

Universita' degli Studi del Molise

INTERVENTI DI INNOVAZIONE TECNICA PER
L'ADEGUAMENTO TECNOLOGICO ED EFFICIENTAMENTO
ENERGETICO DEGLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE DEGLI
EDIFICI I, II E III POLIFUNZIONALE IN CAMPOBASSO



PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTAZIONE

- Area Servizi Tecnici Università' degli Studi del Molise
Ing. Giovanni Lanza
Geom. Antonio Ramacciatì
Ing. Ramona Tucci
Ing. Gianmarco Procaccini
Arch. Basile Fabio

data
Giugno 2020

agg.to
Settembre 2022

revisione
03

allegato

**CALCOLO AUDIT ENERGETICO
EDIFICIO I POLIFUNZIONALE**

tavola

CIP

rapp.

file

Premessa

La presente relazione illustra le attività e i risultati dello studio condotto sul tema della razionalizzazione energetica e ottimizzazione della gestione degli edifici universitari.

L'attività descritta in questo elaborato si articola in due fasi; la prima consiste in un dettagliato audit energetico del *I edificio Polifunzionale*, sede amministrativa e didattica del *Dipartimento Giuridico dell'Università degli Studi del Molise*, finalizzato alla conoscenza degli usi finali di energia, all'individuazione e all'analisi di inefficienze e criticità che saranno propedeutiche alla seconda fase, che consiste invece nella individuazione di possibili interventi di miglioramento tecnologico e gestionale dell'edificio analizzato.

Ai fini della realizzazione del servizio in oggetto, si intende per Audit energetico “una procedura sistematica volta a fornire un'adeguata conoscenza del consumo energetico di un edificio e all'individuazione dei possibili interventi di miglioramento di natura tecnologica e gestionale che si renderanno necessari in futuro”. In accordo a questa definizione, esso prevede:

- il reperimento dei dati descrittivi e di ubicazione dell'edificio;
- la caratterizzazione dell'involucro opaco e trasparente, del sistema di ventilazione, degli impianti per la climatizzazione invernale ed estiva, per la produzione di acqua calda sanitaria e per l'illuminazione, compresi gli impianti alimentati a fonti energetiche rinnovabili;
- la raccolta ed analisi dei dati reali di consumo termico ed elettrico.

L'attività di audit è stata supportata dal monitoraggio energetico ed ambientale e la successiva analisi dei dati acquisiti ha fornito un supporto decisionale e interpretativo delle prestazioni reali del sistema edificio/impianti. Con riferimento a tutte le variabili misurate, i dati sono presentati sia in maniera aggregata rispetto al periodo di monitoraggio, sia mediante analisi degli andamenti orari.

Inoltre con le misure effettuate dei parametri ambientali indoor sono stati stimati i principali indici di valutazione delle condizioni ambientali all'interno degli edifici in accordo alla normativa EN ISO 7730: Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.

Nella seconda fase del lavoro, per l'edificio in esame, sulla base dei risultati ottenuti attraverso la modellazione numerica dell'immobile e tenendo conto sempre delle informazioni rilevate durante i sopralluoghi, sono stati ipotizzati ed individuati una serie di possibili misure di efficienza energetica per le quali è stato calcolato il costo globale di realizzazione ed il relativo beneficio in termini di risparmio energetico/economico (*riqualificazione energetica*).

La metodologia impiegata, per valutare i possibili interventi di retrofit energetico è quella del Cost-Optimal, imposta a livello europeo dal documento cardine per gli obiettivi di efficienza energetica in edilizia:

la Direttiva 2010/31/UE, “*Energy Performance of Buildings, EPBD- recast*” del 19 maggio 2010. Tale direttiva ha richiesto agli Stati membri di adottare, a livello nazionale o regionale, una metodologia di calcolo della prestazione energetica degli edifici basata sull’analisi del ciclo di vita economico, al fine di individuare il livello ottimale in funzione dei costi della prestazione energetica. Ovvero il fabbisogno energetico associato ad un utilizzo standard dell’edificio che richiede il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell’edificio stesso.

Dopo una prima sezione, che consiste in una breve introduzione riguardante gli obiettivi di un audit energetico e la metodologia di valutazione impiegata, la relazione conclusiva proposta è organizzata in due sezioni coerentemente alle attività svolte:

- **DIAGNOSI ENERGETICA:** caratterizzazione del sistema edificio/impianti; post-processing e organizzazione dei dati; calcolo e verifica indicatori prestazionali; diagnostica.
- **ANALISI DEGLI SCENARI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA:** identificazione delle misure di efficienza energetica; calcolo del fabbisogno di energia primaria; calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto; derivazione di un livello ottimale di prestazione energetica in funzione dei costi.

1. Procedura per la realizzazione di audit energetico e metodologia del Cost-Optimal

Il documento cardine della disciplina europea in materia di efficienza energetica in edilizia è la Direttiva 2002/91/CE, “*Energy Performance of Buildings*” (EPBD), integrata e aggiornata dalla Direttiva 2010/31/UE, “EPBD recast” del 19 maggio 2010.

Tale direttiva è stata recepita dall’Italia con il Decreto Legge 63/2013 del 4 giugno 2013 (L. 3 agosto 2013, n.90); questo, insieme ai decreti attuativi del 26/06/15 rappresenta l’ultimo atto ufficiale dell’iter legislativo italiano in materia di riqualificazione ed efficienza energetica del patrimonio immobiliare, pubblico e privato.

1.1 Diagnosi energetica

Il provvedimento legislativo citato ribadisce che alla base della valutazione della prestazione energetica di un edificio, intesa come domanda di energia per la climatizzazione invernale ed estiva degli ambienti, a meno che l’obiettivo non sia una semplice certificazione energetica, è necessaria una accurata diagnosi energetica, cioè un’individuazione critica e documentata degli usi finali e dei consumi dell’edificio oggetto di studio, volta ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio quale vero e proprio studio di fattibilità energetico/economico della ristrutturazione dell’edificio.

In generale, il fabbisogno di un edificio può essere calcolato su base oraria, mensile o annuale, attraverso valutazioni più o meno dettagliate, laddove la scelta del livello di approfondimento dipende dagli obiettivi del calcolo e dalla complessità dell’edificio.

In particolare la norma UNI EN ISO 13790/2008 -Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento- distingue diversi tipi di valutazione energetica degli edifici, da adottare alternativamente, in funzione dello scopo e del livello di approfondimento richiesto per lo specifico caso. In particolare la valutazione energetica può essere effettuata secondo le tipologie di approccio riportate nella *Tabella 1.1*.

Tipo di valutazione	Dati di progetto			Scopo della valutazione
	Utenza	Clima	Edificio	
Di progetto (Design Rating)	Standard	Standard	Elaborati di progetto	Permesso di costruire, Certificazione o qualificazione energetica
Standard (Asset Rating)	Standard	Standard	Reale	Certificazione o qualificazione energetica
Adattata all’utenza (Tailored Rating)	A seconda della finalità		Reale	Ottimizzazione, diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione

Tabella 1.1: Tipo di calcolo per la valutazione energetica.

Da tale classificazione si evince chiaramente che quando lo scopo della valutazione è quello di ottenere un permesso di costruzione o confrontare le prestazioni energetiche di diverse costruzioni (vale a dire

Attestato di Prestazione Energetica), si dovrebbe adottare uno dei primi due metodi indicati. Infatti, per rendere possibile un confronto coerente, bisogna adoperare le stesse condizioni al contorno (soprattutto per quanto riguarda i profili di occupazione, le caratteristiche delle apparecchiature installate, la ventilazione, le condizioni impostate di comfort).

Invece, la diagnosi energetica, punto di partenza imprescindibile per la progettazione di interventi di riqualificazione energetica di un edificio, richiede una valutazione adattata all'utenza, i cui dati di ingresso sono riferiti al sistema edificio-impianti nelle sue reali condizioni di progettazione e funzionamento. Questo comporta che la diagnosi energetica necessita di misure (in-situ) e rilievi (sopralluoghi e ispezioni) che dovrebbero essere effettuati in maniera affidabile ed in condizioni rappresentative del normale esercizio e, ove significativo, in condizioni ambientali corrette.

Il Decreto legislativo n. 102 del 4 Luglio 2014 -Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE- definisce la diagnosi energetica (o in maniera equivalente l'Audit energetico) come una procedura sistematica volta a:

- fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di un'attività o impianto industriale o di servizi pubblici o privati;
- individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici;
- riferire in merito ai risultati.

In sintesi, lo scopo è quello di riconoscere tipologie e prestazioni energetiche dell'involucro edilizio, dell'impianti di climatizzazione e produzione di acqua calda sanitaria e delle apparecchiature elettriche installate, nonché le modalità di utilizzo delle tecnologie stesse, al fine di ricostruire un bilancio in usi finali (termici ed elettrici) dell'edificio. Gli indici di prestazione valutati, sovente e più propriamente intesi come fabbisogni in condizioni realistiche di funzionamento e progetto dell'edificio, possono essere utilmente funzionali a successive progettazioni di interventi di retrofit energetico da eseguire sull'edificio stesso.

I requisiti generali per l'elaborazione di una diagnosi energetica sono riportati nella norma UNI CEI/TR 11428 -Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica- in vigore dal 6 Ottobre 2011.

Per sua stessa definizione, la diagnosi energetica integra dati raccolti sul campo (a seguito di sopralluoghi) con misure in sito e valutazioni mediante strumenti di calcolo (elaborazione di un modello matematico del sistema edificio/impianti), attraverso cui individuare e analizzare interventi di riqualificazione energetica dell'edificio, sulla base dell'analisi del reale fabbisogno.

In particolare, l'approccio prevede due macro-fasi:

- caratterizzazione energetica dell'edificio;
- simulazione tramite modello energetico dell'edificio.

Poiché la caratterizzazione energetica dello stato attuale di un edificio costituisce il fulcro del processo decisionale di progettazione del retrofit energetico, per realizzarlo è necessario creare un approfondito sistema di rilievo, raccolta ed analisi dei dati relativi al fabbisogno energetico, affinché sia possibile mettere in evidenza i consumi specifici e le condizioni di esercizio di tutti gli impianti asserviti alla struttura; essa richiede:

- analisi generale dell'utenza: dati climatici, profili di occupazione, censimento delle apparecchiature elettriche, ricostruzione dei consumi energetici, elettrici e termici, sulla base delle distinte di fornitura e della tipologia contrattuale;
- raccolta dei dati sull' involucro edilizio;
- raccolta dei dati relativi agli impianti termo-tecnici installati.

