZIONE Marca: VISSMANN Modello: VITOCROSSAL 100 CIB-640 D		
PARAMETRO	U.D.	VALORE
DATI RISCALDAMENTO		
POTENZA TERMICA (50°/30°C)	kW	636.6
POTENZA TERMICA (80°/60°C)	kW	582
PRESSIONE MASSIMA DI ESERCIZIO	bar	6
CONTENUTO D'ACQUA CALDAIA	litri	360
TEMPERATURA MASSIMA DI ESERCIZIO	°C	95
CARATTERISTICHE ELETTRICHE		
TENSIONE / FREQUENZA	V / Hz	230 V - 50 Hz
POTENZA (Alla pontenzialità Massima e Minima)	W	393/26.5
CONSUMO GAS		
PRESSIONE NOMINALE	mbar	20 / 25
PORTATA MASSIMA DI CONSUMO	m ³ /h	31.75
PORTATA MINIMA DI CONSUMO	m ³ /h	6.35
DATI DIMENSIONALI		
PESO COMPLESSIVO	Kg	770
FUMISTERIA (Diametro)	mm	300
LARGHEZZA - ALTEZZA - PROFONDITÀ	mm	1500 - 1090 - 1500

Tabella 28 - Dati tecnici della caldaia a condensazione VISSMANN 100 CIB-640 D

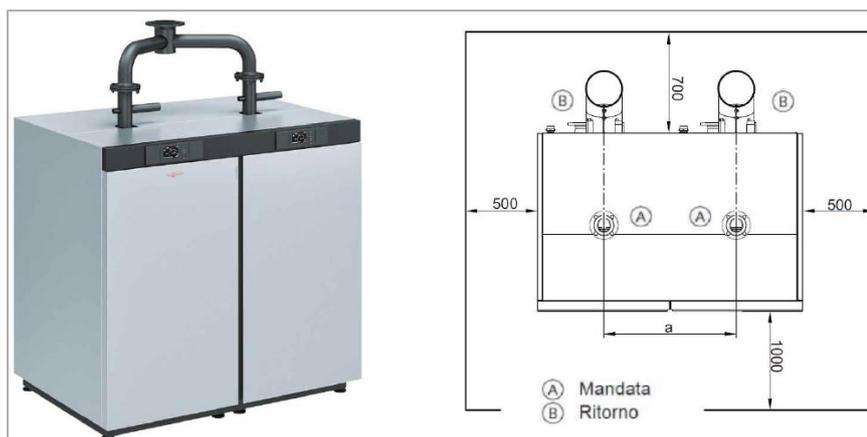


Figura 54 - Caldaia a condensazione VISSMANN 100 CIB-640 D

La pompa di calore, modello VISSMANN VITOCAL 100-A PRO CA-SS 161-R410, in abbinamento alla caldaia a condensazione, ha una potenza termica utile di 196,5 kWt in fase di riscaldamento. Nella macchina sono integrati: un serbatoio inerziale, pompa di circolazione (EP1), vaso di espansione, valvola di sicurezza, sistema antigelo. La pompa di calore viene installata all'esterno della centrale tenendo conto degli spazi utili per il corretto funzionamento della macchina e per la manutenzione. È inoltre necessario realizzare una rete di scarico condensa. Qui di seguito viene riportata la Tab.29 contenente i dati tecnici mentre in Fig.55 sono presenti delle sezioni della macchina.

01 - POMPA DI CALORE Marca: VISSMANN Modello: VITOCAL 100-A PRO CA-SS 161-R410		
PARAMETRO	U.D.	VALORE
DATI RISCALDAMENTO		
POTENZA TERMICA	kW	196,5
PERDITE DI CARICO	kPa	49,5
COP	-	3,36
CARATTERISTICHE ELETTRICHE		
ALIMENTAZIONE ELETTRICA	V / Hz / ph	400/50/3
POTENZA ASSORBITA TOTALE (Compressori e Ventilatori)	W	58,4
LIVELLI SONORI		
PRESSIONE NOMINALE	dB(A)	85,4
PORTATA MASSIMA DI CONSUMO	dB(A)	66,2
PORTATA MINIMA DI CONSUMO	m	1

Tabella 29 - Dati tecnici della pompa di calore aria/acqua VISSMANN 100-A PRO CA-SS 161-R410

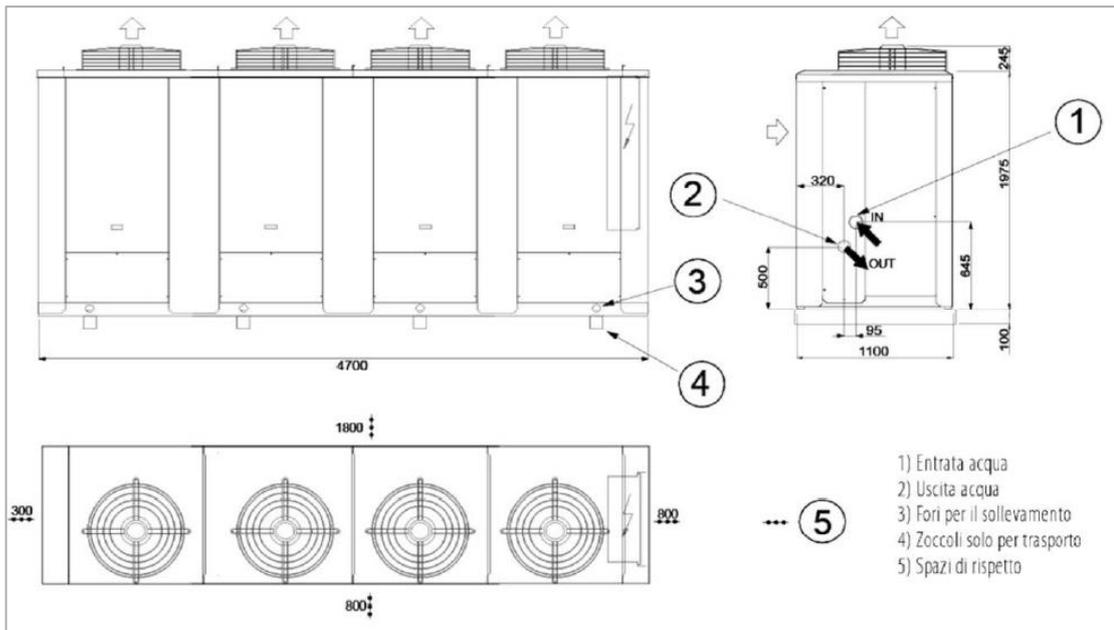


Figura 55 - Viste della pompa di calore aria/acqua VISSMANN 100-A PRO CA-SS 161-R410

Il gruppo ibrido prevede l'installazione di un serbatoio di accumulo inerziale dalla capacità di 500 litri, installato all'interno della Centrale Termica. Il modello è VISSMANN Hybridcell Max 500. In Fig.56 vengono riportate le sezioni del puffer e relative dimensioni.

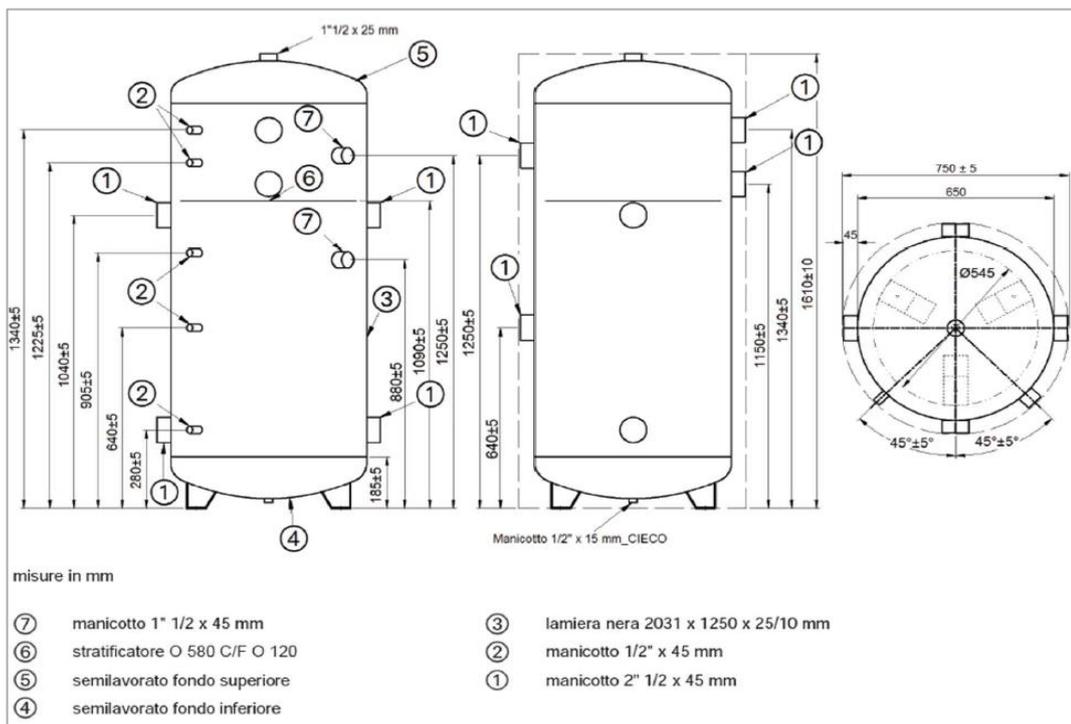


Figura 56 - Serbatoio di accumulo VISSMANN Hybridcell Max 500

L'intervento prevede l'installazione di due nuove pompe per la circolazione del fluido all'interno dei circuiti:

- EP1) Pompa di Circolazione – Circuito Pompa di Calore;
- EP2) Pompa di Circolazione – Circuito Primario Caldaia a Condensazione.

Per riflettere il comportamento dinamico dell'impianto ibrido in funzione delle condizioni ambientali e delle caratteristiche delle macchine, sono stati forniti dei dati di input all'interno del software EDILCLIMA. In particolare, sia per la caldaia che per la pompa di calore, sono state compilate delle tabelle di rendimento che correlano la potenza disponibile alla temperatura dell'aria esterna e a quella di mandata dell'acqua, scelta in fase di progetto. Queste informazioni permettono al software di simulare la performance stagionale del sistema determinando i carichi per ciascuna macchina, di calcolare l'efficienza energetica complessiva e valutare l'impatto sulla prestazione energetica dell'edificio per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria.

A seguito della modifica dell'impianto, l'energia primaria globale per il riscaldamento è diminuita del 12,3%, scendendo da 540 MWh/anno a 474 MWh/anno. Di conseguenza l'indice di prestazione energetica $EP_{GL,H}$ si è ridotto anch'esso, passando da 172 kWh/m² a 151 kWh/m². D'altra parte, l'energia primaria globale per la produzione di ACS è diminuita del 12,0%, scendendo da 370 MWh/anno a 326 MWh/anno. In questo caso l'indice di prestazione energetica $EP_{GL,W}$ si è ridotto, passando da 118 kWh/m² a 104 kWh/m².

