

Ricerca di Sistema elettrico



Diagnosi e riqualificazione energetica di un edificio storico
universitario a prevalente uso ufficio

Cinzia Buratti, Francesco Fantozzi, Francesca Merli, Elisa Belloni, Francesco Fraioli, Giacomo Barbini

A.D. 1308

unipg

DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI ECCELLENZA
MUR 2023/2027



RdS
RICERCA DI SISTEMA



Diagnosi e riqualificazione energetica di un edificio storico universitario a prevalente uso ufficio

Cinzia.Buratti, Francesco.Fantozzi, Francesca.Merli, Elisa.Belloni, Francesco.Fraioli, Giacomo.Barbini (Università di Perugia - Dipartimento di Ingegneria)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *N.1 - Decarbonizzazione*

Progetto: *1.5 - Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: *1.7 - Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore energetico negli usi finali*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Domenico Iatauro, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Università di Perugia- Dipartimento di Ingegneria

Mese inizio previsto: Gennaio 2023

Mese inizio effettivo: Gennaio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione. Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	8
4	Prodotti sviluppati	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	10
6	Sintesi delle attività svolte	11
7	Dettaglio delle attività svolte.....	12
7.1	Premessa	12
7.2	Caso studio	12
7.3	Sopralluoghi ed indagini diagnostiche sperimentali in situ.....	13
7.4	Inventario energetico, modellazione ed interventi migliorativi	19
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	25
9	Pubblicazioni scientifiche	26
10	Eventi di disseminazione	27

1 Risultati attesi

Il presente capitolo illustra i risultati attesi relativamente alla diagnosi e riqualificazione energetica di Palazzo Murena, un edificio storico universitario polifunzionale a prevalente uso ufficio. La diagnosi sarà effettuata attraverso l'analisi dettagliata dei consumi energetici e delle caratteristiche strutturali ed impiantistiche, in un contesto che richiede il rispetto dei vincoli storici e architettonici imposti per la tutela del patrimonio.

- 1. Analisi preliminare dei dati disponibili relativi all'edificio**, attraverso analisi storica, bibliografica ed archivistica per reperire tutte le informazioni riguardanti tecniche costruttive e materiali utilizzati e analisi delle bollette energetiche per un periodo significativo di almeno tre anni. Definizione di un cronoprogramma dei sopralluoghi e delle fasi di analisi approfondita per verificare le modalità di impiego dell'edificio, il livello di coinvolgimento degli occupanti, le condizioni di accesso alle aree oggetto di indagine, le temperature interne, i ricambi dell'aria, le fonti energetiche utilizzate, i consumi medi annui e la conoscenza di eventuali tecniche relative agli impianti.
- 2. Sopralluoghi e campagne di misura**, con compilazione di check list per la verifica dei dati raccolti, corredata da informazioni utili ottenute mediante questionari sul numero di occupanti negli uffici, tempo di occupazione e inventario di apparecchiature elettriche, tipologie di sorgenti luminose ed elementi terminali. Raccolta e verifica di documenti tecnici esistenti in merito a geometria e dimensioni dell'edificio, elementi tecnici ed impianti (planimetrie, disegni tecnici, schemi di impianto, abaco delle strutture ecc.) nonché certificazione energetica dell'edificio, relazione sui requisiti minimi di prestazione energetica, documentazione relativa a eventuali interventi di manutenzione/ristrutturazione e documentazione fotografica. In questa fase sono analizzati i dati generali dell'edificio, dati catastali, dati geometrici, di involucro edilizio disperdente ed impiantistici legati a tutti i servizi presenti. Si effettuano i monitoraggi delle condizioni ambientali nei locali, le misure di illuminamento e di trasmittanza termica mediante termoflussimetri e la valutazione della corrispondenza delle caratteristiche termiche delle strutture opache ipotizzate con i risultati delle indagini termoflussimetriche effettuate in-situ. Inoltre, si descrivono le caratteristiche costruttive ed impiantistiche necessarie alla conduzione di un'analisi energetica approfondita.
- 3. Elaborazione dei dati** raccolti nei sopralluoghi, per effettuare l'inventario energetico dettagliato in riferimento alle apparecchiature energivore presenti e al tempo di impiego delle stesse da parte degli occupanti. Questa analisi inoltre consentirà di individuare le criticità del caso studio ed i servizi più energivori, definendo un consumo di riferimento che sarà adottato come baseline per la valutazione degli interventi migliorativi di ciascun vettore energetico.

- 4. Modello di calcolo per la simulazione energetica del sistema edificio-impianto,** mediante software dedicato sulla base dei dati raccolti e misurati nelle fasi precedenti, determinando un indicatore di prestazione energetica operativo per ogni vettore e servizio energetico. L'analisi sarà condotta attraverso il metodo di calcolo orario suggerito dalla UNI EN 52016 e il modello sarà validato attraverso un confronto tra i consumi operativi, ovvero simulati, e quelli effettivi, ottenuti dai dati raccolti.
- 5. Proposte di efficientamento energetico e loro valutazione economica.** Attraverso la definizione e lo studio dell'inventario energetico, si individuano alcuni interventi migliorativi atti a efficientare i servizi più energivori nel rispetto della valenza storica dell'edificio. In questa fase si analizzerà la fattibilità tecnica ed economica di diverse soluzioni, anche innovative, con particolare attenzione a quelle full-electric e a fonte energetica rinnovabile. A valle dell'analisi energetica, si condurranno analisi economiche di massima degli interventi proposti e un'analisi di convenienza basata sul tempo di ritorno semplice dell'investimento.