In sintesi, la conoscenza di parametri tecnico-prestazionali parziali (termofisica dell'involucro e prestazioni degli impianti) e globali (indici di efficienza energetica dell'edificio nel suo complesso) ha consentito la progettazione della riqualificazione energetica puntuale e strettamente connessa alle caratteristiche dell'edificio, sia per quanto riguarda l'involucro edilizio che relativamente agli impianti installati all'interno dell'immobile, che, in ultima analisi, consente anche il miglioramento delle condizioni microclimatiche indoor.

1.2 Metodologia del Cost-optimal

La sopracitata legge n. 90/2013 ha comportato un'evoluzione strutturale della normativa italiana in materia di efficienza energetica in edilizia, poiché con l'emanazione dei suoi decreti attuativi, si è assistito ad un cambiamento della metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, dell'individuazione dei requisiti minimi e degli ambiti di intervento.

Rispetto ai precedenti decreti e attuando quanto previsto a livello europeo, il miglioramento delle prestazioni energetiche presuppone un'analisi del ciclo di vita economico di un edificio, individuando per esso il livello ottimale di efficienza energetica: *Cost Optimal level of energy performance*. Esso corrisponde alla quantità di energia necessaria per il soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio che richiede il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato.

Questo nuovo approccio metodologico dunque comporta la valutazione non solo della riduzione del fabbisogno totale di energia dell'edificio ma anche della fattibilità economica delle misure di efficienza energetica proposte, per la riqualificazione dell'edificio esistente o per la configurazione progettuale scelta per un edificio da costruire, durante il ciclo di vita utile stimato per l'edificio stesso.

In particolare il regolamento delegato n.244/2012 della Commissione Europea, del gennaio 2012, ha integrato la Direttiva 2010/31/UE, istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli

ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici nuovi ed esistenti e per gli elementi edilizi.

Nel dettaglio, la metodologia del *Cost-Optimal*, per la scelta delle misure di retrofit energetico, si articola in sei fasi:

- definizione degli edifici di riferimento;
- identificazione delle misure di efficienza energetica;
- calcolo del fabbisogno di energia primaria;
- calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto;
- analisi di sensibilità per i calcoli che includono i prezzi dell'energia;
- derivazione del livello ottimale in funzione dei costi delle prestazioni.

Quello che si cerca di fare, cioè, è di passare da un sistema basato sul limite prescrittivo, ad un sistema in cui le prestazioni energetiche degli edifici siano confrontate con quelle di un edificio “target”; la definizione di un *Reference Building* costituisce, infatti, lo start-up per l'applicazione della nuova metodologia imposta a livello europeo dal Regolamento citato.

Nel seguito saranno brevemente analizzati i singoli passi della metodologia del *Cost-Optimal*.

Definizione dell'edificio di riferimento

Nel caso del presente lavoro, in cui tale metodologia è applicata al fine di valutare i possibili scenari di retrofit energetico per l'immobile in oggetto, il *reference building* non è altro che l'edificio nel suo stato attuale di fatto, caratterizzato in ogni sua parte sia attraverso analisi documentali e indagini in sito (audit energetico).

Identificazione delle misure di efficienza energetica

Una volta definito l'edificio di riferimento si devono identificare le misure di efficienza energetica da applicare a quest'ultimo al fine di migliorarne le prestazioni energetiche. In generale, una misura di efficienza energetica è una modifica apportata all'edificio che generi una riduzione del fabbisogno di energia primaria dello stesso. Considerando che le misure che hanno un impatto su un sistema possono condizionare la prestazione energetica di un altro sistema, queste devono essere combinate in pacchetti di misure e/o varianti, in quanto una buona combinazione di esse può creare sinergie che consentono di ottenere risultati migliori (in termini di costi e prestazioni energetiche) rispetto a quelli ottenibili con misure singole.

Calcolo del fabbisogno di energia primaria derivante dall'applicazione di misure e pacchetti di misure all'edificio di riferimento

L'obiettivo della procedura di calcolo è quello di determinare il fabbisogno energetico annuo in termini di energia primaria. Pertanto, si prevede in primo luogo il calcolo del fabbisogno finale di energia per il riscaldamento e il raffreddamento, quindi il fabbisogno finale di energia per tutti gli usi e, in terzo luogo, il consumo di energia primaria. Ciò significa che la «direzione» del calcolo va dal fabbisogno alla sorgente (ovvero, dal fabbisogno di energia dell'edificio all'energia primaria).

Nell'ambito del presente lavoro, il fabbisogno energetico del sistema è stato determinato attraverso la modellazione numerica e la simulazione dinamica del comportamento energetico del sistema edificio-impianti.

Calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto

Il calcolo dei costi globali prende in considerazione l'investimento iniziale, i costi di gestione, i costi di sostituzione, nonché il valore residuo degli elementi edilizi e degli impianti e i costi di smaltimento, se del caso. Per il calcolo a livello macroeconomico di tali somme, si tengono conto dei prezzi al netto di tutte le imposte, dell'IVA, degli altri oneri e dei sussidi, e si introduce la categoria di costo per le emissioni di gas a effetto serra. Il regolamento delegato n.244/2012 stabilisce che i dati relativi ai costi devono essere ottenuti mediante l'analisi di mercato, ed essere coerenti per quanto riguarda luoghi e tempi dei costi di investimento, di gestione, dell'energia e, se applicabile, di smaltimento. Sempre il regolamento fornisce tutte le indicazioni necessarie al calcolo del costo globale per ognuna delle misure e pacchetti di misure considerate per l'edificio in esame.

Dai calcoli sul costo globale si ottiene il valore attuale netto (VAN) dei costi sostenuti nel corso di un periodo di riferimento definito. Questa metodologia ha il vantaggio di consentire di valutare l'opzione più vantaggiosa tra investimenti alternativi, riconducendo ad un medesimo orizzonte temporale i flussi di cassa che si manifesterebbero in momenti diversi e che quindi non sarebbero direttamente confrontabili.

Derivazione di un livello ottimale in funzione dei costi della prestazione energetica

La fase finale della metodologia prevede il confronto tra il costo globale calcolato per le diverse misure di efficienza energetica ipotizzate e per le combinazioni di quest'ultime.

E' possibile elaborare un grafico costo/energia che riporta in ascissa l'energia primaria espressa in kWh/m²anno e in ordinata il costo globale, delle differenti possibili soluzioni ipotizzate, espresso in €/m².

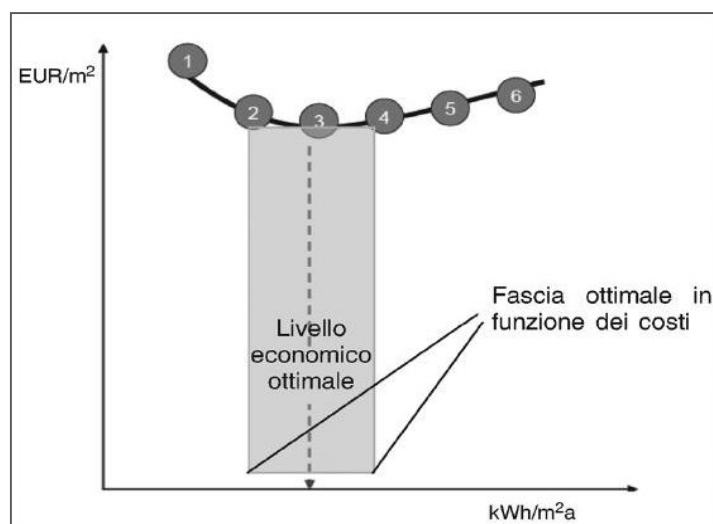


Figura 1. 1: Grafico delle differenti varianti e posizione della fascia ottimale in funzione dei costi.

Fonte: Orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n. 244/2012.

Non sempre c'è una soluzione univoca, infatti con riferimento al grafico esemplificativo riportato nella *Figura 1.1*, si ha che alcuni interventi possono rivelarsi ottimali per il miglioramento della prestazione energetica ma richiede dei costi di investimento molto elevati (pacchetto 1); mentre altri interventi possono richiedere sia un elevato costo globale che consumi elevati in termini di energia primaria (pacchetto 5 e 6).

La combinazione dei pacchetti con il costo più basso si trova collocata al punto inferiore della curva (pacchetto 3); e la sua posizione sull'ascissa fornisce automaticamente il livello ottimale in funzione dei costi dei requisiti minimi di prestazione energetica.

Analisi di sensibilità

Il regolamento impone infine, agli Stati membri di effettuare un'analisi di sensibilità dei risultati ottenuti in funzione di ipotesi realistiche di variazioni dei parametri fondamentali del metodo, il cui andamento futuro può avere un impatto significativo sul risultato finale.

In particolare il regolamento consiglia agli Stati membri di effettuare un'analisi di sensibilità dei diversi scenari di prezzo per tutti i vettori energetici rilevanti nel contesto nazionale e impone di effettuare almeno due scenari per i tassi di sconto da utilizzare nei calcoli sui valori ottimali in funzione dei prezzi.

2. Diagnosi energetica del I edificio Polifunzionale

Il I edificio Polifunzionale è sede amministrativa e didattica del Dipartimento giuridico dell'Università degli Studi del Molise, è sito in Campobasso (come indicato in *Figura 2.1*), e presenta una superficie utile complessiva pari a circa 7935 m².

Attraverso un censimento preliminare in sito e alle relazioni disponibili, sono state ricavate tutte le informazioni necessarie in termini di caratterizzazione del sistema edificio/impianti.



Figura 2. 1: Vista satellitare del I edificio polifunzionale del dipartimento giuridico dell'Università degli Studi del Molise.

Per un inquadramento generale si riportano in *Tabella 2.1*, le principali caratteristiche geografiche e i dati climatici esterni di progetto per la città di Campobasso.

DATI CLIMATICI CAMPOBASSO		Dati invernali di progetto		Dati estivi di progetto	
Latitudine	41°33'36''	Temperatura esterna (°C)	-4	Temperatura esterna (°C)	29
Longitudine	14°39'37''				
Altitudine (m)	701	Umidità relativa esterna (%)	48,8	Umidità relativa esterna (%)	50,0
Zona climatica	E				
Gradi giorno	2346	Velocità del vento (m/s)	4,3	Escursione termica giornaliera (°C)	9,0
Periodo riscaldamento	15/10-15/04				

Tabella 2. 1: Dati geografici e climatici di progetto per la città di Campobasso.

Fonte: UNI 10349-1, UNI 11300-1.