È bene precisare che la proposta di sostituzione dell'impianto termico è stata formulata considerando un involucro edilizio invariato. Nel caso in cui si decidesse di effettuare più interventi sull'edificio, sarebbe opportuno progettare un impianto con potenze inferiori. Questa soluzione verrà trattata nelle prossime sezioni.

In Fig.57 qui di seguito viene mostrata planimetria di progetto in scala 1:50. Nelle Fig.58, Fig.59 e Fig.60 viene invece illustrato lo schema d'impianto che si vuole realizzare della centrale termica e del locale pompe o sottocentrale.

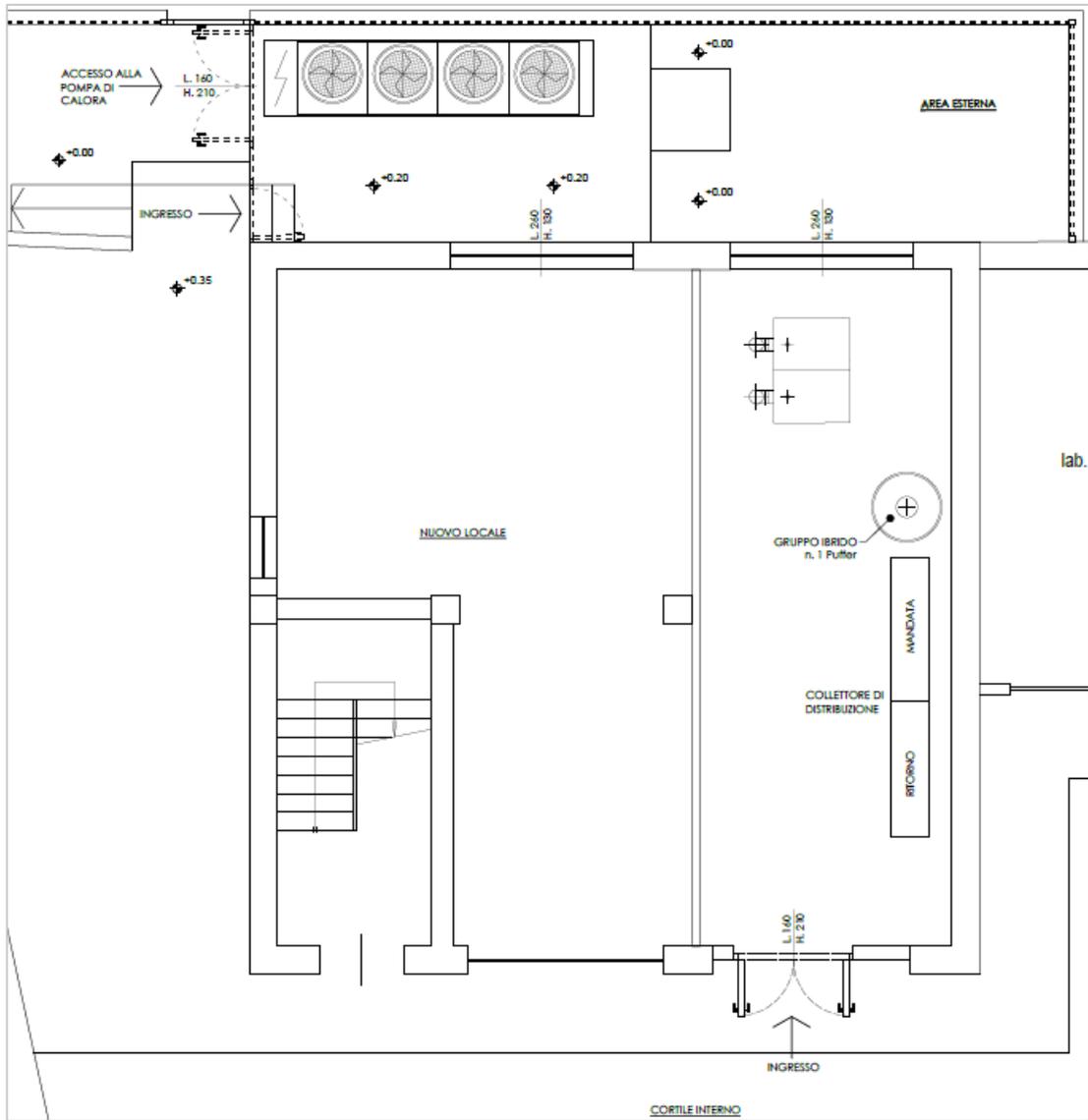


Figura 57 - Planimetria di progetto della centrale termica [23]

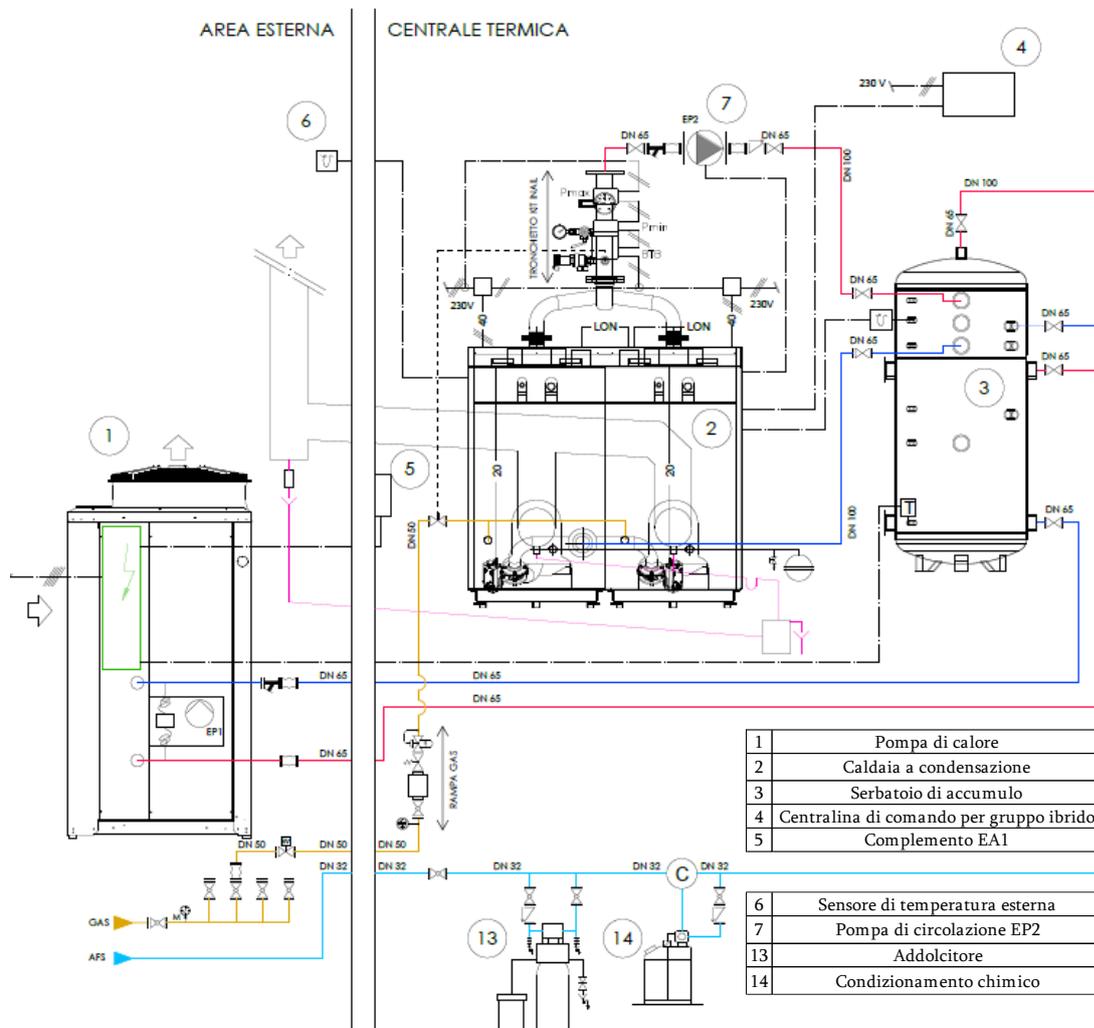


Figura 58 - Schema d'impianto di progetto – Centrale termica Parte 1 [23]

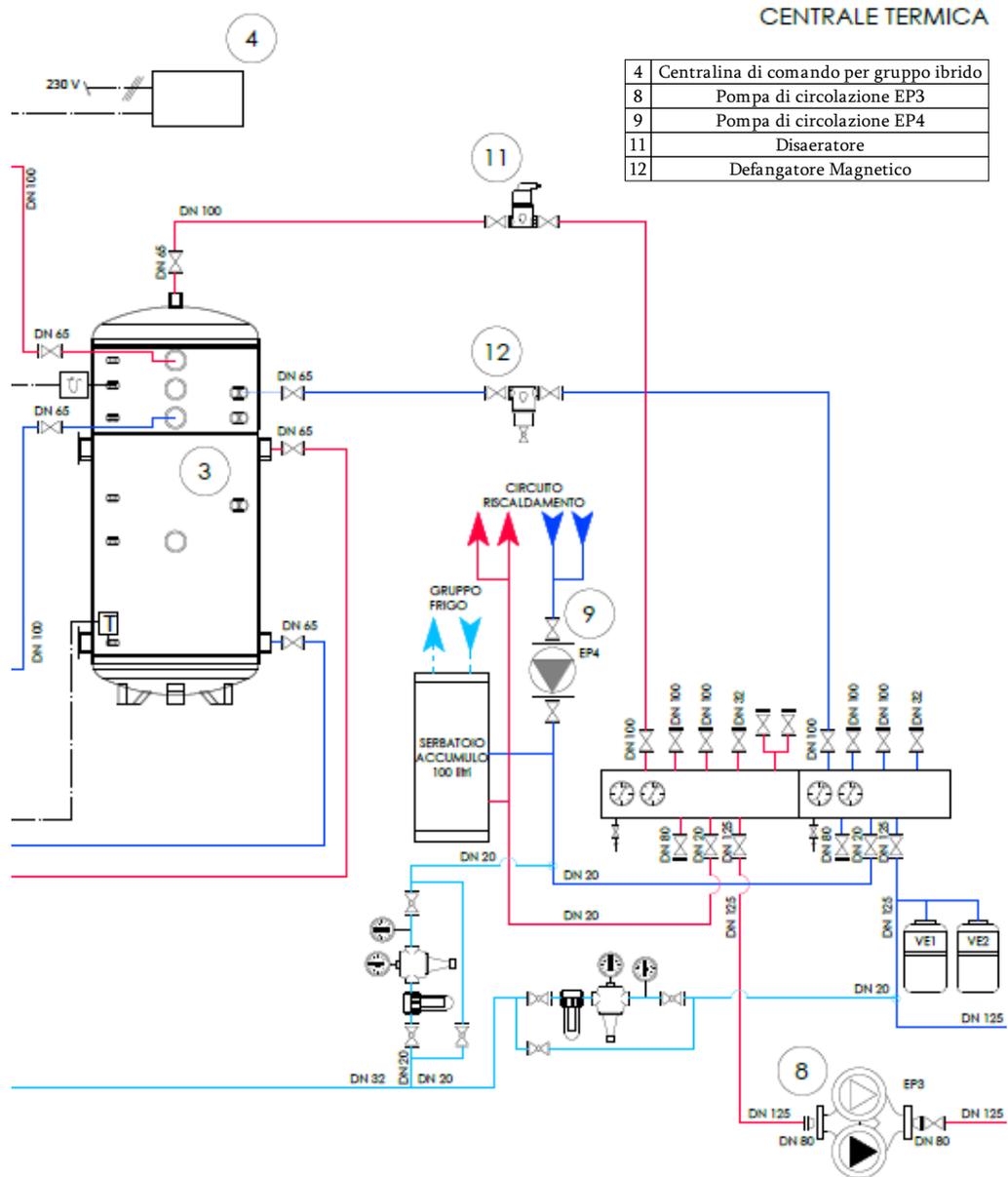


Figura 59 - Schema d'impianto di progetto – Centrale termica Parte 2 [23]