2 Risultati ottenuti

- 1. Analisi preliminare dei dati disponibili relativi all'edificio.** Il caso studio è stato individuato sulla base della sua importanza monumentale sotto gli aspetti architettonico, strutturale, impiantistico e vincolistico e della sua destinazione a prevalente uso ufficio. L'edificio è inquadrato all'interno del Piano Regolatore Generale del Comune di Perugia nella zona del centro storico con rilevanza architettonica e tipologica. Sono state analizzate le planimetrie, i fascicoli strutture ed esaminate le bollette degli anni 2018 e 2019, non essendo influenzati dalla pandemia Covid-19.
- 2. Sopralluoghi e campagne di misura.** Sono stati effettuati sopralluoghi in tutti gli uffici del Palazzo e sono state raccolte, grazie a questionari appositamente elaborati, informazioni sul numero di occupanti, il tempo di occupazione, l'uso dei PC, il tempo medio di accensione delle luci al giorno, l'eventuale presenza di climatizzazione estiva e la relativa fascia oraria di accensione giornaliera e apparecchiature elettriche supplementari eventualmente presenti. Attraverso una check list, inoltre, si sono verificate le informazioni disponibili dai dati raccolti su involucro, tipologia degli elementi terminali degli impianti e degli apparecchi di illuminazione presenti. Le misure in-situ mediante l'impiego di un termoflussimetro evidenziano una trasmittanza termica di circa $1 \text{ W/m}^2\text{K}$, più alta del valore teorico fornito ($0.517 \text{ W/m}^2\text{K}$), ma coerente con la presenza di discontinuità strutturali, l'incertezza sulla stratigrafia e l'influenza delle condizioni meteorologiche. Il monitoraggio di temperatura e umidità relativa è stato condotto con datalogger Tinytag in alcuni uffici situati su una stessa verticale, con stesse condizioni al contorno e esposizione sud. Altri Tinytag con sonda di temperatura superficiale hanno consentito di effettuare la misura su alcune pareti significative, confinanti con l'esterno o con il vano scale. Le misure di illuminamento con luxmetro mostrano che, in alcuni uffici, i valori sono inferiori ai 300-500 lux previsti dalla UNI ISO 12464-1. I sopralluoghi hanno permesso, infine, di identificare i sistemi impiantistici e la distribuzione dei diversi servizi energetici erogati.
- 3. Elaborazione dei dati.** L'inventario energetico ha consentito di calcolare i consumi di energia per l'illuminazione (54.782,25 kWh/anno), per le apparecchiature (142.605,69 kWh/anno), per il riscaldamento e il raffrescamento, distinguendo i consumi degli impianti da quelli di stufette, radiatori elettrici e condizionatori autonomi.
- 4. Modello di calcolo per la simulazione energetica del sistema edificio-impianto.** Il software EC700 di Edilclima ha consentito di realizzare il modello dell'edificio mediante il metodo di calcolo orario ai sensi della UNI EN 52016, successivamente validato con i dati relativi ai consumi effettivi dedotti dalle bollette e dall'inventario energetico, riscontrando uno scostamento tra consumi simulati ed effettivi dell'1% e del 3%

rispettivamente per la parte elettrica e termica (normativa di riferimento UNI CEI EN 16247-2 "Diagnosi energetiche - Parte 2: Edifici").

5. Proposte di efficientamento energetico e loro valutazione economica. Sono state proposte diverse soluzioni per migliorare le prestazioni energetiche del Palazzo:

A) Sostituzione lampade presenti con lampade LED: garantisce una riduzione del 60% dei consumi elettrici per illuminazione, pur adeguando i livelli di illuminamento ai valori suggeriti nella UNI ISO 12464-1 laddove, alla luce delle misure effettuate, sono risultati non soddisfatti. Il tempo di ritorno dell'investimento è di 3 anni e la riduzione delle emissioni di CO₂ è del 5%.

B) Centralizzazione delle apparecchiature elettriche supplementari: lo spostamento in un unico locale dedicato riduce i consumi elettrici dell'1% senza costi aggiuntivi.

C) Installazione di valvole termostatiche per ogni elemento terminale: permette una riduzione dei consumi per riscaldamento di 50.000 kWh annui, con un risparmio di circa 2.500 €/anno di spesa per il metano e un ritorno dell'investimento in meno di 3 anni. Si associa inoltre una riduzione delle emissioni di CO₂ del 9%.

D) Sostituzione degli infissi con una soluzione commercializzata che prevede doppi vetri e telaio in PVC (trasmissione 1.30 W/m²K): consente di ridurre i consumi per riscaldamento dell'1%, con costi elevati (tempo di ritorno superiore a 20 anni). È stata anche esplorata un'opzione innovativa, in fase di ricerca, con infissi a base di aerogel, che è attualmente non percorribile per costi ancora maggiori.

E) Sostituzione dei boiler elettrici per la produzione ACS con sistemi a pompa di calore: consente una riduzione dei consumi del 76% con un investimento stimato di 7.500 € (ritorno in 5 anni) e riduzione delle emissioni di CO₂ del 4%.

F) Installazione di pannelli fotovoltaici.

1. Installazione di pannelli con potenza di 175 kWp per un costo di 220.000 € e tempo di ritorno in 8 anni.

2. Pannelli BIPV (copertura integrata) con produttività di 240 kWp, costo di 700.000 € e tempo di ritorno in 17 anni.

Entrambe le soluzioni coprono i fabbisogni elettrici annuali, con un surplus di energia elettrica prodotta e una riduzione delle emissioni di CO₂ di circa il 25%.

G) Sostituzione del teleriscaldamento: sono state analizzate tre soluzioni per sostituire la generazione di calore attuale, puntando a sistemi full-electric e a fonte energetica rinnovabile. Tra queste la soluzione più promettente sia in termini economici sia di fattibilità è quella con VRV e bocchette di immissione aria-aria.

Una soluzione integrata (interventi A-B-E-F.2-G) consente un risparmio annuo di 54000 € tra metano, energia elettrica e uno scambio sul posto del surplus di elettricità. Il costo stimato dell'investimento risulta di poco superiore a 1.000.000 €, con un tempo di ritorno di 19 anni e una significativa riduzione delle emissioni di CO₂, superiore al 78%.

3 Prodotti attesi

Report sintetico, Ricerca di sistema elettrico:

“Diagnosi e riqualificazione energetica di un edificio storico universitario a prevalente uso ufficio”.

Autori: Cinzia Buratti, Francesco Fantozzi, Francesca Merli, Elisa Belloni, Francesco Fraioli, Giacomo Barbini.

4 Prodotti sviluppati

Non sono stati sviluppati prodotti.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono stati scostamenti rispetto alle attività previste.