L'immobile oggetto di diagnosi presenta una pianta rettangolare cava e si sviluppa su quattro livelli; un piano completamente interrato adibito ad autorimessa e di estensione inferiore rispetto ai due piani sovrastanti; un piano terra in parte interrato, un piano primo, ed un piano secondo di estensione inferiore agli altri. Infatti su una parte del solaio del primo piano risulta allocato uno dei campi sportivi della struttura.

In particolare, l'edificio considerato oggetto di calcolo risulta essere costituito dal piano parzialmente interrato, dal primo piano e dal secondo piano, poiché, il piano completamente interrato risulta non servito da impianti termotecnici, e di conseguenza non è possibile valutare per esso un fabbisogno di energia. Pertanto,

benché sia stato necessario caratterizzare tale livello per ricostruire un modello reale e attendibile dell'edificio, per esso non si effettuerà alcuno studio in termini di interventi di riqualificazione.

La sede svolge le sue attività, didattico amministrative, dal lunedì al venerdì dei giorni feriali, dalle ore 7:45 alle ore 20:00.

2.1 Caratterizzazione termo-fisica dell'involucro edilizio: Audit d'involucro

Per la definizione geometrica dell'involucro edilizio, è stato possibile recuperare gli elaborati grafici originali (piante sezioni e prospetti) relativi all'edificio, oltre che la descrizione stratigrafica di pareti e solai.

La superficie utile complessiva dell'edificio è circa pari a 7935 m², di cui quella netta condizionata risulta essere circa 4834 m². La *Tabella 2.2* riassume il rapporto tra la superficie opaca e quella trasparente totale dell'edificio, differenziato per le quattro esposizioni.

	Totale	Nord	Est	Sud	Ovest
Superficie opaca totale (m ²)	3604,93	1038,56	793,90	958,90	813,57
Superficie opaca fuori terra (m ²)	2298,68	756,53	600,98	694,67	246,49
Superficie trasparente (m ²)	533,40	181,23	110,23	184,46	57,47
Rapporto opaco/finestrato (%)	14,80	17,45	13,88	19,24	7,06

Tabella 2. 2: Percentuale d'involucro opaco e trasparente.

2.1.1 Involucro trasparente

I componenti finestrati dell'edificio oggetto di studio sono essenzialmente di tre tipologie. La prima tipologia interessa esclusivamente la parete vetrata inclinata che affaccia sulla chiusura nord-est del cortile interno dell'edificio (lettera A della *Figura 2.2*). Si tratta di un vetro ad U a camera d'aria, con telaio e divisori in alluminio. La seconda tipologia interessa tre aule del piano terra che presentano la parete esterna curva (esposizione sud-est) realizzata interamente in vetrocemento (lettera B della *Figura 2.2*), ad eccezione delle due porte di uscita che sono invece costituite da un vetro camera chiaro e telaio e divisori in alluminio.

Infine l'ultima tipologia di componente finestrato, riguarda di fatto tutte le finestre e le porte finestre dell'edificio (lettera C e D della *Figura 2.2*). Tali serramenti si compongono di un vetro camera chiaro e telaio e divisori in alluminio. Per quanto riguarda i sistemi di chiusura di quest'ultima tipologia, esse presentano un sistema con singola anta o doppia anta a battente per le porte, un sistema di chiusura scorrevole per le finestre; e risultano invece non apribili quei componenti che vanno a comporre delle pareti quasi o interamente vetrate sui vari punti di accesso dell'edificio (lettera D della *Figura 2.2*, in cui è riportato il caso dell'accesso al primo piano dal lato sud-est dell'edificio).

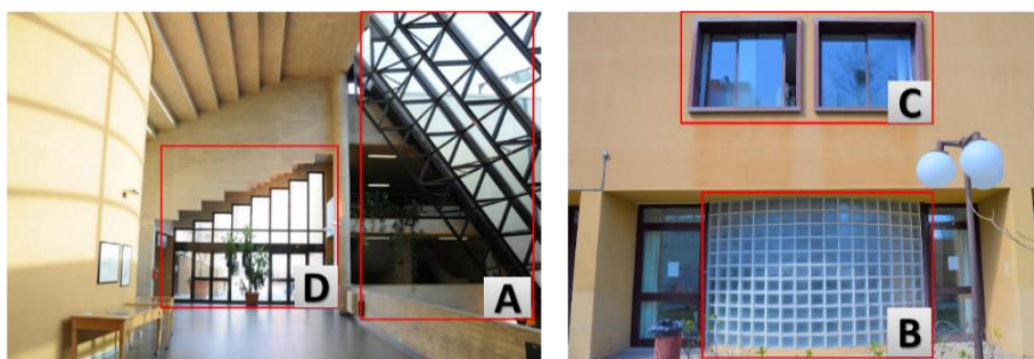


Figura 2. 2: Tipologie di componenti finestrati dell'edificio.

La Tabella 2.3 riporta, per le tipologie di componente finestrato sopra indicate, i valori della trasmittanza del vetro (U_g) e del telaio (U_f) ricavati dalle specifiche tecniche di materiali simili, per caratteristiche e proprietà, a quelli individuati all'interno dell'edificio.

Tipologia componente	U_g (W/m ² K)	U_f (W/m ² K)
Parete vetrata inclinata	2,800	5,869
Vetrocemento	1,800	3,911
Altri componenti finestrati	2,665	5,869

Tabella 2. 3: Trasmittanza componenti finestrati.

Inoltre, sono state censite due tipologie di sistemi di schermatura, entrambi interni. In particolare, per tutte le finestre si tratta di tende a lamelle verticali in tessuto rigido chiaro, ad esclusione di quelle presenti lungo il corridoio pensile del secondo piano, di fatto prive di un sistema di schermatura. Mentre per le pareti in vetrocemento si hanno le tende in tessuto chiaro riportate in Figura 2.3, che interessano tutta la parete esterna.

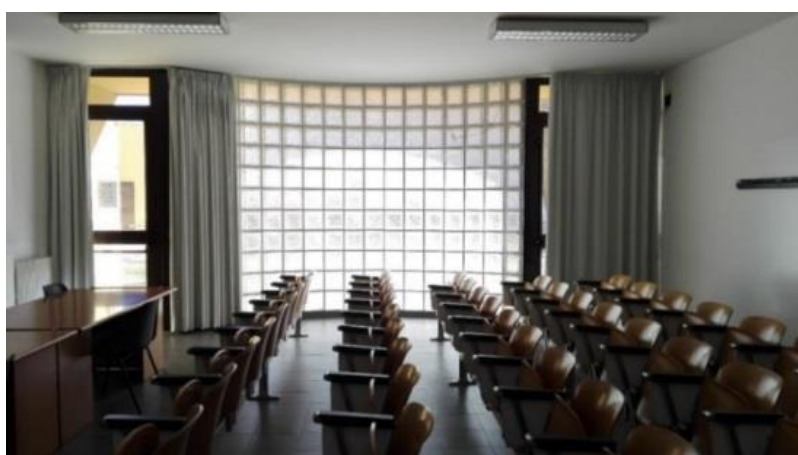


Figura 2. 3: Particolare della parete esterna circolare in vetrocemento e relativo sistema di schermatura.

2.1.2 Involucro opaco

L'immobile è costituito da diverse pareti esterne composte da laterizi alleggeriti, intercapedine d'aria e pannelli in calcestruzzo, e nel caso di esposizione nord-ovest presenta anche uno strato di materiale isolante.

I solai dei piani fuori terra ("solai interpiano") sono costituiti da elementi tipo predalles di altezza 24 cm con rete elettrosaldata, oltre al massetto e pavimento, per uno spessore complessivo di circa 48 cm. Invece per il solaio di copertura del primo piano, sul quale è poggiato il campo sportivo ("soffitto a terrazzo campo sportivo"), alla predetta stratigrafia è aggiunto uno strato di polistirene e un sottofondo di cemento magro, per uno spessore totale di circa 72 cm.

Le relazioni fornite dall'ufficio tecnico sono state adoperate come fonti per l'audit attuale, in conformità alle prescrizioni di legge in cui si fa esplicito riferimento alla valorizzazione della documentazione già esistente. Non sono state quindi effettuate endoscopie e carotaggi anche per evitare misure invasive in un immobile sede di attività lavorativa continuativa. Quindi utilizzando le informazioni rese disponibili dall'ufficio tecnico e per mezzo delle indicazioni della UNI 10351/1994 "Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore", sono state individuate le caratteristiche termo-fisiche dell'involucro opaco.

Al fine di avere un quadro globale in merito all'involucro opaco dell'edificio, nella *Tabella 2.4* sono riportate in maniera sintetica le stratigrafie costituenti l'involucro stesso.

Stratigrafia	Spessore totale (m)	Trasmittanza totale (W/m ² K)	Trasmittanza periodica (W/m ² K)
Parete verticale esterna nord-ovest	0,48	0,329	0,05
Parete verticale esterna nord-est	0,30	0,839	0,43
Parete verticale esterna sud-est e cortile	0,36	0,559	0,16
Parete verticale controterra	0,32	0,570	0,24
Parete passaggio pedonale	0,18	1,702	1,31
Parete partizioni interne	0,10	2,510	2,39
Solaio interpiano	0,52	0,478	0,17
Solaio su ext. Portico	0,52	0,478	0,02
Pavimento su vespaio areato	0,61	0,392	0,01
Pavimento passaggio pedonale	0,39	1,410	0,33
Soffitto a terrazzo piastrelle	1,46	0,300	0
Copertura passaggio pedonale	0,21	0,578	0,29
Soffitto a terrazzo campo sportivo	0,72	0,318	0
Soffitto a terrazzo gradonatura	0,72	0,376	0,01

Tabella 2. 4: Tavella riepilogativa stratigrafie involucro opaco.

Ai fini del contenimento del consumo energetico di un edificio, e quindi della qualità energetica dello stesso, riveste un ruolo di fondamentale importanza la trasmittanza termica degli elementi edilizi, che è strettamente legata alle caratteristiche costruttive e ai materiali impiegati.

Come si evince dalla tabella sopra riportata il valore di trasmittanza termica per le strutture è superiore al valore individuato dal decreto requisiti minimi (*DM 26/06/2015 appendice B “Requisiti minimi per gli edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica”*) per la località di Campobasso.