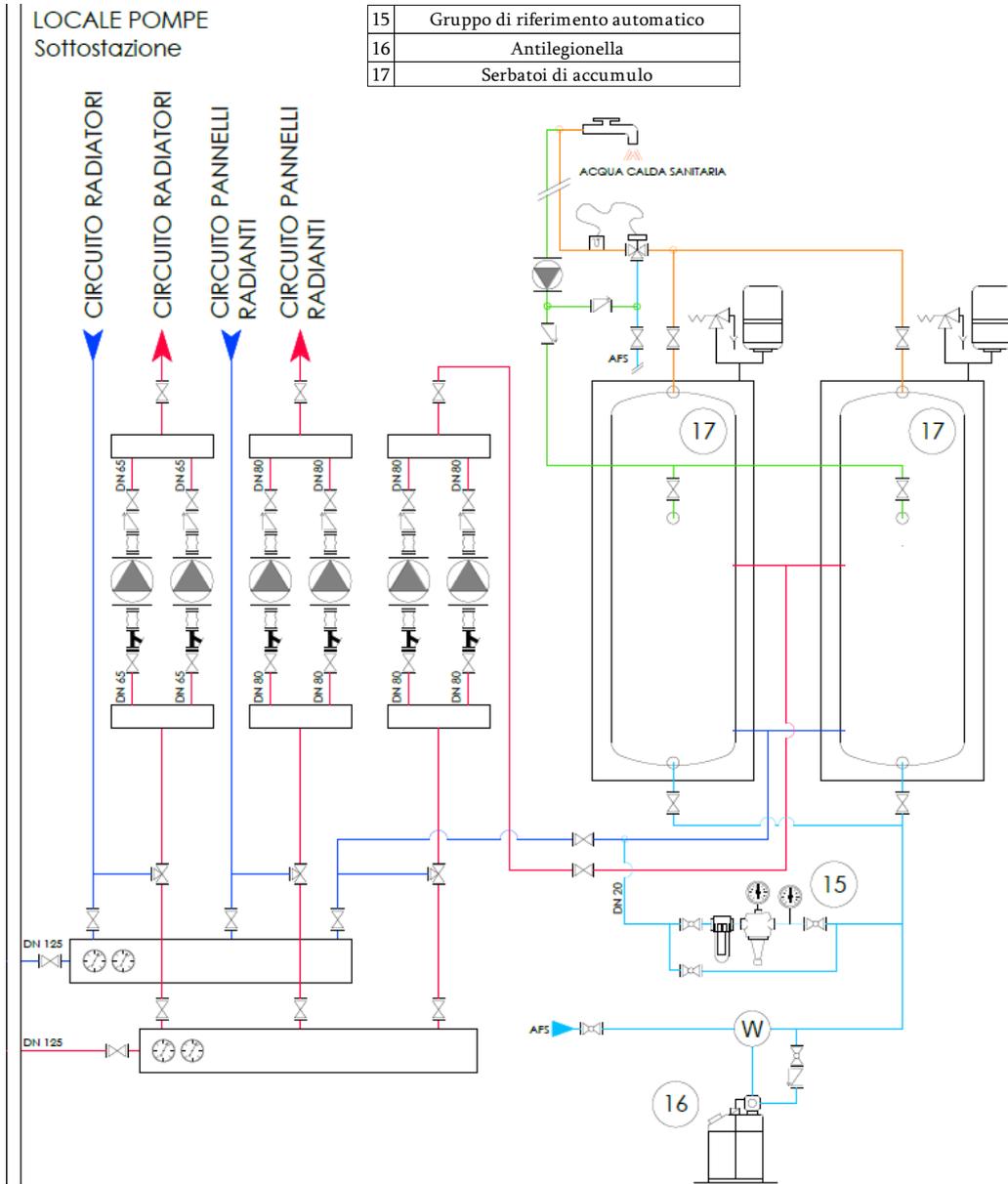


Figura 60 - Schema d'impianto di progetto – Sottocentrale [23]

5.2.2 Sostituzione delle unità autonome a pompa di calore

Il progetto prevede la sostituzione delle attuali macchine ad espansione diretta a servizio dei diversi locali dell'edificio con due distinte unità di trattamento aria (UTA) (Fig.61), finalizzate a climatizzare gli ambienti assicurando le condizioni termigrometriche ottimali. La scelta di distinguere le due macchine deriva dalla diversa gestione dell'aria richiesta all'interno dei laboratori chimici e biologici e dei locali frigo rispetto agli uffici e ai corridoi. Nei primi, a causa del rischio di contaminazione da aerosol di agenti patogeni o sostanze chimiche volatili, è necessario evitare la presenza del recuperatore all'interno della macchina, optando per un sistema di immissione ed estrazione separata che non preveda l'incrocio dei due flussi. Al contrario, negli uffici e nei corridoi è possibile implementare un sistema di estrazione e d'immissione con recupero di calore. Infine, è prevista sola estrazione nei bagni.



Figura 61 - Modello UTA Airwave

Tenendo conto della disposizione non uniforme degli spazi all'interno dell'edificio, è consigliabile posizionare le Unità di Trattamento Aria in un luogo centrale della struttura per un'efficace distribuzione dell'aria. Le opzioni per l'installazione comprendono il sottotetto, che può essere utilizzato efficacemente rimuovendo i ventilatori di estrazione, o il locale delle pompe, situato al piano interrato, che offre accessibilità e facilità di manutenzione. Un'alternativa potrebbe essere il posizionamento sul tetto, purché la sua struttura sia adeguata a sostenere il peso delle

UTA. Ognuna di queste soluzioni va attentamente valutata per assicurare non solo l'efficienza del sistema, ma anche per garantire la conformità alle normative di sicurezza e strutturali.

Per determinare correttamente la taglia delle macchine, è necessario conoscere i carichi termici da soddisfare e le portate d'aria da trattare. Il metodo dinamico orario, tenendo conto delle variazioni dei carichi termici ora per ora, ha permesso di individuare il carico termico nell'ora di massimo carico, che si verifica il 15/7 alle ore 16, somma del carico sensibile e latente. Il primo viene calcolato tramite un bilancio orario che tiene conto dei flussi di calore dovuti a convezione, ventilazione, irraggiamento e dei carichi interni. Il secondo, invece, viene determinato considerando la produzione di umidità interna, il contributo di umidità assorbita o rilasciata dai materiali dell'edificio e l'umidità associata alle infiltrazioni.

Per il calcolo dei carichi termici sono state prese in considerazione, per ogni zona dell'edificio, le condizioni di set point interne quali temperatura e umidità relativa, oltre a variabili quali i profili di occupazione e l'attività metabolica degli occupanti, il calore dissipato dalle apparecchiature, l'apporto di calore dovuto all'illuminazione e l'inerzia termica dei materiali. Inoltre, è stata considerata la necessità di estrazione dell'aria dai laboratori nonché le condizioni climatiche esterne, quali temperatura esterna, umidità relativa e irraggiamento solare. Tutti questi parametri sono rimasti invariati rispetto allo stato di fatto, fatta eccezione per alcuni uffici e per i corridoi precedentemente non climatizzati, a cui sono stati associati gli stessi input di locali simili per utilizzo. Il valore di umidità relativa di set point, ad esempio, è stato definito in base alle esigenze specifiche di comfort e alla UNI 10339, imponendo un range tra il 35% e 45% in inverno e 50% e 60% in estate.

In estate, le UTA gestiscono il controllo sia delle condizioni termo-igrometriche dell'ambiente sia dei parametri di qualità dell'aria. Durante il resto dell'anno, invece, le UTA non si occupano del riscaldamento degli ambienti ma si limitano a garantire la qualità dell'aria, introducendo aria esterna alle stesse condizioni termiche

dell'ambiente interno. Per il calcolo dei carichi termici è stato quindi considerato un flusso di ventilazione che rispetta le esigenze di ricambio d'aria, calcolato in base alla normativa UNI 10339, che definisce i requisiti di ventilazione per i diversi tipi di ambienti.

Le Tab.30 e Tab.31 riflettono i risultati di questi calcoli, mostrando le portate d'aria da trattare e le specifiche delle UTA selezionate, nonché i carichi termici di raffrescamento, la potenza utile delle batterie di raffrescamento delle UTA che sottraggono calore al fluido termovettore e la potenza frigorifera del refrigeratore, responsabile della fornitura di acqua tecnica alle batterie.

	Tipologia	Locale	Portata d'aria per locale (m ³ /h)	Portata d'aria da trattare totale (m ³ /h)	Portata d'aria massima trattabile UTA (m ³ /h)
Uta Airwave VAQ0707	Estrazione	Servizi	3341	21755	40000
	Estrazione e immissione separata	Laboratori	21622		
		Locali Frigo	132		
Uta Airwave VAQ0506	Estrazione e immissione con recuperatore	Uffici	3300	4814	25000
		Corridoi	1514		

Tabella 30 – Portate d'aria da trattare e specifiche UTA selezionate

	Locale	Carico Termico Raffrescamento (kW)	Potenza utile Raffrescamento UTA (kW)	Carico Termico Raffr. Totale (kW)	Potenza Frigorifera Refrigeratore (kW)
Uta Airwave VAQ0707	Servizi	278	312	423	513
	Laboratori				
	Locali Frigo				
Uta Airwave VAQ0506	Uffici	145	176		
	Corridoi				

Tabella 31 – Carichi termici di raffrescamento, specifiche delle UTA e del refrigeratore

Il refrigeratore che si occupa di fornire acqua alle batterie delle UTA è il modello Airwave VAWC180-S da 513kWf (3 moduli da 171 kWf ciascuno), in Fig.62. Le batterie di post-riscaldamento sono invece servite dalla pompa di calore aria/acqua già descritta nel paragrafo precedente. La Tab.32 illustra le principali caratteristiche tecniche della macchina.