6 Sintesi delle attività svolte

Palazzo Murena fa parte di un complesso monastico progettato da Vanvitelli e Murena risalente al 1740. L'edificio è adibito principalmente ad uffici, nonostante presenti anche alcune aule ed un piano nobile con la Sala del Dottorato. Il riscaldamento dell'edificio è erogato da una rete di teleriscaldamento che dalla centrale termica passa a due sottostazioni caratterizzate da due scambiatori di calore di potenza complessiva di 400 kW, giungendo agli elementi terminali attraverso una distribuzione a colonne montanti. Sono stati condotti sopralluoghi con questionari e check-list per catalogare illuminazione, riscaldamento e apparecchiature elettriche. È stato monitorato il comfort ambientale con sensori e termoflussimetri per la trasmittanza termica. La modellazione energetica, realizzata con Edilclima EC700 ha permesso di stimare consumi termici ed elettrici, validati con i dati di bolletta. Lo scostamento rilevato è inferiore rispettivamente all'1% ed al 3%, confermando l'affidabilità del modello. Sono state valutate diverse proposte di interventi migliorativi, valutandone una combinazione indirizzata al full-electric.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Premessa

Negli ultimi decenni l'attenzione verso efficienza energetica e sostenibilità ambientale è cresciuta per contrastare i cambiamenti climatici. Per gli edifici storici soggetti a regimi vincolistici restrittivi risulta necessario lo studio di diagnosi energetiche per migliorarne le prestazioni, con la finalità di indagare soluzioni innovative e compatibili.

7.2 Caso studio

Palazzo Murena, oggetto della diagnosi, fa parte di un complesso monastico la cui progettazione, ad opera di Luigi Vanvitelli e del suo allievo Carlo Murena, risale al 1740 (Fig. 7.1). Palazzo Murena presenta una struttura quadrangolare, con una muratura esterna in laterizio di spessore decrescente con la quota.



Figura 7.1 - Sezione, vista dall'alto e modello di Palazzo Murena

Il palazzo è adibito principalmente ad uffici con la presenza di qualche aula, stanze di rappresentanza e l'imponente Sala del Dottorato, presente nel piano nobile e contenente circa 10500 libri di elevato pregio.

Le motivazioni principali che hanno condotto alla scelta del caso studio sono legate alla polifunzionalità dello stabile con prevalente uso ufficio e all'appartenenza dello stesso ad un contesto vincolato, permettendo di estendere le considerazioni sviluppate anche ad altri edifici con rilevanza analoga appartenenti all'ingente patrimonio italiano.

Altra caratteristica peculiare dell'immobile è la rete di teleriscaldamento che lo serve, che parte dalla centrale termica situata nel Dipartimento di Fisica, a circa 250 m di distanza, e arriva alle due sottostazioni presenti nell'edificio, costituite da due scambiatori di calore di potenza complessiva 400 kW (Fig. 7.2).

Preliminarmente è stata condotta un'analisi documentale e archivistica per raccogliere informazioni sull'edificio, inclusi schemi impiantistici e consumi energetici. Lo studio ha

permesso di caratterizzare l'involucro e analizzare il sistema termico, dalla centrale alle sottostazioni, fino alla distribuzione ai singoli elementi terminali.

Si è così ottenuta una fotografia dello stato di fatto dell'edificio, necessaria per condurre modellazione e simulazione finalizzate all'individuazione di soluzioni di retrofitting energetico.



Figura 7.2 - Impianto previsto nella sottostazione del terzo seminterrato destinato all'alimentazione dei piani seminterrati (S1, S2, S3) e piano primo (P01)

7.3 Sopralluoghi e indagini diagnostiche sperimentali in situ

In seguito alla compilazione di un cronoprogramma di sopralluoghi concordato con gli uffici amministrativi di Palazzo Murena, è stata avviata l'attività di campo.

Tutti gli occupanti degli uffici sono stati sottoposti a questionari utili a raccogliere le seguenti informazioni (Fig. 7.3a):

- Occupanti: Numero (1, 2-3, >3).
- Ore lavorative: Media giornaliera di permanenza (2-4, 4-6, >6 h/gg) e uso PC (2-4, 4-6, >6 h/gg).
- Illuminazione: Tempo medio di accensione luci per stagioni (2-4, 4-6, >6 h/gg).
- Carichi elettrici: presenza e uso giornaliero di stampanti, lampade, ecc. (2-4, 4-6, >6 h/gg).
- Climatizzazione: Presenza di stufette o climatizzatori estivi, con specifica di fasce orarie, tempo medio giornaliero (2-4, 4-6, >6 h/gg) e giorni annui di impiego (<45, 45-90, >90); anche eventuali ventilatori sono stati inclusi.

È stata compilata una check list per ogni ufficio, verificando la conformità con il fascicolo strutture derivante dai dati archivistici per quanto concerne (Figura 7.3b):

- strutture disperdenti;
- tipologia e dimensioni degli elementi terminali e la loro ubicazione;
- numero, tipologie e caratteristiche degli elementi di illuminazione.

I dati raccolti sono stati rielaborati per effettuare valutazioni globali sull'edificio.

Emerge che il profilo occupazionale dell'immobile è caratterizzato dal fatto che la maggior parte degli uffici ospita 2-3 occupanti, per un tempo medio maggiore di 6 h/gg (Fig. 7.4). In estate l'illuminazione artificiale è utilizzata per 2-4 ore al giorno nella maggior parte degli uffici, mentre al piano terra e nei seminterrati supera le 4-6 ore. In inverno, il tempo di accensione aumenta per tutti gli uffici, con il 76% che necessita di oltre 6 ore di illuminazione artificiale al giorno (Fig. 7.5).

QUESTIONARIO DIAGNOSI ENERGETICA PALAZZO MURENA	
Piano	
Codice ufficio	
Numero di occupanti	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2-3 <input type="checkbox"/> > 3
Tempo medio di occupazione/giorno (h)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Tempo medio impiego PC/giorno (ore)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Tempo medio accensione luci estate/giorno (ore)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Tempo medio accensione luci inverno/giorno (ore)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Altri carichi elettrici (es. stampante, lampade da scrivania)	<input type="checkbox"/> stampante <input type="checkbox"/> lampada <input type="checkbox"/> altro.....
Tempo medio di accensione altri carichi/giorno (ore)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Climatizzazione invernale	
Altri carichi elettrici per riscaldamento (es. stufette)	<input type="checkbox"/> stufetta <input type="checkbox"/> altro.....
Tempo medio di accensione altri carichi/giorno (ore)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Climatizzazione estiva	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO
Fasce orarie di accensione	<input type="checkbox"/> 9:00-11:00 <input type="checkbox"/> 11:00-13:00 <input type="checkbox"/> altro.....
Tempo medio di accensione/giorno (ore)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Numero medio giorni di funzionamento/anno	<input type="checkbox"/> <45 <input type="checkbox"/> 45-90 <input type="checkbox"/> >90
Altri carichi elettrici per raffrescamento (es. ventilatori)	<input type="checkbox"/> ventilatore <input type="checkbox"/> pinguino <input type="checkbox"/> altro.....
Tempo medio di accensione altri carichi/giorno (ore)	<input type="checkbox"/> 2-4 <input type="checkbox"/> 4-6 <input type="checkbox"/> > 6
Data sopralluogo	