Infatti, per quantificare il livello di isolamento dell’involucro edilizio in esame, si può considerare che se l’edificio fosse sottoposto ad un intervento ristrutturazione importante o riqualificazione energetica (secondo la definizione del Decreto Requisiti Minimi), il valore della trasmittanza termica delle strutture opache verticali dovrebbe essere inferiore o uguale a $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ (a partire dal 2015) ovvero $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ (a partire dal 2019); mentre per le strutture opache orizzontali tale valore dovrebbe essere inferiore o uguale a $0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ (a partire dal 2015) e $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (a partire dal 2019).

Quindi nella condizione attuale l’edificio oggetto di calcolo risulta avere un livello di isolamento basso, e ciò si ripercuote in elevate perdite per trasmissione in regime invernale ed incide sia con un incremento del fabbisogno termico sia sulle condizioni di comfort per gli occupanti.

La trasmittanza termica periodica è invece il parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell’arco delle 24 ore. Per la classificazione delle prestazioni dell’involucro con riferimento al regime estivo, il DM 26/06/2015, impone dei vincoli per quelle località con valore medio mensile dell’irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, maggiore o uguale a 290 W/m^2 . La località analizzata, Campobasso, rientra in tale prescrizione, avendo un’irradianza sul piano orizzontale di circa 307 W/m^2 (come definito dalla UNI 10349).

Quindi anche in tal caso, relativamente alle pareti verticali opache (ad eccezione di quelle nel quadrante Nord-Ovest, Nord, Nord-Est) che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica deve essere inferiore a $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Mentre, per quanto riguarda tutte le pareti opache orizzontali e inclinate, il predetto valore deve essere sia inferiore a $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$. Considerando i valori ricavati, con riferimento al regime estivo, le prestazioni degli elementi d’involucro sono da ritenersi non soddisfacenti: l’involucro non impedisce il surriscaldamento degli ambienti interni durante il suddetto regime.

Al fine di aumentare le possibilità di interpretazione dei dati sopra riportati, anche per una futura proposta di soluzioni di intervento, si è ritenuto opportuno prevedere per l’edificio il monitoraggio dei flussi termici mediante l’utilizzo di un termo-flussimetro in opera e l’acquisizione di immagini termografiche.

Per valutare la corrispondenza delle stratigrafie e dei valori di trasmittanza calcolati con quelli reali in opera dell’edificio, per una parete campione (parete verticale esterna esposizione nord-ovest) è stata effettuata la misura in opera della trasmittanza mediante termo-flussimetro, seguendo quanto prescritto dalla norma ISO 9869. La misura effettuata può evidentemente essere ripetuta per gli altri componenti, qualora lo si ritenesse necessario.

In particolare è stato impiegato un termoflussimetro wireless TESTO 435, munito di una sonda termoflussimetrica interna, una sonda di temperatura esterna e di un datalogger, le cui caratteristiche tecniche sono riportate in *Figura 2.4*.



Figura 2. 4: Caratteristiche tecniche del termoflussimetro impiegato.

Siccome per una diagnosi accurata è necessario individuare e caratterizzare i singoli ponti termici di forma e/o struttura per ciascuna porzione rappresentativa dell'edificio, si è ricorsi alla termografia ad infrarossi.

In particolare, la termocamera utilizzata in questa campagna di indagini è il modello FLIR P660 (Figura 2.5); le cui principali caratteristiche tecniche sono le seguenti:

- Sensore Microbolometrico non raffreddato da 640x480pixel;
- Sensibilità: <30mK @ +30°C;
- Ottica standard FOV/Min. Dist. Fuoco: 12°x9°/1,2m;
- Risoluzione spaziale: >0,33 mrad;
- Focalizzazione automatica e manuale;
- Display LCD da 1024x600 pixels;
- Allineamento automatico tramite puntatore laser;
- Range di temperatura misurabile da -40°C a +500°C;
- Accuratezza: ±1°C o ±1% di lettura.



Figura 2. 5: Termocamera impiegata.

Le analisi termografiche sono state svolte in regime invernale (25 gennaio 2017) e sono state condotte sui prospetti e all'interno dell'edificio, nel primo caso per lo più a scopo qualitativo, volte quindi a stabilire la presenza di dispersioni e ponti termici. Vista inoltre, la tipologia costruttiva dell'edificio, la termografia risulta avere consistenza solamente in corrispondenza dell'involucro opaco e dei telai metallici, mentre tutto quello registrato in corrispondenza dell'involucro trasparente è fortemente influenzato dalle riflessioni.

Risultati del rilevamento in opera mediante termografia

A scopo esemplificativo, nella Figura 2.6, sono riportate alcune immagini all'infrarosso riferite ai prospetti, in particolare le immagine A e B sono relative ad una parete con esposizione nord-ovest; la C è rappresentativa delle pareti che affacciano sul cortile interno, mentre nell'immagine D è rappresentata parte della facciata esposta a nord-est.

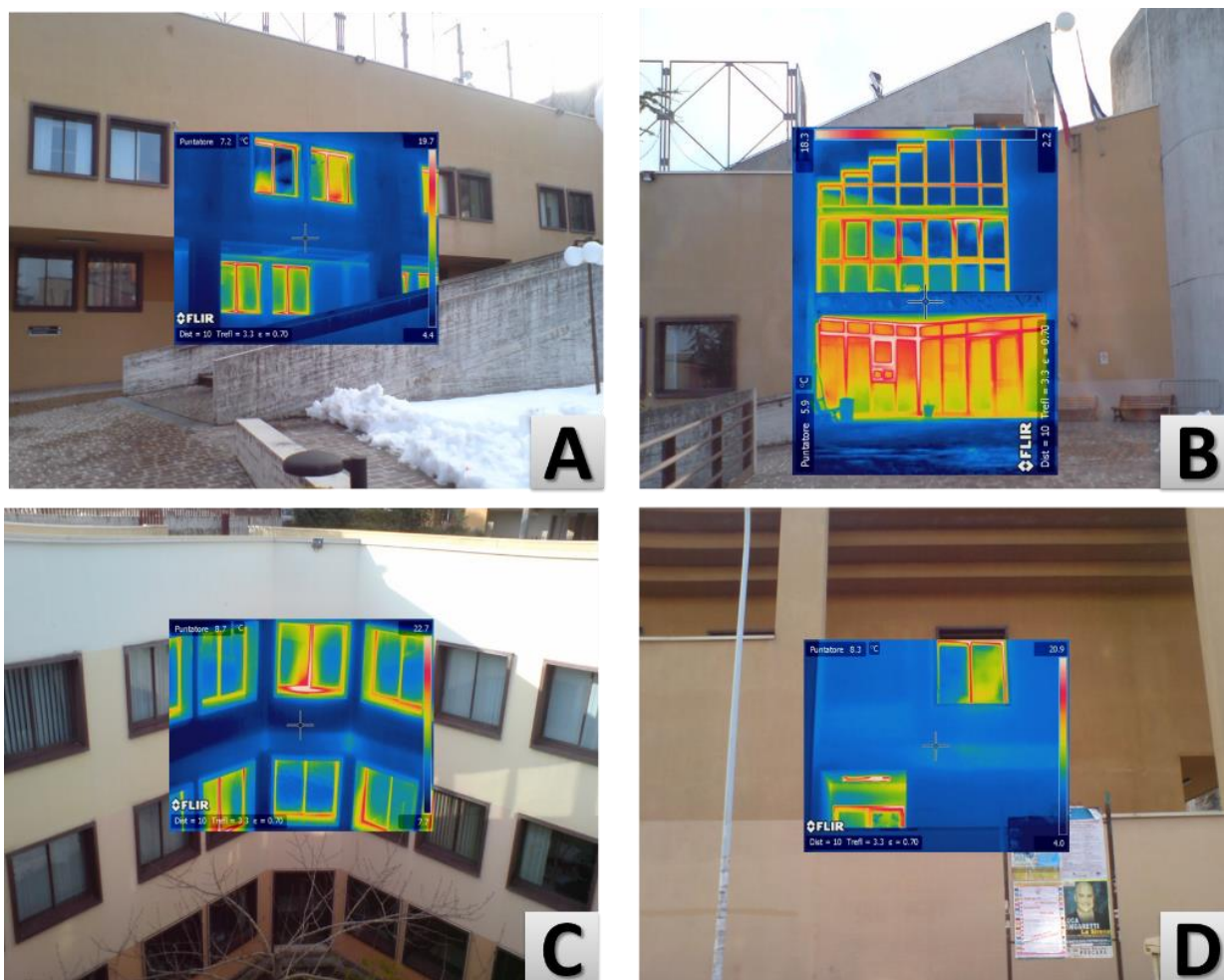


Figura 2. 6: Immagini IR e fotografiche dei componenti edilizi esposti. A) e B) a nord- ovest; C) sul cortile interno; D) a nord-est.

Si sottolinea che le presenti sono state rilevate solo per fini qualitativi, per cui le temperature riportate sono solo indicative.

Dalla *Figura 2.6* risultano visibili i ponti termici della struttura dovuti a travi e pilastri. Inoltre e si riscontrano elevate dispersioni termiche in corrispondenza dei componenti finestrati, dovute al fatto che essi presentano una temperatura superficiale superiore rispetto a quella rilevata in corrispondenza del componente opaco in cui sono inseriti.

Per quanto riguarda invece il prospetto sud-ovest, non è stato possibile effettuare analisi termografiche attendibili, a causa delle condizioni meteorologiche non idonee alla misura al momento dei sopralluoghi. Comunque, anche senza un'analisi strumentale, risulta, come mostrato in *Figura 2.7*, particolarmente evidente un'anomalia dell'involucro opaco sotto ognuna delle finestre presenti sulla facciata. Si può ipotizzare che ciò sia imputabile alla non corretta installazione dei radiatori sul lato interno, in corrispondenza a tale irregolarità.



Figura 2. 7: Particolare di una parete con esposizione sud-est.

La termografia, come già detto in precedenza, può essere utilizzata per individuare in modo semplice e non invasivo la presenza di eventuali ponti termici ed irregolarità all'interno di una generica struttura opaca. In riferimento a ciò, si riporta, in *Figura 2.8*, l'immagine termografica della parete esposta a nord-ovest, che è stata scelta per la misura della trasmittanza termica in campo, poiché ha mostrato una temperatura superficiale omogenea. In particolare, in figura viene evidenziato il punto esatto del posizionamento del termoflussimetro.