Figura 62 – Modello refrigeratore Airwave

Item	Model	Modular series		
		VAWC180-S VAWH180-S	VAWC250-S VAWH250-S	VAWC320-S VAWH320-S
Cooling Capacity	kW	171	238	304
	Btu/h	584,000	812,000	1,038,000
	TR	49	68	86.4
Heating Capacity	kW	188	261	333
	Btu/h	642,000	891,000	1,137,000
	TR	53.4	74.2	95
Domestic Hot Water (Optional)	Capacity			
	kW	51.3	71.3	91.2
	Btu/h	175,000	244,000	312,000
	TR	15	20	26
	Inlet Temp °C			50
	Outlet Temp °C			55
Water Flow	m ³ /h	9.3	12.9	16.5
	Water Pipe size			DN50
Compressor	Type		Hermetic scroll compressor	
	Power Input kW	12.5x4	[(12.5+20.4)x2]	20.4x4
	Energy steps		0-25-50-75-100%	
Fan	Type		Axial	
	Power input kW	1.8x4	1.8x6	1.8x6
	Air flow rate m ³ /h	92000	138000	138000
Water-side Heat Exchanger	Type		Shell and Tube	
	Water flow m ³ /h	29.4	41	52.3
	Drop Water Side kPa			40
	Water Pipe size	DN80		DN100
Refrigerant	Type		R407C	
	Charge Amount (KG)	60	80	110
	Expansion device		Thermal Expansion Valve	
Noise dB(A)		73	73	75
Dimension	Length mm	2290	3270	4020
	Width mm	2190	2190	2190
	Height mm	2480	2480	2480
Power		3 -380V-50HZ		
Total Power Input kW		57.2	76.6	92.4
Max. operating current A		158	235	316
Weight kG		2050	2400	2800
		2250	2620	3050

Tabella 32 - Caratteristiche della Airwave VAWC180-S

Considerando le dimensioni considerevoli del refrigeratore, sarebbe necessario effettuare un'analisi dettagliata per il suo posizionamento, analogamente a quanto discusso per le unità di trattamento aria.

Un aspetto cruciale nella progettazione di una UTA è il sistema di distribuzione aeraulico. Malgrado esso non venga approfondito all'interno di questo documento, vengono forniti alcuni elementi per il suo dimensionamento. L'obiettivo è assicurare un equilibrio tra l'immissione e l'estrazione dell'aria, essenziale sia per mantenere una buona qualità dell'aria interna che per prevenire perdite di carico eccessive e velocità elevate nelle condotte, fattori che possono compromettere l'efficienza del sistema.

Una possibile scelta progettuale potrebbe essere l'adozione di una configurazione ramificata, che prevede un canale principale e diverse diramazioni. Questa struttura minimizza gli interventi strutturali ma può richiedere l'installazione di controsoffitti per nascondere i condotti, influenzando l'uso dello spazio e l'aspetto estetico degli ambienti.

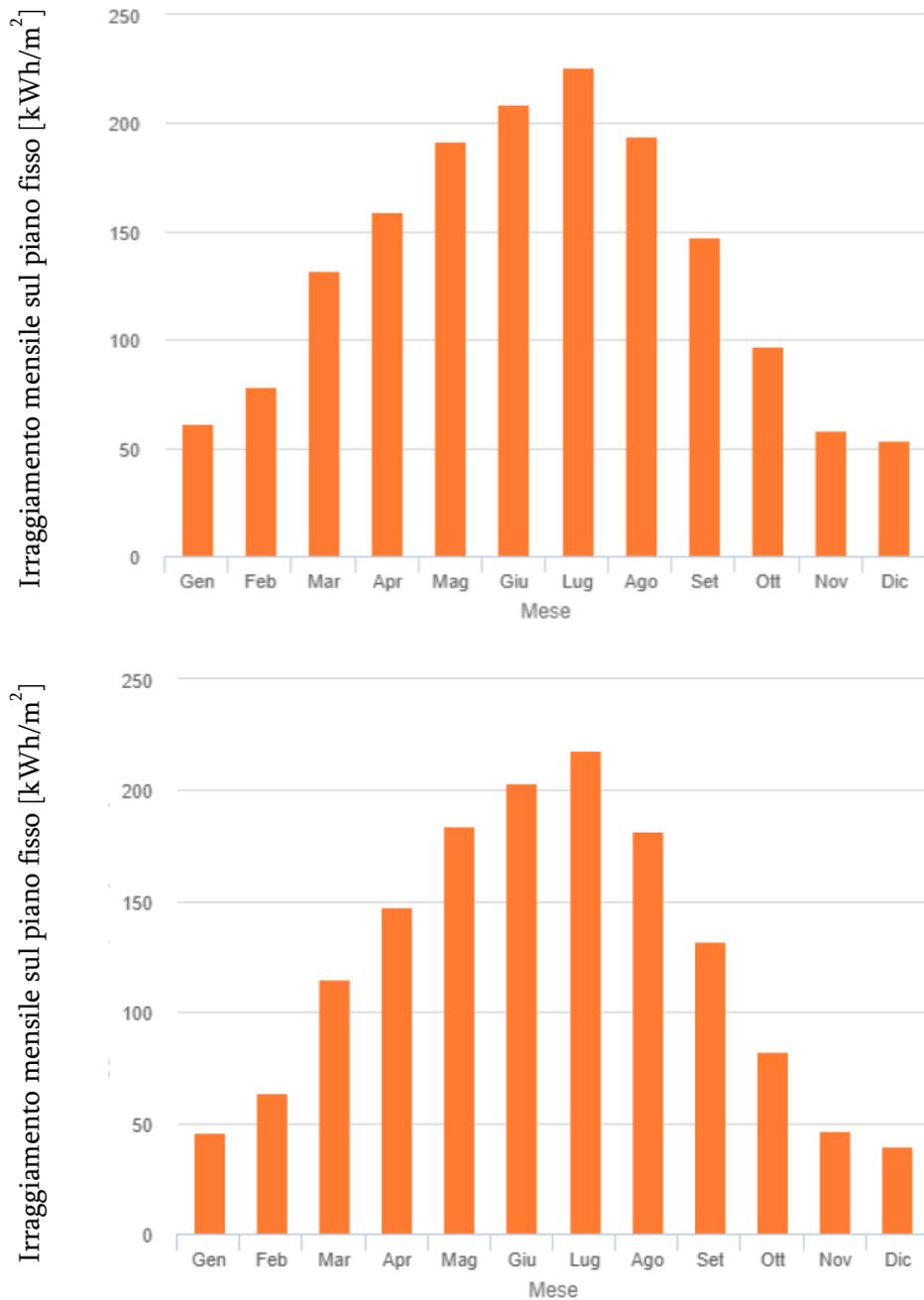
Per quanto riguarda il dimensionamento delle canalizzazioni, si può considerare il metodo di calcolo a velocità costante, che uniforma la velocità dell'aria nei condotti e contribuisce a mitigare il rumore generato dal flusso d'aria. Questo inizia determinando la portata d'aria per ogni bocchetta, sia di immissione che di estrazione, un dato fornito dal software Edilclima. Si procede poi calcolando le lunghezze delle canalizzazioni secondarie che collegano le bocchette ai tratti principali. Per le canalizzazioni principali, la portata d'aria e le lunghezze si determinano sommando progressivamente le portate dai rami secondari. Il dimensionamento delle canalizzazioni viene svolto con l'ausilio di diagrammi e tabelle specifiche per il calcolo delle perdite di carico totali (distribuite e concentrate) sia per la rete di immissione che per quella di estrazione, individuando i percorsi con le maggiori cadute di pressione. Le perdite di carico determinano la prevalenza dei ventilatori, tenendo in considerazione anche l'accumulo di sporco nei filtri [24].

L'impatto dell'intervento proposto sull'edificio riguarda sia il raffrescamento che la ventilazione. Con l'estensione delle aree soggette a raffrescamento, che ora includono ulteriori uffici e spazi comuni, si registra un incremento dell'energia primaria globale utilizzata per il raffrescamento del 33,8%, crescendo da 91 MWh/anno a 122 MWh/anno. Questo porta a un corrispondente aumento dell'indice di prestazione energetica per il raffrescamento $EP_{GL,C}$ che sale da 29 kWh/m² a 39 kWh/m². Analogamente, l'indice di prestazione energetica per la ventilazione $EP_{GL,V}$ aumenta anch'esso da 22 kWh/m² a 31 kWh/m², riflettendo l'implementazione di un sistema di trattamento dell'aria operativo durante tutto l'anno per garantire condizioni igrometriche ideali. In precedenza, infatti, la ventilazione era esclusivamente legata all'estrazione meccanica attraverso le cappe nei laboratori mentre il raffrescamento era limitato ai mesi estivi con l'uso delle unità autonome a pompa di calore. L'intervento ha un impatto anche sul sistema di riscaldamento, a causa della necessità di compensare le perdite di calore dovute alla ventilazione durante i mesi invernali. Pertanto, si registra un incremento dell'8% nell'indice di prestazione energetica per il riscaldamento, $EP_{GL,H}$, che passa da 172 kWh/m² a 185 kWh/m².

5.2.3 Installazione dell'impianto fotovoltaico

L'intervento per l'installazione dell'impianto fotovoltaico ha richiesto un'analisi preliminare della radiazione solare nelle aree selezionate del sito. Utilizzando il software PVGIS, fornito dal Joint Research Centre della Commissione Europea, sono state esaminate con precisione l'intensità e la variabilità della luce in funzione delle diverse ore del giorno e delle stagioni. Attraverso l'inserimento di dati topografici, è stato possibile modellare accuratamente l'ambiente circostante e determinare l'influenza degli ostacoli sulla radiazione solare, valutando l'impatto dell'ombreggiamento prodotto da elementi naturali e strutture artificiali, quali rilievi geografici, edifici e vegetazione.

A seguito di questa analisi (Fig.63), sono state selezionate le falde sud e ovest per l'installazione dei moduli fotovoltaici, entrambe aventi un'inclinazione o angolo di tilt di 12°.



*Figura 63 - Irraggiamento medio solare mensile sul piano fisso
Falda Sud (sopra) e Falda Ovest (sotto)*

La falda sud dispone di un'area utilizzabile di 160 m² mentre la falda ovest di 180 m² (Fig.64). Si tratta, in entrambi i casi, di circa il 70% della superficie totale.