CHECK LIST DIAGNOSI ENERGETICA PALAZZO MURENA				
Piano				
Codice ufficio				
Data sopralluogo				
CARICHI INTERNI/MACCHINARI				
Denominazione	Dati di targa	Tipologia	Tempi di funzionamento	
ILLUMINAZIONE				
Sigla	Tipologia accensione	Tipologia sorgente	Potenza elettrica installata	Ubicazione
INVOLUCRO/ FINESTRE				
Tipologia	Cod. struttura	Descrizione/note		
Muro				
Muro				
Finestra				
Parapetto				
Ponte Termico				
Ponte Termico				
Muro				
Muro				
Muro				
Muro				
Solaio superiore				
Solaio inferiore				
RADIATORI/ EL. TERMINALI				
Muro	Dimensioni (n ₁ - n ₂ - B - H)	Materiale		
EXT INT				
EXT INT				

Figura 7.3 – Questionario (sx) e check list (dx)

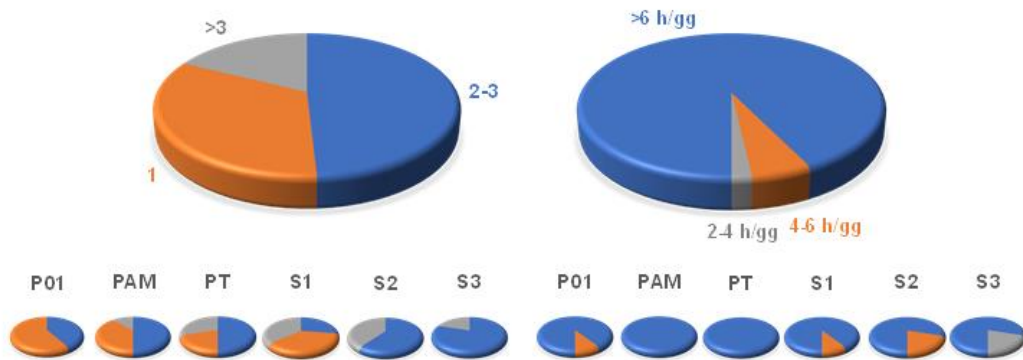


Figura 7.4 - Numero di occupanti degli uffici (sx) e tempo medio di occupazione (h/gg)(dx)

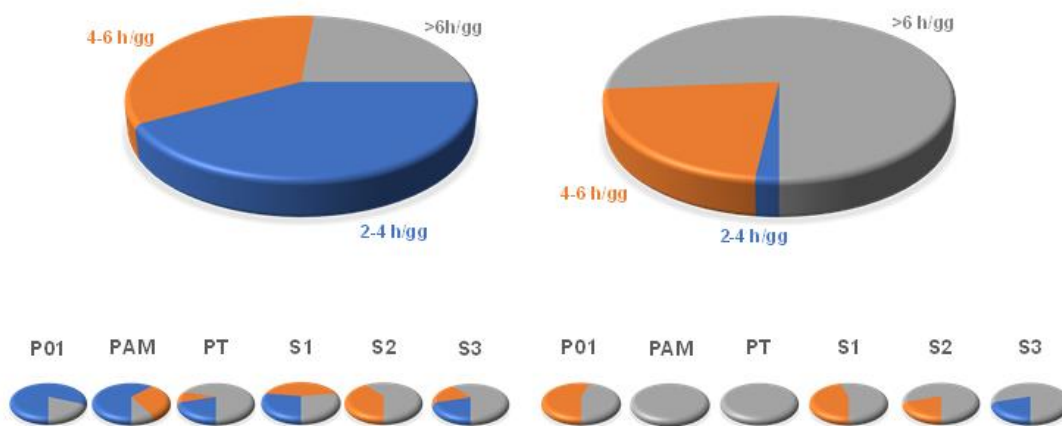


Figura 7.5 - Tempo medio di accensione delle luci (h/gg) in estate (sx) e in inverno (dx)

Negli uffici sono presenti postazioni con scrivanie, PC, stampanti e apparecchiature per il comfort ambientale, come ventilconvettori, stufette e radiatori elettrici (Fig. 7.6). Sono inclusi anche dispositivi come UPS, rack, macchinette del caffè, microonde e frigoriferi. Tutti i macchinari sono stati catalogati per ufficio, tipologia, quantità e potenza in tabelle riassuntive per ciascun piano.

L'illuminazione del primo piano, la più varia ed evoluta, comprende strisce LED a soffitto lungo il perimetro, lampadari pendenti al centro dei vani, lampade a parete e da scrivania. I corridoi sono illuminati da LED a soffitto. Negli altri cinque piani, gli uffici sono illuminati principalmente da lampade a tubi fluorescenti, incassati nel controsoffitto oppure pendenti, e da appliques installate alle pareti (Fig. 7.7). Le tipologie, la potenza e le quantità sono state dettagliate in una tabella con supporto fotografico.



Figura 7.6 – Foto di alcune apparecchiature elettriche presenti nell'edificio



Figura 7.7 – Foto di alcune sorgenti luminose presenti nell'edificio

Infine, tramite la compilazione della check list sono state raccolte informazioni sugli elementi terminali dell'impianto di riscaldamento (Fig. 7.8). Per ciascun radiatore sono stati rilevati il numero di elementi, il numero di colonne, le dimensioni e la collocazione. Inoltre, è stato riscontrato anche l'impiego di pompe di calore aria-aria, installate in 5 uffici del primo piano, per la climatizzazione estiva.