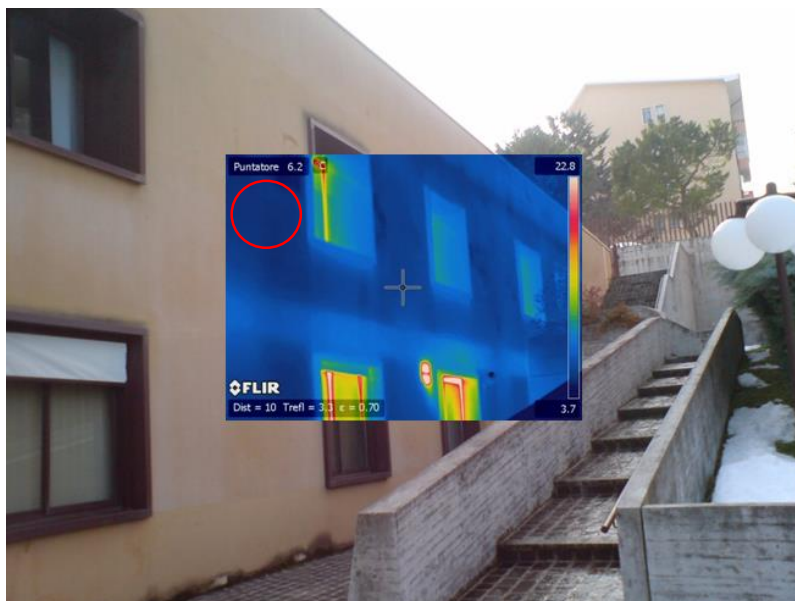


Figura 2. 8: Immagine IR e fotografica del prospetto nord-ovest. Indicazione del punto per la misura della trasmittanza.

Risultati misura in opera della trasmittanza

La misura mediante termo-flussimetro, è stata effettuata nel periodo tra il 22 febbraio al 28 febbraio, così che, essendo ancora in funzione l'impianto di riscaldamento potevano assicurarsi le condizioni interne di

temperatura necessarie a creare la forzante necessaria affinché la misura raggiungesse le condizioni di regime. Il tempo di campionamento è stato fissato pari a 600s. Il nodo installato è costituito all'interno da un sensore di flusso termico e un sensore di temperatura, mentre all'esterno, in corrispondenza dei primi, da un sensore di temperatura. La misura, come già detto, deve essere fatta evitando zone in cui siano presenti ponti termici e caratterizzate da condizioni di continuità a regime per il flusso termico. E' stato quindi individuato l'elemento opaco rappresentativo della struttura verticale analizzata, in particolare localizzato nell'ufficio di un docente (Figura 2.8) del piano secondo, con esposizione a nord-ovest.

La parete in esame è la “parete verticale esterna esposizione nord-ovest” che presenta uno spessore complessivo pari a 48cm, ed è costituita da uno strato di laterizi alveolari alleggeriti (dimensioni 25x25x20cm), uno strato d'aria (spessore 10 cm), uno strato di materiale isolante in fibra di vetro (spessore 5 cm) e un pannello in calcestruzzo armato alleggerito (spessore 10 cm); internamente presenta uno strato di intonaco di calce e gesso, mentre esternamente uno strato di malta cementizia. La stratigrafia è descritta nel dettaglio in Figura 2.9, in cui vengono anche mostrate le immagini relative ai sensori messi in opera.

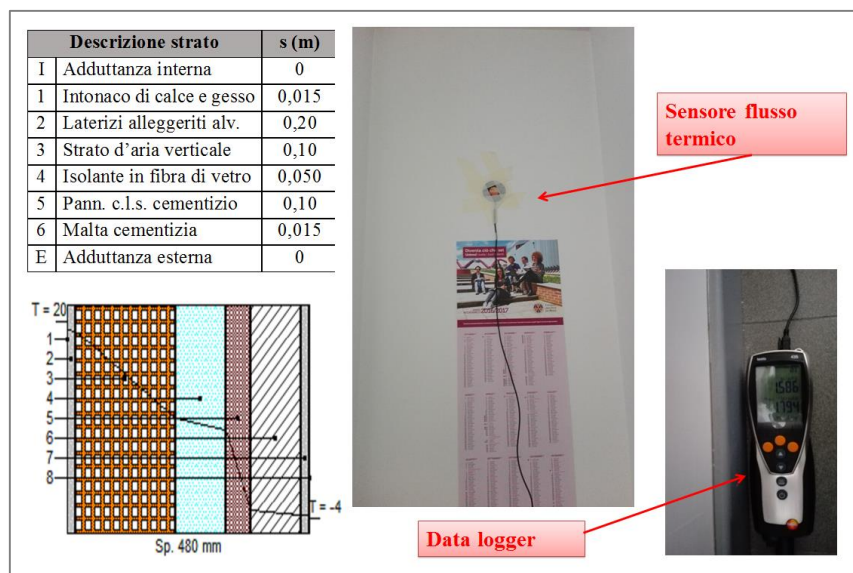


Figura 2. 9: Sensori in opera per la misura della trasmittanza sulla parete verticale esterna esposta a nord-ovest).

Il periodo di rilevamento è stato di circa una settimana, e con un intervallo di acquisizione di 600 si è giunti ad ottenere 802 misure del valore della trasmittanza, della temperatura interna e della temperatura esterna.

I valori sono stati elaborati secondo quanto prescritto dalla normativa tecnica, considerando quindi solo i dati in cui la differenza tra la temperatura dell'aria interna ed esterna (misurata) è maggiore o uguale di 10°C. Inoltre sono stati scartati quei valori in corrispondenza del transitorio termico dovuto all'accensione dell'impianto di riscaldamento. A titolo esemplificativo si riporta in Figura 2.10 solo un intervallo (quello più esteso) per il quale si verificano le condizioni predette. Vengono quindi mostrati gli andamenti della temperatura dell'aria interna ed esterna e quello la trasmittanza termica per il periodo compreso tra la notte

del 25/02 e la notte del giorno successivo. Dall'andamento delle temperature si evince che il valor medio della differenza di temperatura dell'aria interna ed esterna è stato compreso tra 9-16°C.

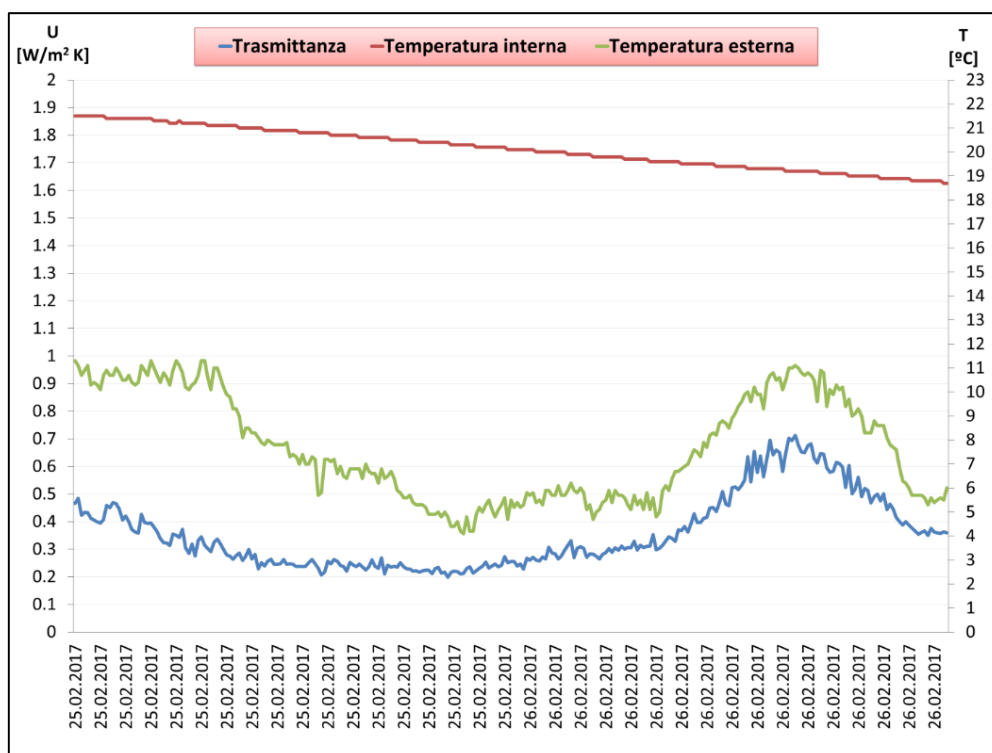


Figura 2. 10: Andamenti della temperatura dell'aria interna ed esterna e della trasmittanza termica per un periodo di tempo in cui sono rispettate le condizioni prescritte per la misura.

Considerando, invece, tutto il periodo di misura, la temperatura interna ha subito variazioni fra un minimo di 18,4°C e un massimo di 23,7°C, mentre la temperatura esterna fra 3,9°C e 16,9°C. Il valore misurato della trasmittanza oscilla intorno a un valore di regime, e il valore medio misurato considerando tutto il periodo di misura è stato 0,370 W/m² K.

Il valore calcolato, invece, come riportato nella *Tabella 2.4*, è pari a 0,329 W/m²K. Si può affermare quindi che il valore misurato converge a quello calcolato. In particolare il valore misurato risulta maggiore rispetto a quello calcolato di poco più del 12%; e ciò è in accordo a quanto si ritrova nella letteratura tecnica, in cui generalmente i valori di trasmittanza misurata sono superiori a quelli della trasmittanza calcolata, anche dell'ordine del 20%, a causa di una messa in opera non conforme al progetto, degradazione delle prestazioni degli isolanti nel corso del tempo, o condizioni ambientali diverse da quelle di progetto.

2.2 Descrizione degli impianti termotecnici e illuminotecnici asserviti all'edificio: Audit degli impianti

L'audit degli impianti è stato condotto sulla base delle informazioni fornite dall'ufficio tecnico dell'università del Molise e ove possibile sono stati reperiti i libretti delle macchine costituenti gli impianti, cercando di individuare tipologia, potenza termica e caratteristiche di efficienza. Inoltre sono stati condotti una serie di sopralluoghi (nei giorni: 25/01/2017, 22/02/2017, 1/03/2017 e 22/03/2017) con lo scopo di

effettuare ispezioni e misure sugli impianti a servizio dell'edificio in esame, nonché individuare il numero e il tipo di terminali presenti, la loro collocazione e la presenza di eventuali sistemi di regolazione. In tal modo è stato quindi possibile caratterizzare gli impianti di riscaldamento, climatizzazione e produzione dell'acqua calda sanitaria, nonché il sistema di illuminazione interno dell'edificio.

2.2.1 Impianti termici

L'impianto termotecnico principale installato nell'edificio in esame è del tipo misto aria-acqua, e soddisfa le esigenze di riscaldamento e qualità dell'aria per oltre l'80% della superficie netta climatizzata. Per la restante porzione di superficie (costituita dalle 4 aule più grandi presenti), è presente un impianto di tipo a tutt'aria, che soddisfa le esigenze di riscaldamento, raffrescamento e qualità dell'aria.