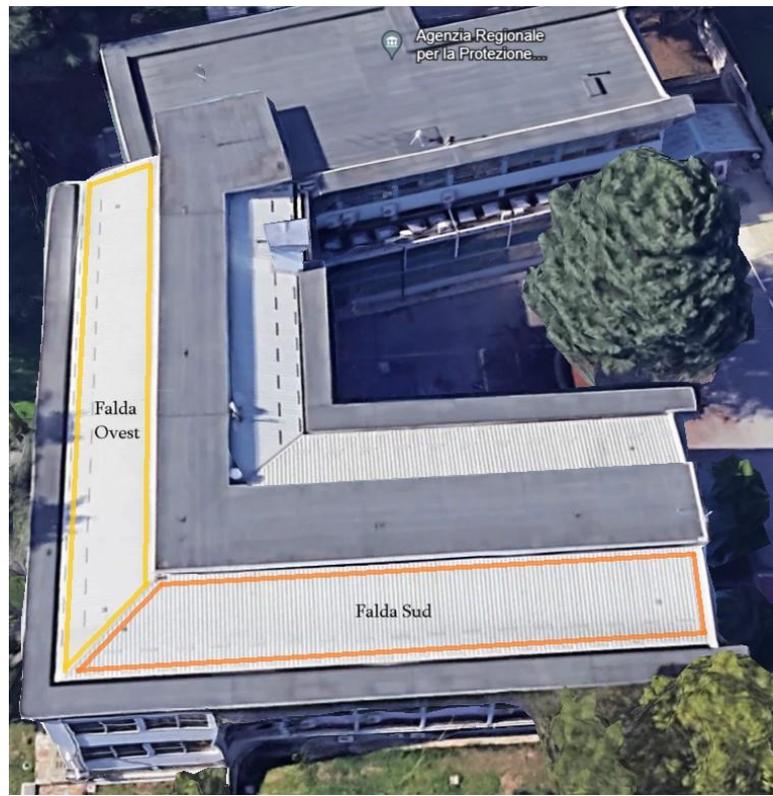


Figura 64 - Falda Sud e Falda Ovest

Il modulo fotovoltaico selezionato per questo progetto è il SUN POWER SPR-MAX3-430 MAXEON 3, le cui specifiche sono dettagliate in Tab.33. Ogni modulo, come possibile leggere all'interno della scheda tecnica, offre una potenza di picco di 430 Wp. Prendendo in considerazione la superficie disponibile per l'installazione, l'inclinazione dei pannelli (angolo di tilt di 12°) e l'orientamento (azimuth di 0° verso sud e 90° verso ovest), è stato possibile calcolare l'energia annua stimata prodotta dall'impianto. Per una previsione accurata, sono state integrate nel modello anche le perdite di sistema, stimate al 14%, un fattore di ombreggiamento del 95% e un coefficiente di rendimento di conversione dei moduli del 22%. A seguito dell'inserimento di questi dati di input nel software Edilclima, la produzione energetica stimata è di circa 69339 kWh/anno se si considerano l'assenza di interruzioni nel servizio e/o significative variazioni climatiche e/o problemi

impiantistici o manutentivi. Una suddivisione mensile di questa produzione, per ciascuna falda, è illustrata in Tab.34. Si prevede l'installazione di 94 pannelli sulla falda sud e 107 pannelli sulla falda ovest, aventi rispettivamente una potenza nominale totale di 40,6 kWp e 46 kWp.

MAXEON 3 POWER: 415-430 W | EFFICIENCY: Up to 22.7%

Electrical Data			
	SPR-MAX3-430	SPR-MAX3-425	SPR-MAX3-415
Nominal Power (P _{nom}) ⁸	430 W	425 W	415 W
Power Tolerance	+5/0%	+5/0%	+5/0%
Panel Efficiency	22.7%	22.3%	21.8%
Rated Voltage (V _{mpp})	70.4 V	70.0 V	69.2 V
Rated Current (I _{mpp})	6.11 A	6.07 A	6.00 A
Open-Circuit Voltage (V _{oc}) (+/-3%)	81.4 V	81.3 V	81.2 V
Short-Circuit Current (I _{sc}) (+/-3%)	6.57 A	6.57 A	6.55 A
Max. System Voltage	1000 V IEC		
Maximum Series Fuse	20 A		
Power Temp Coef.	-0.27% / °C		
Voltage Temp Coef.	-0.236% / °C		
Current Temp Coef.	0.058% / °C		

Tests And Certifications (Pending)	
Standard Tests ⁹	IEC 61215, IEC 61730
Quality Management Certs	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	IEC 60068-2-68, MIL-STD-810G
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	1000 V: IEC 62804
Available Listings	TUV

Sustainability Tests and Certifications	
IFLI Declare Label	First solar panel labeled for ingredient transparency and LBC-compliance. ¹¹
Cradle to Cradle Certified™ Bronze	First solar panel line certified for material health, water stewardship, material reutilization, renewable energy & carbon management, and social fairness. ¹²
Green Building Certification Contribution	Panels can contribute additional points toward LEED and BREEAM certifications.
EHS Compliance	RoHS, OHSAS 18001:2007, lead free, REACH SVHC-163

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40°C to +85°C
Impact Resistance	25 mm diameter hail at 23 m/s
Solar Cells	112 Maxeon 3 Cells
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-68, Stäubli (MC4), 3 bypass diodes
Weight	21.2 kg
Max. Load ¹⁰	Wind: 2400 Pa, 244 kg/m ² front & back Snow: 5400 Pa, 550 kg/m ² front
Frame	Class 1 black anodized (highest AAMA rating)

Please read the safety and installation guide.

Tabella 33 – Caratteristiche tecniche del modulo fotovoltaico MAXEON 3

Energia da fotovoltaico prodotta [kWh]						
Falda	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno
Sud	1423	1793	2942	3442	4030	4290
Ovest	1152	1624	2893	3620	4393	4741
Falda	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Sud	4571	3982	3134	2162	1314	1232
Ovest	5020	4239	3179	2050	1145	967

Tabella 34 – Energia mensile prodotta per falda

È importante sottolineare che l'infrastruttura dell'impianto fotovoltaico non si limita ai soli moduli. Essa comprende anche un convertitore da corrente continua a corrente alternata (inverter), essenziale per il trasferimento dell'energia dal campo fotovoltaico alla rete elettrica, rispettando tutti i requisiti tecnici e normativi di sicurezza. I valori di tensione e corrente in ingresso dell'inverter devono essere compatibili con quelli del campo fotovoltaico, mentre i valori di tensione e frequenza in uscita devono essere adeguati alla connessione con la rete elettrica. Inoltre, per ottimizzare l'efficienza dei moduli fotovoltaici e seguire il punto di massima potenza (MPP), è prevista l'installazione di un ottimizzatore di potenza.

Per quanto riguarda l'impatto di questo intervento, esso riguarda tutti i servizi energetici, soprattutto quelli che utilizzano energia elettrica come fonte primaria, come il sistema di raffrescamento e ventilazione (UTA) e l'illuminazione. In seguito all'installazione dell'impianto fotovoltaico si registra una diminuzione dell'indice di prestazione energetica non rinnovabile $EP_{GL,N,REN}$ che scende da 359 kWh/m² a 307 kWh/m², mentre quello di prestazione energetica rinnovabile $EP_{GL,REN}$ aumenta leggermente passando da 30 kWh/m² a 34 kWh/m². Tali cambiamenti si riflettono anche sull'indice di prestazione globale totale $EP_{GL,TOT}$, che mostra una riduzione del 12,2%, passando da 388 kWh/m² a 341 kWh/m².

5.3 Progetto integrato

In questo sottocapitolo viene presentata una soluzione integrata degli interventi, evidenziando come l'attuazione simultanea di essi possa portare diversi vantaggi rispetto alla realizzazione di singole misure. Sebbene questo progetto includa anche gli interventi sull'involucro e sull'impianto fotovoltaico visti in precedenza, questi non vengono approfonditi qui di seguito in quanto non sono oggetti di modifica.

Particolare attenzione viene invece rivolta agli impianti di riscaldamento e raffrescamento. Rispetto agli interventi considerati singolarmente, l'approccio integrato consente una riduzione delle potenze necessarie per questi impianti. Questa

diminuzione della potenza richiesta comporta diversi vantaggi: in primo luogo, un risparmio economico notevole, poiché impianti meno potenti implicano minori costi sia in termini di investimento iniziale sia per la manutenzione. Inoltre, impianti di dimensioni ridotte occupano meno spazio, favorendo un migliore utilizzo degli spazi interni dell'edificio. Dal punto di vista ambientale, impianti meno potenti e di dimensioni ridotte comportano un impatto inferiore, sia in termini di risorse utilizzate per la loro produzione sia per il minor consumo energetico durante il funzionamento. Si evidenzia dunque come l'integrazione degli interventi non solo migliori le prestazioni energetiche dell'edificio, ma contribuisca anche a una gestione più efficiente e sostenibile delle risorse.

I risultati della simulazione del nuovo modello, forniti da Edilclima, si basano sulla decisione di applicare gli interventi dell'involucro senza modifiche, così come il mantenimento inalterato dell'impianto fotovoltaico. L'adozione di una soluzione integrata degli interventi permette di utilizzare impianti con potenze minori, sia per il riscaldamento che per il raffrescamento. Nei paragrafi che seguono vengono presentate le nuove soluzioni per entrambi i sistemi.

5.3.1 L'impianto termico

Il progetto integrato di efficientamento energetico ha evidenziato la possibilità di soddisfare il carico termico dell'edificio mediante l'adozione di una pompa di calore VITOCAL 200-A PRO AA da 130 kWt. Tale scelta è supportata dai dati di prestazione della macchina, che mostrano un coefficiente di prestazione (COP) adeguato anche in condizioni di bassa temperatura esterna.

Dalle informazioni tecniche fornite, la potenza utile è soddisfatta anche considerando condizioni esterne più rigide. In effetti, ipotizzando una temperatura di mandata pari a 40 °C e una temperatura esterna di -5 °C (corrispondente alla minima di progetto secondo norma UNI12831), la potenza utile dichiarata è di 77kWt. Qui di seguito viene fornita la scheda tecnica della macchina (Tab.35).

Vitocal 200-A PRO AA-ID 50+179		50	58	66	75	86	98	112	130
Vitocal 200-CA PRO Ax-ID 50+179									
Raffreddamento (EN14511)									
Potenza frigorifera (1)	kW	49.6	57.4	65.4	74.4	85.4	97.2	112	129
Potenza assorbita (1)	kW	15.9	18.4	20.7	24.0	27.5	30.8	35.6	41.1
EER		3.12	3.12	3.16	3.10	3.11	3.16	3.15	3.14
ESEER		4.07	4.13	4.03	3.99	3.93	4.09	4.01	4.02
Classe EUROVENT		A	A	A	A	A	A	A	A
SEER (2)		4.17	4.20	4.19	4.21	4.21	4.22	4.22	4.19
Efficienza Energetica (2)	%	164	165	165	165	165	166	166	165
Riscaldamento (EN14511)									
Potenza termica (3)	kW	54.1	62.6	71.4	81.2	93.2	106	122	141
Potenza assorbita (3)	kW	16.6	19.2	21.6	25.1	28.8	32.2	37.2	43.0
COP (3)		3.26	3.26	3.31	3.24	3.24	3.30	3.28	3.27
Classe EUROVENT		A	A	A	A	A	A	A	A
SCOP (4)		3.47	3.43	3.42	3.62	3.64	3.46	3.56	3.53
Efficienza Energetica (4)		136	134	134	142	143	135	139	138
Classe Energetica (4)	%	A+	A+	A+	A+	-	-	-	-
Dimensioni									
Lunghezza BB-MC		2350	2350	2350	2350	2350	3550	3550	3550
SS-SM	mm	2350	2350	2350	3550	3550	3550	4700	4700
Profondità BB-SS-MC-SM	mm	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Altezza BB-MC / SS SM	mm	1920	2220	2220	2220	2220	1920	2220	2220
		1920	2220	2220	1920	1920	2220	2220	2220
Peso									
Peso in funzionamento	kg	620	695	755	765	775	870	1100	1110

Tabella 35 - Caratteristiche tecniche della pompa di calore VITOCAL 200-A PRO AA

5.3.2 L'impianto di raffrescamento

La revisione dell'impianto di raffrescamento richiede l'implementazione di un'unità di trattamento aria di dimensioni e potenze diverse, in risposta alla diminuzione della potenza richiesta dalle batterie di raffrescamento.