Figura 7.8 – Foto di alcuni radiatori e di una pompa di calore aria-aria presenti nell'edificio

Dopo i sopralluoghi sono state condotte le indagini sperimentali per la caratterizzazione termica, il monitoraggio dei parametri ambientali e la valutazione dell'illuminamento nei locali. La campagna ha avuto la durata di una settimana, necessaria per ottenere risultati adeguati compatibilmente con le esigenze degli occupanti.

La valutazione della trasmittanza termica è stata effettuata mediante l'installazione del termoflussimetro ThermoZig BLE al piano ammezzato, sfruttando la possibilità di posizionare i nodi dello strumento a cavallo della parete, grazie alla porta finestra che si affaccia sul balcone relativo all'ufficio 026, con esposizione a ovest (Fig. 7.9).

Il grafico in figura 7.10 mostra l'andamento della media mobile della trasmittanza, con valore che asintoticamente si attesta intorno ad $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il valore di trasmittanza ottenuto risulta più

elevato rispetto a quello indicato nel fascicolo strutture ($0.517 \text{ W/m}^2\text{K}$), calcolato per via teorica, ma è comunque plausibile viste le dimensioni della parete in esame (spessore 1330 mm).

Il monitoraggio dei parametri ambientali interni è stato effettuato mediante l'installazione di Tinytag. Le misure sono state effettuate in sei uffici, uno per ogni piano, disposti lungo la stessa verticale sul lato sud (Tabella 1). Su 3 uffici, dei piani terra, ammezzato e primo, anch'essi disposti sulla stessa verticale, è stata valutata anche la temperatura della parete esterna mediante una sonda superficiale e la temperatura della muratura tra gli uffici ed il vano scale non riscaldato (Tabella 2).

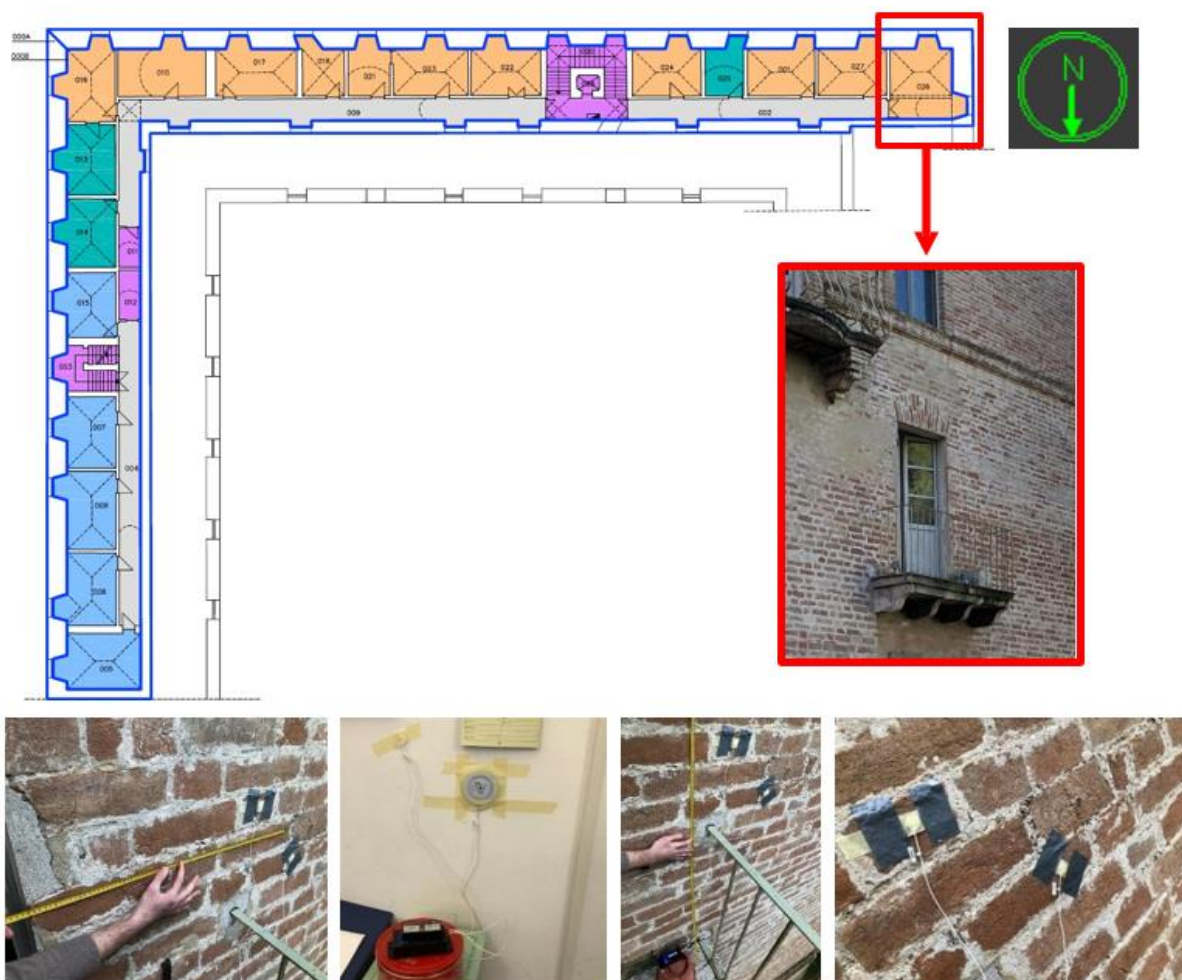
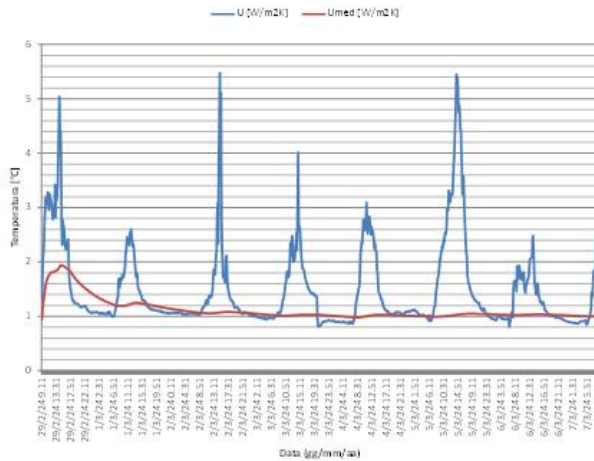