Il fluido termovettore "acqua calda" viene prodotto da una centrale termica posizionata nel locale tecnico dedicato adiacente alla struttura. Il fluido termovettore "acqua fredda" viene prodotto dalla centrale frigorifera posta all'esterno, in una zona annessa all'edificio. Le unità di trattamento dell'aria e il bollitore per la produzione e l'accumulo di acqua calda sanitaria sono collocati in un locale ad esse dedicato adiacente all'edificio in esame. In *Figura 2.11* vengono evidenziate le posizioni dei predetti sistemi rispetto al fabbricato.

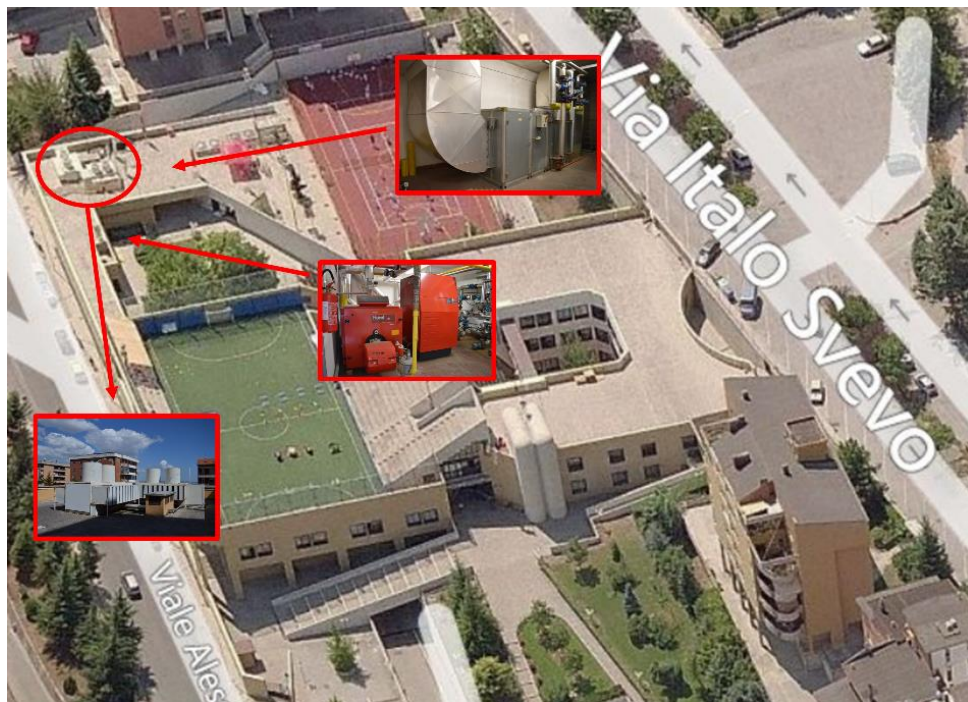


Figura 2. 11: Collocazioni rispetto all'immobile delle macchine asservite all'edificio.

I periodi di funzionamento degli impianti risultano essere:

- per il **riscaldamento**: dal 15 ottobre al 15 aprile, dal lunedì al venerdì, dalle ore 6:30 alle ore 18:00 (ad eccezione dei giorni in cui si riscontrino temperature particolarmente rigide per cui risulti necessario incrementare il periodo di funzionamento);

- per il **raffrescamento**: dal 15 giugno 31 agosto dal lunedì al venerdì, dalle ore 10:00 alle ore 15:00 (escludendo il periodo delle vacanze estive);
- per la **climatizzazione dell'aria**: tutto l'anno (salvo pause per vacanze estive o invernali) dal lunedì al venerdì dalle ore 7:00 alle ore 18:00.

Mediante la raccolta dei dati di targa delle macchine costituenti la centrale termo-frigorifera, è stata individuata la tipologia, la potenza termica e le caratteristiche di efficienza delle stesse.

La centrale termica asservita all'edificio è costituita da due caldaie a condensazione alimentate a gas naturale collegate in serie (*Figura 2.12*). Una caldaia, da 400 kW, è sempre in funzione, mentre un'altra, da 420 kW, entra in esercizio laddove sia richiesta una potenza superiore.

Nella *Tabella 2.5* sono riportate alcune delle principali caratteristiche delle caldaie in questione.



Figura 2. 12: Caldaie Hoval asservite all'edificio.

Caldaia Ultragas (400kW)	
Potenza utile nominale (kW)	400
Temperatura di esercizio massima (°C)	90
Rendimento utile full load (%)	98,3
Caldaia Max - 3 Plus (420kW)	
Potenza utile nominale (kW)	420
Temperatura di esercizio massima (°C)	90
Rendimento utile full load e 80/60°C (%)	85,8

Tabella 2. 5: Caratteristiche tecniche caldaie.

Durante i sopralluoghi le caldaie sono state oggetto di un'analisi termografica che ha permesso verificare effettivamente la temperatura di mandata dell'acqua, andando a misurare la temperatura superficiale del tubo

di mandata nella sua porzione non isolata. Come si evince dall'immagine all'infrarosso riportata in *Figura 2.13*, la temperatura di mandata, per il giorno 25/01/2017, risulta essere pari a 85°C.

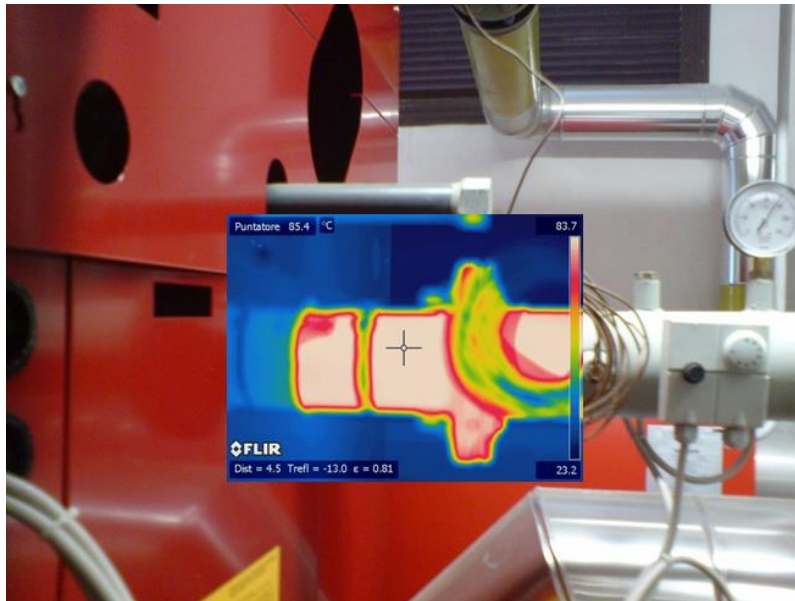


Figura 2. 13: Immagine IR e fotografica del tubo di mandata della caldaia Hoval, modello Ultragas (400kW).

Per quanto riguarda la produzione di acqua refrigerata, l'edificio è dotato di due macchine frigorifere mostrate in *Figura 2.14*, caratterizzate da una resa frigorifera pari a 167 kW.



Figura 2. 14: Macchine frigorifere allocate sul tetto della centrale.

Le macchine della centrale termo-frigorifera, sono poi interfacciate con le cinque unità di trattamento aria che servono l'edificio; di queste, quella denominata “UTA primario” provvede a soddisfare le esigenze di rinnovo e qualità dell'aria, mentre le altre sono deputate anche a soddisfare le richieste di riscaldamento e

raffrescamento, configurandosi, così, come un impianto a tutt'aria. Nella *Figura 2.15* è riportata una delle UTA presenti nella centrale ad esse dedicata.



Figura 2. 15: Unità di trattamento dell'aria installata nella centrale dedicata.

Ognuna delle unità di trattamento dell'aria provvede alle richieste di condizionamento di una specifica zona di competenza; in particolare:

- “UTA aula 300 posti” provvede, con una portata d'aria pari a $13.800 \text{ m}^3/\text{h}$, alla climatizzazione dell'aula magna che si sviluppa tra il piano terra e il primo piano;
- “UTA aula 8” e “UTA aula 7” sono due unità di trattamento uguali, ognuna delle quali tratta una portata d'aria pari a $4.300 \text{ m}^3/\text{h}$. Esse infatti soddisfano le richieste di climatizzazione di due aule identiche per dimensioni, caratteristiche, impianti terminali: l'aula 8 e l'aula 7, poste nella zona centrale del piano terra;
- “UTA aula 180 posti” serve l'aula Kesnel da 180 posti; per essa, però, ma non è stato possibile reperire informazioni circa la portata elaborata;
- “UTA primario” con una portata d'aria pari a $17.900 \text{ m}^3/\text{h}$, provvede al trattamento dell'aria (al solo fine di garantire la qualità e i giusti ricambi d'aria) di aule, uffici, aule studio, zone di circolazione e zona ristoro.

Le prime 4 UTA elencate sono dotate di una batteria di riscaldamento e di una di raffrescamento, mentre quella denominata primario, solo di una batteria di pre-riscaldamento e una di post-riscaldamento. Tali batterie sono alimentate dalle centrali termica e frigorifera. Tutte le UTA sono inoltre dotate di umidificatore a pacco evaporante, che però risulta non essere in funzione.

Per soddisfare le richieste di acqua calda sanitaria dell'intero immobile, è presente un bollitore, collegato alla centrale termica, che funge anche da accumulo (*Figura 2.16*), di capacità 1000l.



Figura 2. 16: Accumulo per ACS.

Per quanto riguarda il sottosistema terminale dell'impianto termico analizzato, attraverso un accurato censimento sono stati individuati numero e tipo di sistemi presenti, e la loro collocazione in ambiente. In particolare sono state individuate diverse situazioni per il condizionamento dei locali:

- dove si ha un sistema di tipo misto, per zone quali aule, uffici, aule studio, zone di circolazione e zona ristoro, sono presenti diffusori o bocchette a soffitto, per l'immissione di aria, e radiatori ad acqua;
- solo in due zone (aula studio ala ovest e aula 10 al II piano), sono presenti terminali di tipo fan-coil;
- nei servizi igienici, gli unici sistemi terminali sono i radiatori in ghisa;
- nelle due aule da 100 posti e in quella da 300 posti, sono presenti bocchette di immissione con canale a vista e bocchette di estrazione.
- infine nell'aula da 180 posti, oltre alla presenza in ambiente di diffusori a soffitto, sono installati dei terminali ad acqua di tipo fan-coil.