Nella Tab.36 qui di seguito vengono mostrati i carichi termici risultanti dalla nuova simulazione e relativi modelli scelti per quanto riguarda le UTA.

	Tipologia	Locale	Carico Termico Raff. (kW)	Potenza utile Raff. UTA (kW)	Carico Termico Raff. Tot. (kW)	Potenza frigorifera Refrigeratore (kW)
Uta Airwave VAQ0707	Estrazione	Servizi	259	312	364	412
	Estrazione e immissione separata	Laboratori				
		Locali Frigo				
Uta Airwave VAQ0505	Estrazione e immissione con recuperatore	Uffici	105	138	364	412
		Corridoi				

Tabella 36 - Carichi termici di raffrescamento, specifiche UTA e refrigeratore (progetto integrato)

Come si può osservare in tabella, la diminuzione del carico termico di raffrescamento determina una potenza del refrigeratore ridotta. Di conseguenza, è stato scelto il modello Airwave VAWC108-M da 412K_{WF} (4 moduli da 103 kW_F ciascuno), la cui scheda tecnica viene mostrata nella Tab.37.

Item	Model	Modular series					
		VAWC70-V VAWH70-V	VAWC100-V VAWH100-V	VAWC130-V VAWH130-V	VAWC68-M VAWH68-M	VAWC108-M VAWH108-M	
Cooling Capacity	kW	70	102	132	65	103	
	Btu/h	240,000	348,000	450,000	222,000	352,000	
	TR	20	29	37.5	18.5	29.2	
Heating Capacity	kW	73	106	140	69	112	
	Btu/h	252,000	360,000	480,000	236,000	382,000	
	TR	21	30	40	20	32	
Domestic hot Water (optional)	Capacity						
	kW	19.4	30.8	39.6	19.4	30.8	
	Btu/h	66,000	105,000	132,000	66,000	105,000	
	TR	6	9	11	6	9	
	Inlet Temp °C			50			
	Outlet Temp °C			55			
Water-side Heat Exchanger	Water Flow	m ³ /h	3.5	5.0	6.5	3.5	5.6
	Water Pipe size		1 in	1 in	1 in	1 in	1 in
	Type		Hermetic scroll compressor				
Compressor	Input power	kW	9.5x2	9.5x3	9.5x4	10.1x2	8.2x4
	Energy steps	%	0-50-100	0-33-66-100	25-50-75-100	0-50-100	25-50-75-100
Fan	Type		Axial				
	Power input	kW	0.65x2	0.65x3	0.65x4	0.55*2	1.3x2
	Air flow rate	m ³ /h	24100	36150	48200	28000	40,000
Water-side Heat Exchanger	Type		Shell and Tube				
	Water flow	m ³ /h	11.4	16.5	21.4	12	19
	Drop Water Side	kPa	40	40	40	42	43
	Water Pipe size		G 2"	G 2-1/2"	G 2-1/2"	DN50	DN50
Refrigerant	Type		R407C				
	Charge amount	(kG)	10.5x2	10.5x3	10.5x4	16	26
	Expansion device		Expansion Valve				
Noise							
Dimension							
	L	mm	2140	2980	2140	2230	2230
	W	mm	1010	1010	1905	1290	1570
	H	mm	1880	1880	1880	2050	2150
Power supply		3 -380V-50HZ					
Total Power Input	kW	20.3	30.45	40.6	21.3	35.4	
Weight	Kg	720	1050	1400	830	1380	

Tabella 37 - Caratteristiche tecniche della pompa di calore Airwave VAWC108-M

5.4 Analisi dei risultati post efficientamento

Alla luce degli interventi di efficientamento energetico descritti in dettaglio all'interno del capitolo 5, questa sezione si focalizza sui risultati ottenuti a seguito della simulazione condotta con il software Edilclima. Il modello energetico dell'edificio, precedentemente calibrato come descritto nel sottocapitolo 4.7, è stato utilizzato per valutare l'effetto delle modifiche apportate, con particolare attenzione alle prestazioni energetiche post-intervento. L'analisi si articola in due componenti principali: l'esame della nuova firma energetica e degli indici di prestazione energetica. Entrambi forniscono una misura diretta dell'effetto degli interventi di efficientamento sulla dispersione termica e sulle prestazioni complessive dell'edificio.

5.4.1 Firma energetica post efficientamento

La nuova firma energetica, illustrata in Fig.65, riflette i risultati delle misure di riqualificazione energetica implementate. Il grafico mette a confronto due firme distinte che riflettono lo stato di fatto e la situazione post efficientamento.

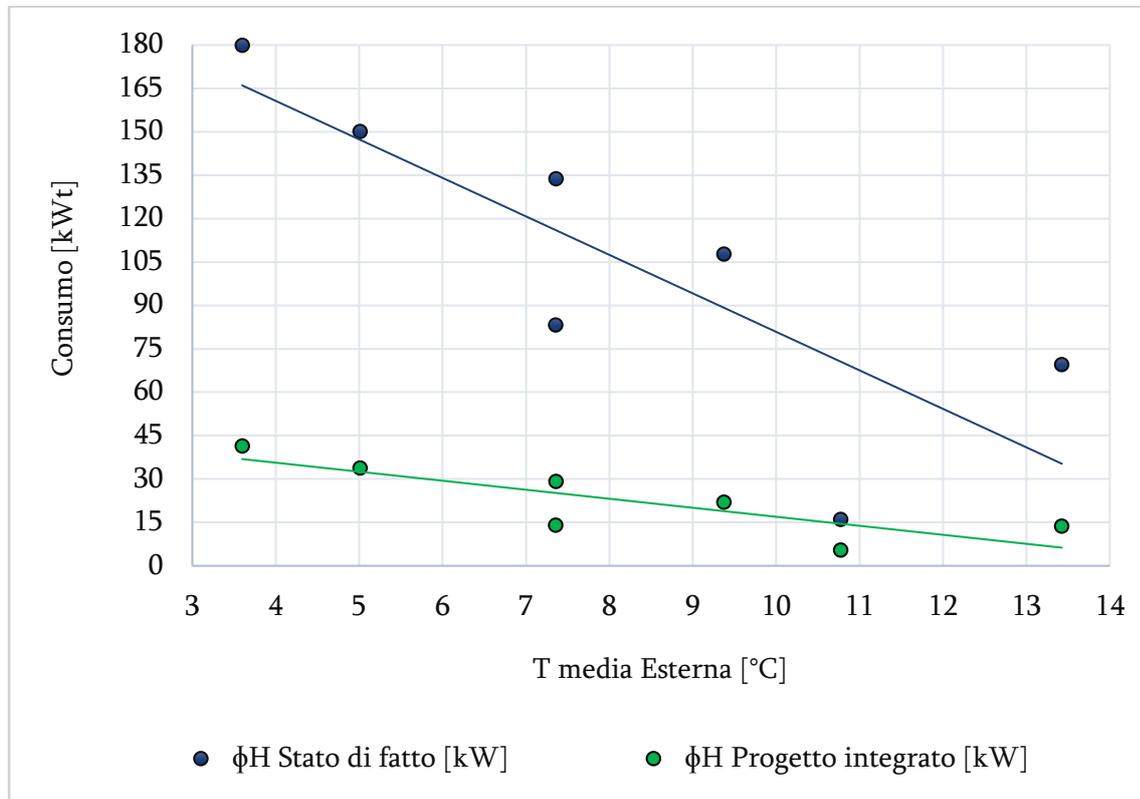


Figura 65 – Confronto tra firma energetica dello stato di fatto e post efficientamento

Dall'analisi della figura si osserva che la potenza richiesta dall'edificio per il riscaldamento è sensibilmente diminuita, attestandosi a circa un quarto rispetto al precedente fabbisogno. Questa significativa riduzione ha reso possibile la sostituzione dell'impianto di riscaldamento esistente con una pompa di calore efficiente, adeguata a soddisfare la domanda di energia anche in condizioni di basse temperature esterne.

Il grafico illustra una riduzione nella pendenza della curva di consumo energetico, indicativo di un miglioramento nell'efficienza dell'impianto di riscaldamento. Inoltre, si verifica una rototraslazione della retta, indice di un miglior isolamento dell'edificio come risultato degli interventi effettuati sull'involucro. Questo spostamento non denota solamente un isolamento termico migliorato ma anche un impatto positivo

sulla temperatura interna di set-point, che può essere mantenuta con un minor impiego di energia.

I cambiamenti osservati evidenziano l'importante sinergia tra l'efficienza dell'involucro edilizio e del sistema di riscaldamento, che insieme contribuiscono a una performance energetica nettamente migliorata.

5.4.2 Indici di prestazione energetica post efficientamento

La simulazione post-efficientamento ha fornito nuovi indici di prestazione energetica, che hanno permesso di quantificare l'impatto delle azioni di riqualificazione energetica intraprese. Ogni intervento è stato esaminato in dettaglio, svelando il suo contributo specifico al miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio.

La Tab.38 mostra l'impatto sugli IPE non rinnovabili ed evidenzia come ciascun intervento incida diversamente sui servizi dell'edificio. L'installazione del nuovo impianto termico influisce positivamente sia sul riscaldamento sia sulla produzione di acqua calda sanitaria, mentre l'isolamento della copertura, dei tamponamenti e la sostituzione dei serramenti apportano benefici esclusivamente al riscaldamento. L'installazione del fotovoltaico si riflette invece in un vantaggio che riguarda tutti i servizi. In contrasto con la tendenza generale alla riduzione dei consumi, la sostituzione dell'impianto di raffrescamento ha portato a un incremento, conseguenza della scelta di climatizzare maggiori volumi per periodi più estesi.

La Tab.39, similmente a quella precedente, mostra l'impatto sugli IPE rinnovabili. Gli interventi volti al miglioramento dell'isolamento, come l'isolamento della copertura e dei tamponamenti, mostrano una netta riduzione dei consumi energetici, evidenziando la loro efficacia nel contenere il bisogno di energia. D'altra parte, l'aggiornamento o l'implementazione degli impianti tecnici comporta un incremento dei valori di EP_{REN} giustificato, però, nell'utilizzo di una quota maggiore di energia rinnovabile rispetto ai sistemi precedenti.