Figura 7.9 – Installazione ThermoZig per caratterizzazione termica



Scheda: MR18

CARATTERISTICHE TERMICHE E IGROMETRICHE DEI COMPONENTI OPACHI

Codice Struttura: EXT 2_Murena
 Descrizione Struttura: Tamponatura esterna in laterizio e materiale di riempimento

N.	DESCRIZIONE STRATO (dall'interno all'esterno)	s [mm]	lambda [W/mK]	C [W/m²K]	M.S. [kg/m²]	P<50°10° [kg/m³Pa]	C.S. [J/kgK]	R [m²KW]
1	Adduttanza interna	0		7.700			0	0.130
2	Intonaco di calce e gesso	20	0.700	35.000	20.00	18.000	1000	0.029
3	Mattone pieno di laterizio (280°140°60) spessore 425	425		1.852	765.00	20.570	840	0.540
4	Cottoli e pietre frantumate	400	0.700	1.522	600.00	37.500	840	0.557
5	Mattone pieno di laterizio (280°140°60) spessore 425	425		1.852	765.00	20.570	840	0.540
6	Adduttanza Esterna	0		25.000			0	0.040
RESISTENZA = 1,336 m²KW		CAPACITA' TERMICA ABITAZIONE = 61,472 kJ/m²K		TRANSMITTANZA = 0,517 W/m²K				
SPESORE = 1,336 mm		FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0,08		MASSA SUPERFICIALE = 2,228 kg/m²				
TRANSMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0,08 W/m²K		SFIAMMENTO = 17,41 h		FRM - FATTORE DI TEMPERATURA = 0,7296				

s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50°10° = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmissione = Valori di resistenza e trasmissione reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.lgs 192/05 e s.m.l.

Figura 7.10 - Andamento della trasmittanza termica U: in blu l'andamento effettivo, in rosso l'andamento ottenuto considerando la media mobile (sopra); scheda da fascicolo strutture della muratura in esame (sotto)

La temperatura ambiente nei vari piani oscilla tra 20.0 – 23.0°C, mentre l'umidità relativa tra 41.2 – 51.1%. La temperatura media superficiale varia tra 19.0 – 22.6°C; il valore maggiore è stato misurato al piano ammezzato (parete confinante con il vano scale).

Le misure di illuminamento infine sono state effettuate in diversi uffici di ogni piano, prendendo due valori in due posizioni dei locali differenti, sia a luce accesa sia spenta (Tab. 7.3).

Tabella 7.1 - Valori di temperatura e umidità relativa dell'aria

PIANO	Temperatura media [°C]	Umidità relativa [%]
P01	20.0	45.7
PAM	20.8	50.3
PT	21.5	41.2
S1	21.8	51.1
S2	23.0	42.9
S3	22.0	45.0

Tabella 7.2 – Valori di temperatura media superficiale

PIANO	Temperatura media superficiale [°C]
P01	19.0
PAM	22.6
PT	21.2

Tabella 7.3 – Valori di illuminamento misurati

PIANO	UFFICIO	E _{la,1} [Lux]	E _{la,2} [Lux]	E _{la,m} [Lux]	E _{is,1} [Lux]	E _{is,2} [Lux]	E _{is,m} [Lux]
PAM	026	283.6	288.8	286.2	15.8	10.7	13.25
PAM	001	287.4	326.9	307.15	10.7	10.2	10.45
PAM	021	290.5	326.7	308.6	113.5	41	77.25
PAM	022	533.4	521.4	527.4	228.1	169.8	198.95
PAM	023	402.6	389.5	396.05	233.2	147.5	190.35
PAM	016	231.6	414.4	323	101.4	201.4	151.4
PT	011	49.8	252	150.9	4.3	5.6	4.95
PT	013	202.8	401.5	302.15	3.7	10.4	7.05
PT	026	208.9	125.9	167.4	111	21.3	106.4
PT	027	320	160.1	240.05	25.5	68.4	46.95
PT	052	372.8	387.6	380.2	40.8	47.3	44.05
PT	059	231.6	314.7	273.15	12	18.6	15.3
P01	049	139.2	101.1	120.15	85.5	14.7	50.1
P01	052	635.4	139.3	387.35	406.6	47.1	226.85
P01	006	597	327.9	462.45	431.2	56.8	244
P01	007	263.7	442.7	353.2	53.5	218.5	136
P01	011	478.6	450.6	464.6	72.4	61.4	66.9
P01	014	84.3	51.2	67.75	12.7	40.5	26.6
S3	030	230.5	330.5	280.5	10.9	15.5	13.2
S3	007	239.7	270.1	254.9	36.9	126.4	81.65
S3	006	354.4	375.2	364.8	34.2	65.4	49.8
S2	018	272.4	468.1	370.25	28.9	198.9	113.9
S2	015	256.1	297.4	376.75	25.4	66.6	46
S2	010	364.5	341.5	353	17.9	16.8	17.35
S1	023	752.3	768	760.15	9.8	17.6	13.7
S1	015	575.1	388.3	481.7	62.8	31.7	47.25
S1	012	493.6	391.4	442.5	35.1	46.6	40.85
S1	006	272.5	302.8	287.65	13.4	22.1	17.75

piano ammezzato (PAM), piano terra (PT), piano primo (P01), terzo seminterrato (S3), secondo seminterrato (S2), primo seminterrato (S1), illuminamento luce accesa punto 1 (E_{la,1}), illuminamento luce accesa punto 2 (E_{la,2}), illuminamento medio luce accesa (E_{la,m}), illuminamento luce spenta punto 1 (E_{is,1}), illuminamento luce spenta punto 2 (E_{is,2}), illuminamento medio luce spenta (E_{is,m})

7.4 Inventario energetico, modellazione ed interventi migliorativi

Il software impiegato per la modellazione energetica è Edilclima EC700, mediante il metodo di calcolo dinamico orario ai sensi della UNI EN 52016. Si impostano i dati relativi alle condizioni climatiche della zona per le quali, sfruttando la centralina climatica del Dipartimento di

Ingegneria, sono stati inseriti i dati di interesse relativi alle annualità 2018-2019 mediate tra loro. Sono state definite le componenti dell'involucro, sia opache sia trasparenti, e i ponti termici (Fig. 7.11). Sono stati anche riportati tutti gli edifici ed il verde circostante il palazzo per il calcolo dell'ombreggiamento.