Complessivamente, oltre alle innumerevoli bocchette di immissione dell'aria dislocate in quasi ogni locale dell'edificio, sono stati censiti circa 100 radiatori e 7 termoconvettori.

Si riportano in *Figura 2.17* delle immagini fotografiche di tutte le diverse tipologie di terminali censiti.



Figura 2. 17: Varie tipologie di terminali censiti.

Durante il sopralluogo avvenuto il 25/01/2017, per i terminali ad aria si è effettuata una misura puntuale dell'aria da essi immessa. Per quelli molto alti, invece, si è proceduto a acquisire l'informazione tramite rilievo termografico, che ha permesso di mappare la temperatura superficiale del terminale analizzato. E' emerso che, per la giornata in esame, la temperature dell'aria immessa da tutti i sistemi ad aria risulta essere mediamente pari a 30 °C. Si sottolinea quindi che, non essendo possibile in alcun modo fare una regolazione della temperatura di mandata, nel caso di “UTA primario” essa risulta superiore al valore generalmente utilizzato negli impianti misti, laddove cioè la parte ad aria dell'impianto ha il solo compito di bilanciare il carico latente e di soddisfare i requisiti relativi al rinnovo dell'aria. A scopo esemplificativo è mostrata l'immagine all'infrarosso di una delle bocchette di immissione presenti nell'aula magna dell'edificio (Figura 2.18).

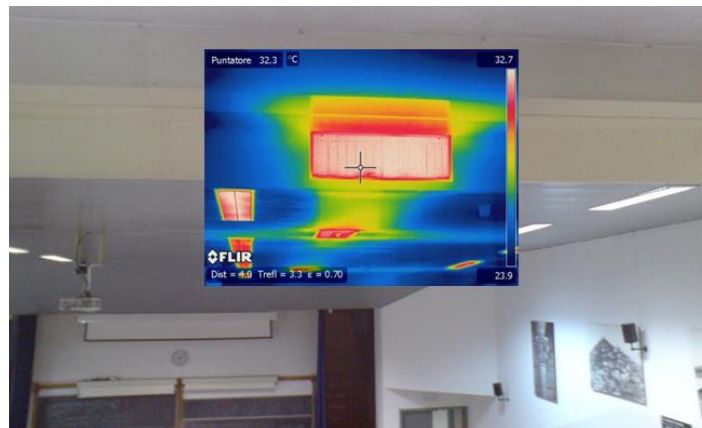


Figura 2. 18: Immagine IR e fotografica di una bocchetta di immissione dell'aria climatizzata presente nell'aula magna.

Per quanto riguarda i terminali ad acqua, dal sopralluogo del 25/01/2017 è risultato, sempre per mezzo di indagini termografiche, che la temperatura superficiale dei radiatori si attesta intorno agli 80°C. Si riporta a titolo esemplificativo, in Figura 2.19 il radiatore presente nell'atrio principale della struttura.

In un successivo sopralluogo, effettuato in un periodo quasi primaverile (22/03/2017), è emerso che la temperatura superficiale dei radiatori, misurata attraverso un'opportuna termoresistenza portatile, è risultata essere compresa, a seconda degli ambienti, fra 41°C e 46°C.



Figura 2. 19: Immagine IR di un radiatore nell'atrio principale della struttura.

La variabilità delle condizioni di funzionamento riscontrate e precedentemente descritte determina numerose criticità nella modellazione numerica del sistema che serve l'edificio in esame.

Per quanto riguarda, infine, il sottosistema di regolazione, come si evince anche dalle misure effettuate in campo, l'impianto nel suo complesso non è dotato di alcun tipo di regolazione, se non quella sulla temperatura di mandata dell'acqua delle centrali termiche. Dalle misure effettuate, però, tale valore di set-point (almeno per il periodo invernale) non è risultato essere sempre costante. Pertanto non è possibile in alcun modo controllare la temperatura all'interno degli ambienti.

2.2.2 Impianti illuminotecnici

I dispositivi di illuminazione presenti nell'immobile, installati negli spazi comuni e negli uffici, sono in buona parte lampade a scarica fluorescenti in corpi con due lampade da 58W ognuna o da singola lampada da 32W. Solo nell'aula magna, oltre alle lampade a scarica sono presenti 7 faretti alogeni (del "tipo 1" in Figura 2.20); e nella zona della parete vetrata inclinata dove i tre piani vanno a formare un unico ambiente, sono presenti, oltre a 12 lampade a scarica, dei faretti alogeni di due dimensioni, in particolare 5 del "tipo 1" e 4 del "tipo 2" riportati in Figura 2.20.

Per alcune zone campione sono stati rilevati, oltre alla tipologia, anche il numero di corpi illuminanti e la potenzialità totale, al fine di individuare la potenza per unità di superficie installata, che è risultata essere pari a circa 8 W/m².

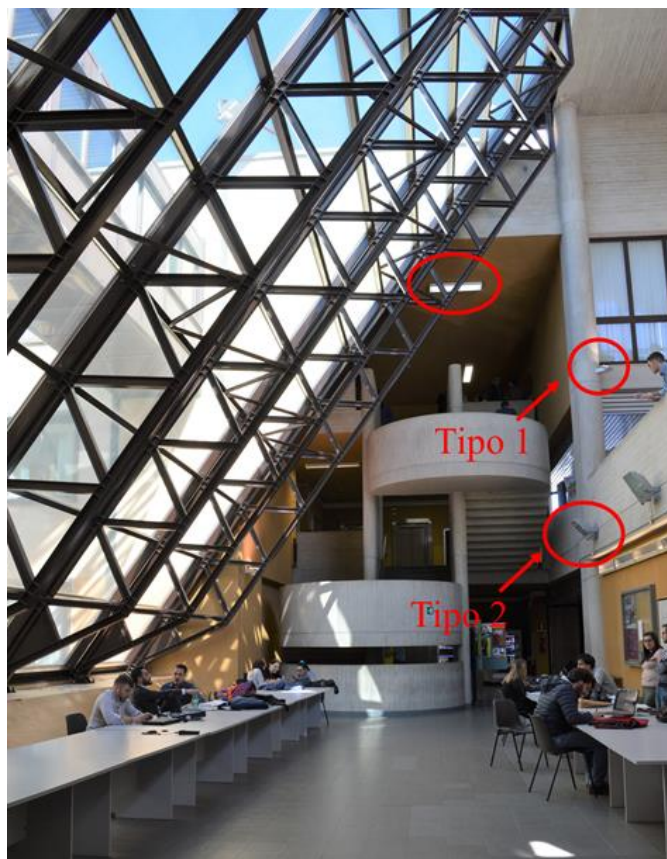


Figura 2. 20: Zona parete vetrata. Indicazione delle tre diverse tipologie di dispositivi di illuminazione.

2.3 Destinazione d'uso e misura dei parametri ambientali interni: Audit delle zone termiche

Attraverso un accurato sopralluogo, è stata verificata ed individuata la destinazione d'uso di ogni singolo ambiente interno all'edificio. La *Tabella 2.6* riporta le zone termiche per ciascun piano; tutte organizzate attorno ad una corte centrale dominata da una parete vetrata inclinata e presentano una distribuzione simile degli ambienti, con uffici o aule sul perimetro esterno dell'edificio e una zona centrale dedicata ai collegamenti e alle aule maggiori.

Piano	Zone termiche
-1	Autorimessa
0	Aule, Servi, presidio/portineria, Archivio
1	Aula magna, Presidenza, Uffici docenti, Servizi, presidio/portineria, bar
2	Uffici docenti, Aule, Servizi

Tabella 2. 6: Tipi di zone termiche nei diversi piani.

Al fine di descrivere nel modo più accurato possibile le reali condizioni che sussistono all'interno dell'edificio e quindi nelle varie zone in esso individuate, si è ritenuto necessario effettuare il monitoraggio di alcune grandezze microclimatiche, quali temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria e livello di

illuminamento; così da poter rilevare le effettive condizioni termiche, visive e di qualità dell'aria degli ambienti scelti come rappresentativi delle varie zone termiche individuate all'interno dell'edificio.

Il piano di monitoraggio qui di seguito esposto, contiene una descrizione delle grandezze che devono essere misurate, la definizione della distribuzione spaziale delle misure, dei tempi di campionamento, delle tipologie e delle caratteristiche della strumentazione che si intende utilizzare.

Misura per i parametri ambientali interni

La distribuzione spaziale delle misure è stata stabilita con un'attenta analisi del sistema edificio/impianti. In particolare la definizione della griglia di misura si è basata sui seguenti passaggi:

- suddivisione dell'edificio in zone omogenee per carichi interni (destinazione d'uso), forzanti climatiche esterne (esposizione), tipologia di involucro, tipologia di impianto e regolazione;
- scelta del posizionamento della strumentazione all'interno dei locali di riferimento.

Nella selezione delle zone per effettuare le misure, dalla zonizzazione riportata nella precedente *Tabella 2.6*, sono esclusi il bar e il piano a quota -1. Sono stati scelti i locali più rappresentativi in termini di occupazione, tipologia di attività ed esposizione.

In particolare le *Figure 2.21* e *2.22* descrivono le principali caratteristiche degli ambienti in cui sono state effettuate le misure di umidità, temperatura, illuminamento e velocità dell'aria.

In particolare tali grandezze sono state tutte monitorate negli ambienti riportati nella *Figura 2.21*, mentre solo per quanto riguarda le misure di illuminamento e velocità dell'aria, sono state monitorate anche negli ambienti riportati nella *Figura 2.22*.







Destinazione	Piano	Esposizione	Superficie	Componenti finestrati	Terminali	Immagine
Ufficio 8	II	Nord-ovest	48 m ²	1	1 Radiatore 1 Bocchetta	
Aula 5	0	Sud-est	63 m ²	1 Parete est	1 Radiatore 2 Bocchette	
Aula 8	0	-	128 m ²	0	2 Bocchette	
Ufficio RA	I	Nord-ovest	37 m ²	1	1 Radiatore 1 Bocchetta	
Atrio-studio	0	Sud-est	307 m ²	Parete inclinata	6 Radiatori	
Aula 10	II	Nord-ovest	30 m ²	1 Parete est 1 Parete int	1 Fan-coil	

Figura 2. 21: Descrizione dei locali di riferimento - misura dei parametri ambientali interni.