EP _{N,REN} [kWh/m ²]							
Servizio	Stato di fatto	Isolamento Copertura		Isolamento Tamponamenti		Sostituzione Infissi	
Riscaldamento (H)	166	142	-14%	136	-18%	106	-36%
ACS (W)	114	114	/	114	/	114	/
Raffrescamento (C)	23	23	/	23	/	23	/
Ventilazione (V)	18	18	/	18	/	18	/
Illuminazione (I)	38	38	/	38	/	38	/
Globale	359	335	-7%	329	-8%	299	-17%
Servizio	Stato di fatto	Sostituzione Impianto Termico		Sostituzione Impianto di Raffrescamento		Installazione Fotovoltaico	
Riscaldamento (H)	166	142	-14%	179	8%	164	-1%
ACS (W)	114	85	-25%	114	/	113	-1%
Raffrescamento (C)	23	23	/	31	34%	9	-61%
Ventilazione (V)	18	18	/	25	39%	7	-60%
Illuminazione (I)	38	38	/	38	/	13	-66%
Globale	359	306	-15%	387	8%	306	-15%

Tabella 38 – IPE non rinnovabili e impatto per servizio

EP _{REN} [kWh/m ²]							
Servizio	Stato di fatto	Isolamento Copertura		Isolamento Tamponamenti		Sostituzione Infissi	
Riscaldamento (H)	6	5	-20%	5	-22%	3	-47%
ACS (W)	4	3	-25%	3	-25%	2	-50%
Raffrescamento (C)	6	6	/	6	/	6	/
Ventilazione (V)	4	4	/	4	/	4	/
Illuminazione (I)	9	9	/	9	/	9	/
Globale	30	27	-8%	27	-8%	24	-17%
Servizio	Stato di fatto	Sostituzione Impianto Termico		Sostituzione Impianto di Raffrescamento		Installazione Fotovoltaico	
Riscaldamento (H)	6	9	43%	7	8%	1	-89%
ACS (W)	4	18	356%	4	/	1	-75%
Raffrescamento (C)	6	6	/	8	34%	10	69%
Ventilazione (V)	4	4	/	6	39%	7	50%
Illuminazione (I)	9	9	/	9	/	16	75%
Globale	30	46	58%	34	14%	34	14%

Tabella 39 - IPE rinnovabili e impatto per servizio

La Tab.40 completa l'analisi degli indici di prestazione energetica fornendo una panoramica completa dei consumi energetici dell'edificio, aggregando sia le componenti rinnovabili sia quelle non rinnovabili. Dalla tabella si può osservare che

l'impatto significativo degli interventi di sostituzione dei serramenti, che si traduce in una riduzione complessiva dell'IPE del 17%. Anche l'isolamento della copertura e dei tamponamenti si dimostra efficace, riducendo l' EP_{TOT} rispettivamente del 7% e dell'8%. La sostituzione dell'impianto termico e l'installazione dell'impianto fotovoltaico influiscono positivamente, con un decremento dell'indice di prestazione globale totale del 9% e del 12%. Ciò evidenzia come la riqualificazione non passa solo attraverso l'isolamento ma anche dall'integrazione di fonti rinnovabili nel mix energetico dell'edificio. L'impianto di raffrescamento porta, invece, a un aumento del 8%, riflettendo la scelta di raffrescare volumi maggiori dell'edificio, come descritto precedentemente.

Servizio	EP_{TOT} [kWh/m ²]						
	Stato di fatto	Isolamento Copertura		Isolamento Tamponamenti		Sostituzione Infissi	
Riscaldamento (H)	172	147	-15%	141	-18%	109	-36%
ACS (W)	118	117	-1%	117	-1%	116	-2%
Raffrescamento (C)	29	29	/	29	/	29	/
Ventilazione (V)	22	22	/	22	/	22	/
Illuminazione (I)	47	47	/	47	/	47	/
Globale	388	362	-7%	356	-8%	324	-17%
Servizio	Stato di fatto	Sostituzione Impianto Termico		Sostituzione Impianto di Raffrescamento		Installazione Fotovoltaico	
Riscaldamento (H)	172	151	-12%	185	8%	165	-4%
ACS (W)	118	104	-12%	118	/	114	-3%
Raffrescamento (C)	29	29	/	39	34%	19	-36%
Ventilazione (V)	22	22	/	31	39%	14	-39%
Illuminazione (I)	47	47	/	47	/	29	-39%
Globale	388	353	-9%	420	8%	340	-12%

Tabella 40 – IPE totali e impatto per servizio

Dopo aver esaminato l'effetto di ogni singolo intervento, il focus si sposta sul progetto integrato. Nella Tab.41 vengono confrontati gli indici di prestazione energetica dello stato di fatto con quelli risultanti dall'applicazione contemporanea di tutte le misure di efficientamento.

Servizio	Stato di fatto			Progetto integrato			
	EP _{N,REN} [kWh/m ²]	EP _{REN} [kWh/m ²]	EP _{TOT} [kWh/m ²]	EP _{N,REN} [kWh/m ²]	EP _{REN} [kWh/m ²]	EP _{TOT} [kWh/m ²]	
Riscaldamento	166	6	172	20	24	44	-74%
ACS	114	4	118	22	37	59	-50%
Raffrescamento	23	6	29	24	12	36	25%
Ventilazione	18	4	22	19	9	28	25%
Illuminazione	38	9	47	27	12	39	-17%
Globale	359	29	388	113	94	207	-47%

Tabella 41 – IPE dello stato di fatto e del progetto integrato

Dalla tabella si osserva una riduzione significativa degli indici per i servizi di riscaldamento e acqua calda sanitaria, con valori che mostrano rispettivamente un calo del 74% e del 50%. Discorso simile per l'indice dell'illuminazione che vede un decremento del 17%. Come già spiegato in precedenza, il raffrescamento e la ventilazione hanno subito un aumento a causa della variazione nell'utilizzo del sistema che ha favorito un comfort interno maggiore e una migliore qualità degli ambienti. Osservando unicamente i valori globali, il progetto integrato ha portato a un'efficace riduzione del 69% dell'EP_{N,REN,GLOBALE} e del 47% dell'EP_{TOT,GLOBALE}.

Il grafico in Fig.66 mostra il confronto tra gli indici di prestazione energetica pre e post-intervento. Esso evidenzia la diminuzione sostanziale dei consumi energetici, confermando il miglioramento ottenuto grazie alle azioni di riqualificazione.

Ipotizzando di svolgere una DE senza l'utilizzo del calcolo dinamico orario, il software identifica l'edificio all'interno della classe B.

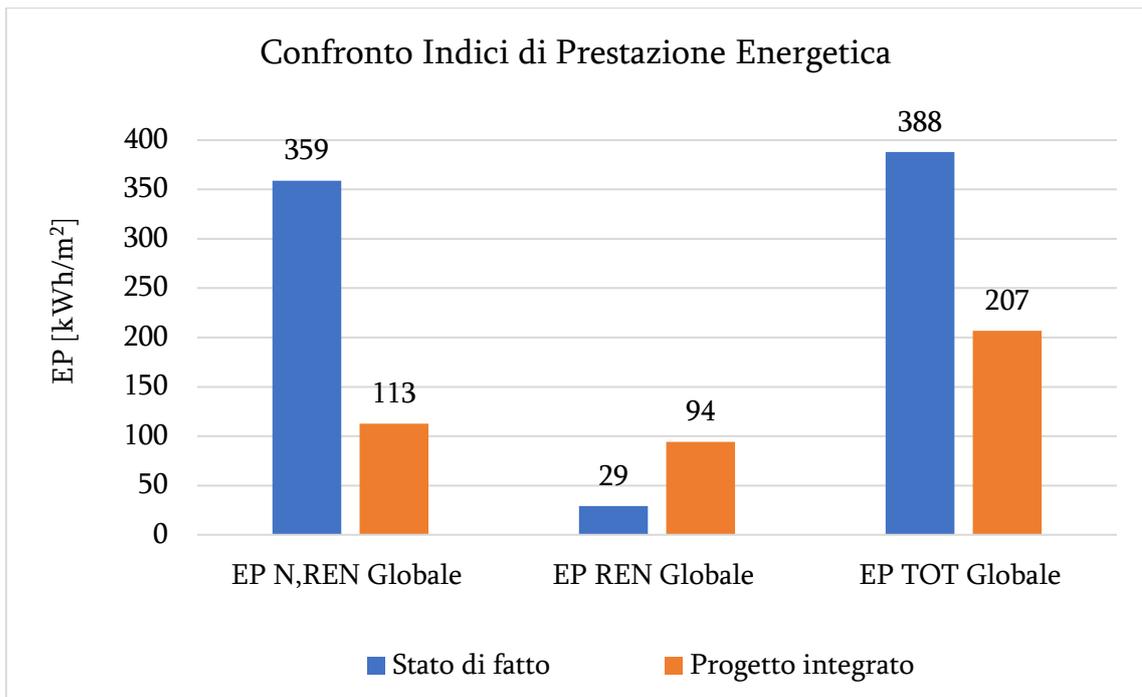


Figura 66 – Confronto tra gli IPE pre e post efficientamento

6 Conclusioni e sviluppi futuri

La diagnosi energetica realizzata per la sede ARPA di Novara ha evidenziato l'importanza di condurre un'analisi approfondita per identificare e quantificare le opportunità di risparmio energetico. Questa valutazione, realizzata in condizioni effettive di utilizzo dell'edificio, ha permesso di stabilire le priorità negli interventi di riqualificazione seguendo un approccio progressivo, in linea con il "Passaporto di Ristrutturazione" introdotto dall'Art.10 della Direttiva EPBD, che propone un percorso step-by-step per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità a lungo termine fissati dall'Unione Europea.

Tra gli interventi proposti, si distinguono quelli relativi all'involucro dell'edificio e quelli sugli impianti. Analizzando le misure individualmente, la sostituzione dei serramenti si è dimostrata essere particolarmente efficace portando a una riduzione del 17% dell' $EP_{TOT,GLOBALE}$. Allo stesso modo, la sostituzione dell'impianto termico e l'installazione dell'impianto fotovoltaico hanno avuto un impatto positivo, con un decremento dell'indice del 9% e del 12%. Questi risultati evidenziano la necessità di combinare l'isolamento e l'integrazione di fonti rinnovabili nel mix energetico per ottimizzare le prestazioni energetiche dell'edificio.

La realizzazione congiunta di tutti gli interventi proposti ha mostrato miglioramenti significativi in tutti i servizi energetici. In particolare, si è riscontrata una riduzione del 74% e del 50% dei consumi per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, mentre l'illuminazione ha registrato una diminuzione più contenuta del 17%. Nonostante un incremento nei consumi di raffrescamento e ventilazione, dovuto a una strategia mirata al miglioramento del comfort interno e della qualità ambientale, l'effetto complessivo degli interventi ha portato a una riduzione quasi del 50% dell'indice di prestazione energetica totale dell'edificio. Questi risultati non solo evidenziano l'efficacia delle misure implementate ma sottolineano anche la fattibilità e il valore degli investimenti in efficienza energetica supportati da iniziative politiche

come il PNRR. La sede ARPA rappresenta un esempio concreto di come interventi mirati possano trasformare il profilo energetico degli edifici esistenti e contribuire significativamente agli sforzi nazionali ed europei per una transizione energetica sostenibile. In quest'ottica, l'edificio emerge come un caso studio di riferimento per mostrare il potenziale di miglioramenti energetici realizzabili in strutture analoghe.