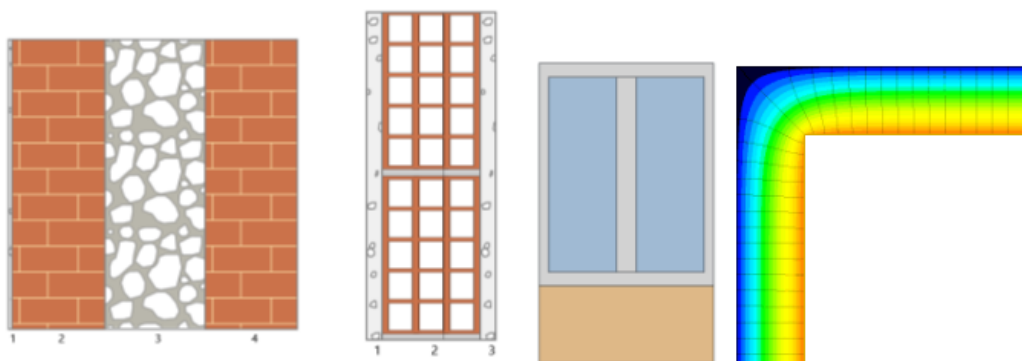


Figura 7.11 -Dati di input modellazione

Sono stati quindi calcolati gli apporti termici per ogni locale, sulla base delle informazioni ottenute durante i sopralluoghi. Per quanto riguarda gli apporti termici dovuti alle persone è stato considerato, da Manuale del Termotecnico, un calore sensibile pari a 70 W/persona in relazione all'attività svolta. In riferimento agli apporti per illuminazione sono valutate percentuali di potenza dissipata del 90%, 75 % e 40% rispettivamente per lampade alogene, fluorescenti ed a LED.

Sono stati creati dei profili orari nell'archivio utente, andando a definire su base oraria il fattore di utilizzo delle apparecchiature e delle sorgenti luminose. Considerato l'elevato numero di locali presenti in Palazzo Murena, sono stati raggruppati in uno stesso profilo orario quelli aventi caratteristiche simili, utilizzando come primo discriminante il numero di occupanti e in subordine il tempo di occupazione e la tipologia di apparecchiature presenti, risalendo così a 53 profili orari.

Il fattore di occupazione (f_{occ}) è stato definito spalmando l'occupazione prevista sulla base delle ore lavorative degli occupanti, permettendo così di calcolare per ciascuna ora l'apporto interno sensibile dovuto alla presenza di persone ($\Phi_{int,P}$) come prodotto del fattore di occupazione per l'apporto sensibile in W/m^2 .

Il fattore di utilizzo delle apparecchiature ($f_{int,A}$) è stato calcolato per ciascuna ora come media dei fattori di utilizzo delle singole apparecchiature presenti. In alcuni locali sono presenti frigo o unità UPS, che risultano sempre accesi, per i quali è stato assunto un fattore di utilizzo pari a

1 per tutta la giornata. Il fattore di utilizzo totale, moltiplicato per l'apporto in W/m^2 , consente al software di determinare l'apporto sensibile dovuto alle apparecchiature per ciascuna ora. Infine, il fattore di utilizzo dell'illuminazione ($f_{int,L}$) è stato attribuito a ciascuna ora considerando l'accensione delle sorgenti luminose in relazione all'occupazione del locale e in accordo con il questionario compilato dagli occupanti.

A titolo di esempio, in figura 7.12 si riporta il profilo orario 2occv1 definito per un ufficio avente 2 occupanti, un tempo di occupazione di 8 ore e la presenza di PC e stampante. Il profilo è identico per i cinque giorni lavorativi, mentre per il sabato e la domenica si ha un profilo nullo, vista la chiusura del palazzo.

Ora del giorno	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Media
OCCUPAZIONE																									
fuso [h]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
TEMPERATURA																									
BILux [lx]																									
IClux [lx]																									
APPORTI INTERNI SENSIBILI																									
aprt.F [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fuso.A [h]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,80	0,65	0,50	0,25	0,00	0,60	0,65	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19
aprt.A [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fuso.L [h]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,00	0,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
aprt.L [W/m²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 7.12 -Profilo orario 2occv1

Per gli impianti, sono state identificate 7 zone termiche, una per ogni piano, ad eccezione del primo piano dove è stata creata una zona aggiuntiva riferita ai 5 locali che hanno le pompe di calore aria-aria per la climatizzazione anche estiva.

Grazie alla simulazione, è stato possibile calcolare i consumi energetici dell'edificio dovuti al teleriscaldamento ($279.941 \text{ kWh}_t/\text{anno}$), che sono stati convertiti in energia primaria e poi in Sm^3 , al fine di ottenere il consumo di metano necessario a erogare il servizio di riscaldamento, pari a $26.697,39 \text{ Sm}^3$ (considerando il potere calorifico inferiore del metano $H_i=9,94 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ e il fattore di conversione $1 \text{ Nm}^3 = 1,0549 \text{ Sm}^3$). Il consumo dovuto alle stufette e ai radiatori elettrici ($12.813,88 \text{ kWh}$) è stato anch'esso convertito in energia primaria ($31.009,58 \text{ kWh}_t$) e successivamente in Sm^3 equivalenti, secondo i fattori di conversione stabiliti dal D.M. 26/06/2015 ($2,42 \text{ kWh}_t/\text{kWh}_{el}$), al fine di determinare il corrispondente consumo termico, pari a $2.957,32 \text{ Sm}^3$. È stato necessario effettuare tale conversione in quanto queste apparecchiature non sono state modellate all'interno del software e il relativo consumo equivalente di metano, ai fini della validazione del modello, è stato scorporato dal consumo termico operativo pari a $26697,39 \text{ Sm}^3$.

Per i consumi elettrici, è stato effettuato un inventario per i vettori energetici presenti dettagliato riferito ad illuminazione, apparecchiature elettriche, ACS, elementi autonomi per riscaldamento e raffrescamento di ogni locale, in relazione ai tempi di occupazione e ausiliari. Il consumo elettrico complessivo è di $243.422,82 \text{ kWh}/\text{anno}$ (Tab. 7.4).