Nonostante i risultati promettenti ottenuti dalla diagnosi, è fondamentale riconoscere le limitazioni appartenenti allo studio. In primo luogo, la modellazione energetica dipende fortemente dalla precisione e dall'accuratezza dei dati in ingresso e, nel presente caso, la maggior parte sono stati raccolti sulla base di sopralluoghi e informazioni disponibili mentre altri sono stati accuratamente ipotizzati. Questo ha certamente influenzato la precisione del modello, malgrado il tentativo di avvicinarlo il più possibile alla situazione reale attraverso il processo di calibrazione. Inoltre, è importante sottolineare che la realizzazione pratica di ciascun intervento può incontrare ostacoli pratici e tecnici: la complessità nell'attuazione, l'approvvigionamento delle risorse, le sfide logistiche e gli aspetti finanziari sono fattori che possono influenzare il successo delle misure studiate. Infine, va considerato che l'efficacia effettiva della riqualificazione può variare all'interno di uno scenario reale poiché bisogna tener conto di fattori esterni come le variazioni climatiche, le modifiche nell'utilizzo dell'edificio e i comportamenti degli occupanti.

Infine, il presente studio rappresenta una base concreta per ampliare e approfondire la ricerca condotta sulla sede ARPA di Novara. Un aspetto fondamentale di sviluppo riguarda l'analisi economica degli interventi proposti che potrebbe fornire un quadro più completo in termini di sostenibilità e fattibilità. In quest'ottica sarebbe utile quantificare i costi iniziali, di manutenzione e di funzionamento associati a ciascuna misura di riqualificazione, valutando il ritorno economico ed energetico in relazione ai possibili scenari di variazione dei prezzi dell'energia. Un ulteriore tema potrebbe riguardare l'implementazione e la valutazione di sistemi avanzati di monitoraggio energetico. L'uso di tecnologie come gli Energy Management and Information

Systems (EMIS) potrebbe rivelarsi una soluzione ulteriore nell'ottimizzazione del consumo energetico, collocandosi a un livello più avanzato rispetto ai Building Automation and Control Systems (BACS). Un'area di ricerca particolarmente promettente potrebbe essere lo sviluppo di un modello predittivo "grey box", cioè un modello fisico semplificato che fa uso sia di leggi fisiche che dell'analisi dei dati attraverso algoritmi di apprendimento automatico. Infine, si potrebbe esplorare ulteriormente l'integrazione di interventi aggiuntivi con l'obiettivo di realizzare un edificio a energia quasi zero (Nearly Zero Energy Buildings, NZEB). In questo caso sarebbe opportuno valutare come combinare efficacemente le tecnologie esistenti e le innovazioni future, in linea con i target energetici dell'Unione Europea per il 2050. Le possibili strade di ricerca citate non solo contribuirebbero ad un approfondimento scientifico nel campo dell'efficienza energetica, ma potrebbero anche fornire linee guida pratiche per la trasformazione del parco edilizio esistente, avvicinandoci sempre più a un futuro sostenibile ed energeticamente efficiente.

Bibliografia e sitografia

[1] ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, *Analisi trimestrale del sistema energetico italiano 2/2023*, ENEA, luglio 2023.

<https://www.pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=571:analisi-trimestrale-del-sistema-energetico-italiano-i-e-ii-trimestre-2023&catid=4>

[2] ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, *Rapporto annuale sulla certificazione energetica degli edifici Annualità 2023*, Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati, agosto 2023.

<https://www.pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=653:rapporto-annuale-sulla-certificazione-energetica-degli-edifici-annualita-2023&catid=3>

[3] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2022*, IEA Publications, novembre 2022.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>

[4] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2022 – Italian Summary*, IEA Publications, dicembre 2022.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/c012f204-54cc-49d4-b47f-e5e30b39d9f8/WEO2022_ES_Italian.pdf

[5] International Energy Agency, *Energy Efficiency - The Decade for Action: Ministerial Briefing, IEA 8th Annual Global Conference on Energy Efficiency*, IEA Publications, giugno 2023.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/f6df3a56-2257-4f47-a130-bf0862c31065/EnergyEfficiency-TheDecadeforAction.pdf>

[6] International Energy Agency - Italy (Countries and Regions), 2023.

<https://www.iea.org/countries/italy>

[7] Comunicato stampa del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, *Clima-Energia: il MASE ha trasmesso la proposta di PNIEC alla Commissione Ue*, 19 luglio 2023.

<https://www.mase.gov.it/comunicati/clima-energia-il-mase-ha-trasmesso-la-proposta-di-pniec-alla-commissione-ue>

[8] Carmignani Maurizio, *PNRR – Piano nazionale di Ripresa e Resilienza: cos'è e novità*, Founder & CEO - Management Consultant, Trainer & Startup Advisor, 30 settembre 2022, aggiornato il 6 giugno 2023.

<https://www.agendadigitale.eu/infrastrutture/piano-nazionale-di-ripresa-e-resilienza-la-grande-scommessa-per-dare-un-futuro-allitalia/>

[9] Canepa Carlo, *I problemi infiniti del PNRR*, Internazionale (L'Essenziale), 3 luglio 2023.

<https://www.internazionale.it/essenziale/notizie/carlo-canepa/2023/07/03/pnrr-problemi-infiniti>

[10] Costanzo Ezilda, Anna Martino, Gian Mario Varalda, Marcello Antinucci, e Alessandro Federici, *EPBD Implementation in Italy*, dicembre 2016.

<https://www.epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2018/08/CA-EPBD-IV-Italy-2018.pdf>

[11] Calabrese Nicolandrea, Americo Carderi, Carmen Lavinia, Francesca Caffari, Elisa Passafaro, *Linee Guida per la Diagnosi Energetica degli Edifici Pubblici*, ENEA ES-PA Energia e Sostenibilità per la Pubblica Amministrazione, gennaio 2019.

<https://www.energiaenergetica.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=178&catid=43&Itemid=101>

[12] Ferrari Simone, *Sviluppo di Metodologie e Strumenti di Misura ed Analisi dei Consumi Energetici degli Edifici Pubblici: Linee Guida per la Stesura di Contratti di Garanzia (Rendimento Energetico) con le PA*, Politecnico di Milano - Dip.to ABC, settembre 2013.

https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/edifici-pa/2012/rds-2013-139.pdf

[13] Regione Piemonte, *Agevolazioni e Incentivi Finpiemonte*, 2023.

https://www.finpiemonte.it/agevolazioni?combine=&field_tags_target_id=All&field_beneficiari_target_id=&field_categoria_bando_target_id=48

[14] CTI Comitato Termotecnico Italiano, *Validazione software: verifica degli strumenti di calcolo ai sensi dell'art.7 del D.M. 26 giugno 2015*, Doc.Tecnici CTI, 2 dicembre 2019.

<https://www.cti2000.it/index.php?controller=sezioni&action=show&subid=62>

[15] Edilclima Engineering & Software, *EC700 - Calcolo prestazioni energetiche degli edifici*, 2023.

<https://www.edilclima.it/software-termotecnica/prog-termotecnica-energetica/scheda/700>

[16] Anit, *IRIS - Ponti termici agli elementi finiti*, 2023.

<https://www.anit.it/iris/>

[17] Schema della centrale termica (Stato di fatto) - Progetto Arpa, *Efficientamento gruppo combustione per riscaldamento presso la sede ARPA di Novara*, Dipartimento Provinciale di Novara sito in Viale Roma n. 7, 2023.

[18] Carchia Mario, *Modellazione e calibrazione della sede di ARPA Novara*, Politecnico di Torino, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, 2023.

[19] Ediltec Insulation, *POLIISO TEGOLA*, catalogo 2023.

<https://italy.ediltec.com/it/prodotto/prodotti-speciali-pannelli-fresati-e-ventilati/poliiso-tegola>

[20] 3GUA Energia, *Insufflaggio schiuma ISOFOR*, 2023.

<https://www.3gua.it/insufflaggio-intercapedini/insufflaggio-schiuma-isofor/>

[21] Knauf Insulation, *SUPAFIL LOFT 045*, catalogo 2023.

<https://www.knaufinsulation.it/lana-da-insufflaggio/supafil-loft-045>

[22] Anit, *La correzione del ponte termico strutturale - Risoluzione dei ponti termici strutturali mediante elementi a taglio termico*, aprile 2023.

[23] Schema della centrale termica (Stato di progetto) - Progetto Arpa, *Efficientamento gruppo combustione per riscaldamento presso la sede ARPA di Novara*, Dipartimento Provinciale di Novara sito in Viale Roma n. 7, 2023.

[24] Tommasoni Mattia, Cremona Elia, *Dimensionamento del sistema di distribuzione*, Idraulica Caleffi, 2023.

<https://idraulica.caleffi.com/articolo/dimensionamento-del-sistema-di-distribuzione>

Riferimenti legislativi

Decreto Legislativo 30 maggio 2008, n.115: Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE, 4 luglio 2008.

Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n.102: Attuazione della Direttiva 2012/27/UE sull'Efficienza Energetica, 3 luglio 2014.

Decreto 26 giugno 2015: Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici (D.M. Requisiti Minimi), 26 giugno 2015.

Decreto 16 febbraio 2016: 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, 16 febbraio 2016.

Direttiva 2018/844/UE (EPBD III) del 30 maggio 2018: Modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, 19 giugno 2018.

Direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione, RED II), 11 dicembre 2018.

Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), dicembre 2019.

Decreto Legislativo 10 giugno 2020, n. 48: Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, 11 giugno 2020.

Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), 30 aprile 2021.

Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n.199: Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.

Proposta di Direttiva Del Parlamento Europeo e Del Consiglio sulla Prestazione Energetica nell'Edilizia (rifusione, EPDB IV), 14 marzo 2023.

Riferimenti normativi

Ente Italiano di Normazione, UNI 10838:1999, Edilizia - Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 13788:2013, Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 13790:2008, Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.

Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300-1:2014, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

Ente Italiano di Normazione, 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, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali.

Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300-3:2010, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.

Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300-5:2016, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili.

Ente Italiano di Normazione, UNI 10349:2016, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52016-1:2018, Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo.

Ente Italiano di Normazione, UNI CEN ISO/TR 52016-2:2018, Prestazioni energetiche degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 2: Spiegazione e giustificazione della ISO 52016-1 e della ISO 52017-1.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52017-1:2018, Prestazione energetica degli edifici - Carichi termici sensibili e latenti e temperature interne - Parte 1: Procedure generali di calcolo.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 14683:2018, Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 10211:2018, Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati.

Ente Italiano di Normazione, UNI EN 15459:2018, Prestazione energetica degli edifici - Sistemi di riscaldamento e sistemi di raffrescamento idronici negli edifici.

Ente Italiano di Normazione, UNI/TR 11775:2020, Diagnosi Energetiche - Linee guida per le diagnosi energetiche degli edifici.

Ente Italiano di Normazione, UNI CEI EN 16247:2022, Diagnosi energetiche.