Tabella 7.4 - Inventario energetico per i vettori energetici presenti

Servizi energetici	Metano [Sm ³]	Energia elettrica [kWh]
Riscaldamento	26697,39	719,00
Riscaldamento da apparecchiature ausiliare	-	12813,88
Illuminazione	-	54782,25
Raffrescamento	-	2124,00
Raffrescamento da apparecchiature ausiliarie	-	13961,00
Apparecchiature elettriche	-	142605,69
ACS	-	16417,00
Totale	26697,39	243422,82

In Figura 7.13 si riporta un diagramma a torta con la ripartizione dei consumi elettrici tra i vari servizi energetici. Dall'analisi emerge che il maggior consumo elettrico è imputabile alle apparecchiature (59%), seguito dal consumo destinato al servizio di illuminazione (22%), al raffrescamento (7%), alla produzione di ACS (7%) e al riscaldamento (5%).

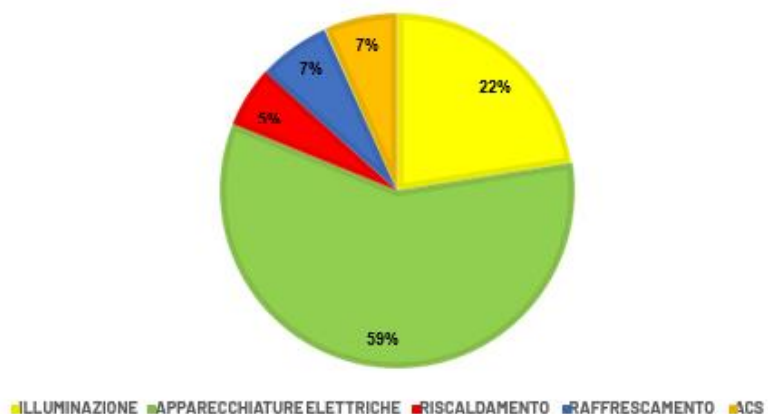


Figura 7.13 - Ripartizione dei consumi elettrici tra i vari servizi

Dal confronto tra i dati di bolletta (consumi effettivi) e i dati ottenuti dalla combinazione dell'inventario energetico e dei consumi forniti della modellazione (consumi operativi), si effettua la validazione del modello, che deve presentare uno scostamento inferiore al 5 - 10% rispetto ai dati dichiarati in bolletta, come indicato nella normativa di riferimento per la diagnosi energetica UNI CEI EN 16247-2. In tabella 7.5 si riporta una sintesi dei consumi effettivi e di quelli simulati. Per quanto riguarda il consumo effettivo elettrico, il valore pari a 245660 kWh è stato ottenuto dalla media delle bollette relative agli anni di riferimento 2018 - 2019. È stato riscontrato uno scostamento del 0,92% per i consumi elettrici e di 3,05% per i consumi termici rispetto ai dati di bolletta; pertanto il modello è validato.

Tabella 7.5 – Validazione del modello

Consumi	Effettivi	Operativi	Scostamento
Elettrico [kWh]	245660,00	243422,82	0,92%
Termico [Sm ³]	23015,47	23740,07	3,05%

Sono stati perciò valutati i possibili interventi migliorativi per incrementare le prestazioni energetiche di palazzo Murena, effettuando la simulazione con i dati climatici da normativa associati alla zona climatica di Perugia.

Gli interventi migliorativi proposti descritti al par. 2 sono riassunti nella tabella 7.6, analizzando costi, risparmi di energia, riduzione delle emissioni e tempi di ritorno. La soluzione globale è sintetizzata nella tabella 7.7 che presenta costi, dati relativi a fabbisogno e produzione elettrica annua, l'aliquota del surplus e dell'energia elettrica da rete necessaria per coprire il fabbisogno. Le ultime tre colonne della tabella sono riferite alle emissioni di CO₂, al risparmio annuo ed al tempo di ritorno dell'investimento.

Tabella 7.6 – Interventi migliorativi, costi risparmio di energia, emissioni e tempo di ritorno dell'investimento

Intervento migliorativo	Costo	Risparmio energetico	Riduzione	Emissioni	Riduzione	Tempo di ritorno
A-Sostituzione sorgenti luminose	15500 €	32490 kWh	-14 %	169239 kg/anno	-5%	3 anni
B- Centralizzazione app. elettriche supplementari	0 €	1732 kWh	-1 %	177150 kg/anno	-0.25%	0
C - Installazione valvole termostatiche	6000 €	4790 Sm ³	-12 %	162854 kg/anno	-9 %	< 3 anni
D - Sostituzione degli infissi	120000 €	126 Sm ³	-1 %	177196 kg/anno	-0.3 %	> 20 anni
E - Sostituzione boiler elettrici per ACS	7500 €	12479 kWh	-5 %	171855 kg/anno	-4 %	< 5 anni
F.1 - Installazione pannelli fotovoltaici standard	220000 €	182000 kWh	-75 %	133695 kg/anno	-25 %	8 anni
F.2 - Installazione tegole fotovoltaiche	700000 €	192000 kWh	-79 %	131241 kg/anno	-26%	17 anni
G - Sostituzione teleriscaldamento	300000 €	37736 Sm ³	-100 %	68944 kg/anno	-62 %	20 anni

Tabella 7.7 - Interventi migliorativo globale, costo, fabbisogno e produzione di energia elettrica, emissioni, risparmio e tempo di ritorno dell'investimento

Intervento migliorativo	Costo	Fabbisogno	Produzione BIPV	Da rete	Surplus	Emissioni	%	Tempo di ritorno
Globale A-B-E-F.2-G.3	1023000 €	252850 kWh	267675 kWh	103946 kWh	106990 kWh	38786 kg/anno	-78 %	< 19 anni

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non ci sono state consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

È stato inviato un abstract al Convegno internazionale di Architettura, Ingegneria e Design per la salvaguardia dei monumenti, *AID Monuments* 21-24 Maggio 2025, Perugia.

Titolo: *Energy retrofit of Palazzo Murena, Perugia (Italy): critical analysis and intervention proposals.*

Autori: Francesco Fraioli, Francesca Merli, Giacomo Barbini, Domenico Palladino, Francesco Fantozzi, Cinzia Buratti.

10 Eventi di disseminazione

Partecipazione al Convegno “Strumenti e tecnologie per la riqualificazione del parco edilizio nazionale, Risultanze del WP1 del progetto 1.5 del Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale”.

Roma, 28 Novembre 2024