Uso	Piano	Esposizione	Area	Componenti finestrati	Terminali	Punti luce	Immagine
Aula 4	0	Nord-ovest	51 m ²	2	1 Radiatore 2 Bocchette	6	
Aula magna	I	-	361 m ²	0	6 Diffusori	18	
Aula Graziani	I	Sud-est	81 m ²	2	2 Radiatori	9	

Figura 2. 22: Descrizione dei locali di riferimento - misura dei parametri ambientali interni.

Nei locali di riferimento sono state misurate le grandezze ambientali interne, utili a caratterizzare le condizioni di comfort dell'edificio e le prestazioni degli impianti. Sulla base delle caratteristiche dei terminali ambiente si è ritenuto opportuno monitorare la temperatura dell'aria e l'umidità relativa come indicatori delle condizioni termo-igrometriche. Si è invece scelto di misurare il livello di illuminamento sul piano di lavoro per qualificare le condizioni di benessere visivo nei locali. Infine, allo scopo di qualificare gli indici di comfort indoor si è deciso di misurare anche la velocità dell'aria. La *Tabella 2.7*, a seguire riassume le principali grandezze monitorate.

<i>Simbolo</i>	<i>Grandezza</i>	<i>Tempo di campionamento</i>	<i>Tipo di misura</i>
$t_a(^{\circ}\text{C})$	Temperatura dell'aria	5 minuti	Continuata (22/02 – 01/03)
$UR (\%)$	Umidità relativa	5 minuti	Continuata (22/02 – 01/03)
$T_s (^{\circ}\text{C})$	Temperatura superficiale	5 minuti	Continuata (22/02 – 01/03)
$v_a (\text{m/s})$	Velocità dell'aria	10 minuti	Puntuale (25/01 e/o 22/03)
$E (\text{Lux})$	Illuminamento	10 minuti	Puntuale (25/01 e/o 22/03)

Tabella 2. 7: Grandezze ambientali interne monitorate nei locali di riferimento.

Temperatura e umidità relativa

La temperatura di bulbo secco dell'aria ambiente è uno dei principali parametri ambientali responsabile delle condizioni di benessere indoor, in particolare influenza gli scambi termici convettivi tra il corpo umano e l'ambiente circostante. Per essa non vengono forniti dalla norma i valori limite massimo e minimo affinché venga garantito il comfort. Tuttavia per ambienti moderati, nei quali non vi sono superfici radiative che determinano significative di uniformità all'interno dell'ambiente stesso, si può approssimare la temperatura dell'aria con la temperatura operativa. In tal caso la norma ISO 7730 definisce i requisiti di benessere raccomandati, secondo i quali la temperatura operativa in regime invernale deve essere compresa tra 20-24°C, ed in regime estivo tra 23-26°C.

L'umidità relativa dell'aria ambiente invece influisce in modo determinante sul bilancio termoigrometrico dell'individuo: in particolare sulle aliquote trasmissive per evaporazione. Infatti un'elevata umidità dell'aria riduce drasticamente l'evaporazione del sudore e induce, quindi, una sensazione di discomfort. Il range di umidità relativa dell'aria tollerata dall'uomo, oltre il quale si innesca discomfort, è molto ampio: varia tra il 30% ed il 70%, in entrambi i regimi, invernali ed estivi.

Il periodo di monitoraggio per il valore della temperatura e dell'umidità relativa interna ha riguardato le giornate dal 22 febbraio al primo marzo, con un periodo di campionamento scelto pari a 5 minuti. Infatti, considerando che il monitoraggio è fatto in un ambiente moderato, dove non ci sono fonti locali di discomfort, e dunque l'andamento dei parametri indoor è piuttosto uniforme, si è ritenuto ragionevole che tale intervallo consenta anche negli ambienti caratterizzati da un'elevata superficie finestrata di analizzare gli eventuali fenomeni di discomfort locale. La settimana scelta è tipica dei mesi invernali, quando ad impianto acceso, le dispersioni per ventilazione e trasmissione sono bilanciate sia dai carichi endogeni e dai guadagni solari che dall'impianto la cui regolazione non è gestita dagli utenti ed è non modificabile.

Lo strumento utilizzato per le misure di temperatura e umidità è un data-logger testo 177-H, a 4 canali con sensori interni e ingresso per sonde esterne; le cui specifiche tecniche sono riportate nel prospetto in *Figura 2.23*. In ciascun ambiente il sensore è stato posto in posizione baricentrica e lontano da sorgenti termiche dirette o indirette in modo da evitare che la misura venisse perturbata. Inoltre, laddove possibile, è stato utilizzato, per lo stesso periodo e con lo stesso passo di campionamento della sonda di temperatura e umidità dell'aria, una sonda di temperatura superficiale, connessa al data-logger in questione.



Figura 2. 23: Data-logger Testo 177-H1.

Velocità dell'aria

La velocità dell'aria condiziona in modo indiretto sia lo scambio termico convettivo che evaporativo in quanto la velocità media ed il livello di turbolenza modificano in modo significativo il coefficiente di scambio termico convettivo e di massa. La sensibilità alla velocità è particolarmente elevata negli ambienti freddi dove gli scambi convettivi prevalgono rispetto a quelli radiativi. In ogni ambiente, l'aria circola, con velocità non costanti all'interno dell'intera zona. Il movimento dell'aria può iniziare ad essere percepito quando ha una velocità pari o superiore a 0.3 m/s. In regime estivo, un movimento d'aria entro 1 m/s non è fastidioso, mentre, in regime invernale, anche la minima percezione di corrente (aria con velocità superiore a 0.35 m/s) può essere fastidiosa. In linea di massima, le norme sul benessere individuano come intervallo di accettabilità per la velocità dell'aria 0.05-0.20m/s.

La misura della velocità dell'aria è stata fatta con un termo-anemometro digitale portatile mod. AS65, le cui specifiche tecniche sono riportate nel prospetto in *Figura 2.24*, il cui sensore per la misura di velocità dell'aria ha un'elica montata su un cuscinetto a basso attrito progettato per eseguire misure sia ad alte che a basse velocità.



Figura 2. 24: Caratteristiche anemometro.

La misura della velocità dell'aria è stata effettuata con un tempo di campionamento per ciascuna misura è stato 10 minuti, lo stesso intervallo temporale della misura di illuminamento. Infatti, essendo l'ambiente moderato e non essendoci rischio di forti correnti d'aria tale intervallo è stato ritenuto sufficientemente rappresentativo.

Livello di illuminamento

Per quanto riguarda il livello di illuminamento, la nuova normativa che specifica i requisiti illuminotecnici per i posti di lavoro interni, che corrispondono alle esigenze di comfort visivi e di prestazione visiva, è la UNI EN 12464-1: 2011, “Luce e Illuminazione, illuminazione dei posti di lavoro-Parte 1: Posti di lavoro in interno”. Facendo riferimento a tale normativa, il soddisfacimento dei requisiti normativi, laddove presenti, è legata, al controllo e al rilievo di alcune grandezze fotometriche:

- livello di illuminamento;
- uniformità di illuminamento;
- distribuzione delle luminanze;
- direzionalità della luce;
- controllo dell’abbagliamento.

Il monitoraggio, in questa fase ha riguardato il livello di illuminamento medio mantenuto riferito alle possibili diverse condizioni visive abituali. Come suggerito dalla norma i valori di illuminamento medio mantenuto tengono conto degli aspetti psico-fisiologici, requisiti dei compiti visivi, ergonomia della visione, esperienza pratica, sicurezza ed economia. La tabella seguente (*Tabella 2.8*) riporta i valori limite previsti per le diverse tipologie di zone termiche individuate nell’edificio, in base a quanto riportato nella norma UNI EN 12464.

Per conoscere il livello di illuminamento e la relativa distribuzione spaziale, è necessario individuare le superfici di interesse, dove collocare i piani di misura (i piani cioè dove generalmente si svolge il compito visivo), e definire una griglia di punti di misura significativa. Per ciascun ambiente individuato, commentando i risultati di misura sarà indicata la potenza di illuminazione ed il numero e il tipo di corpo illuminante installato.

	E (lux)
<i>Sala conferenza e riunioni</i>	500
<i>Aule scolastiche</i>	300
<i>Sale lettura</i>	500
<i>Uffici (scrittura, battitura, lettura e trattamento dati)</i>	500
<i>Bagno</i>	200
<i>Ristorante self-service</i>	200
<i>Corridoio</i>	100
<i>Ingresso</i>	100

Tabella 2. 8: Livello di illuminamento interno. Fonte UNI EN 12464.

Per gli ambienti precedentemente descritti sono state effettuate misure sui piani di lavoro con sonde poste con il sensore in posizione orizzontale e per diverse scene di luce naturale e artificiale, come sarà descritto con riferimento a ciascuna zona, per riuscire a caratterizzare le situazioni che si ripetono in condizioni abituali.

Gli scenari possono essere così riassunti:

- schermi interni aperti e illuminazione artificiale spenta;
- schermi chiusi e illuminazione artificiale accesa.

La misura è stata svolta in un tipico giorno invernale durante l'orario di lavoro. Il tempo di campionamento per ciascuna misura è stato 10 minuti e per ciascuna misura è stato ricavato il valore medio, massimo e minimo rilevato nell'intervallo di acquisizione.

Gli valori di illuminamento interni sono stati misurati con un luxmetro le cui caratteristiche tecniche sono specificate nel prospetto in *Figura 2.25*.



Figura 2. 25: Caratteristiche luxmetro.

Analisi dei parametri descrittivi delle condizioni indoor

Come fin ora illustrato, in alcuni ambienti campione sono state misurate illuminamento, temperatura, umidità e velocità dell'aria, e sulla base tali parametri ambientali indoor sono stati stimati i principali indici di valutazione delle condizioni ambientali all'interno dell'edificio in accordo alla normativa EN ISO 7730: *Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*.

Di seguito sono riportate delle considerazioni inerenti i monitoraggi effettuati e tale analisi sarà presentata per singolo ambiente ma a scopo esemplificativo solo alcuni dei dati monitorati sono commentati.

2.3.1 Elaborazione del monitoraggio

UFFICIO NO 8

L'ufficio in oggetto, esposto a Nord-Ovest (*Figura 2.26*), è organizzato per due postazioni di lavoro e durante il periodo di monitoraggio è stato caratterizzato da un'occupazione saltuaria. Il condizionamento invernale di tale ambiente avviene grazie ad un radiatore e all'immissione di aria climatizzata attraverso una bocchetta. E' inoltre caratterizzato da un'ampia superficie finestrata dotata di tende a lamelle in tessuto bianco come sistema di schermatura interno.

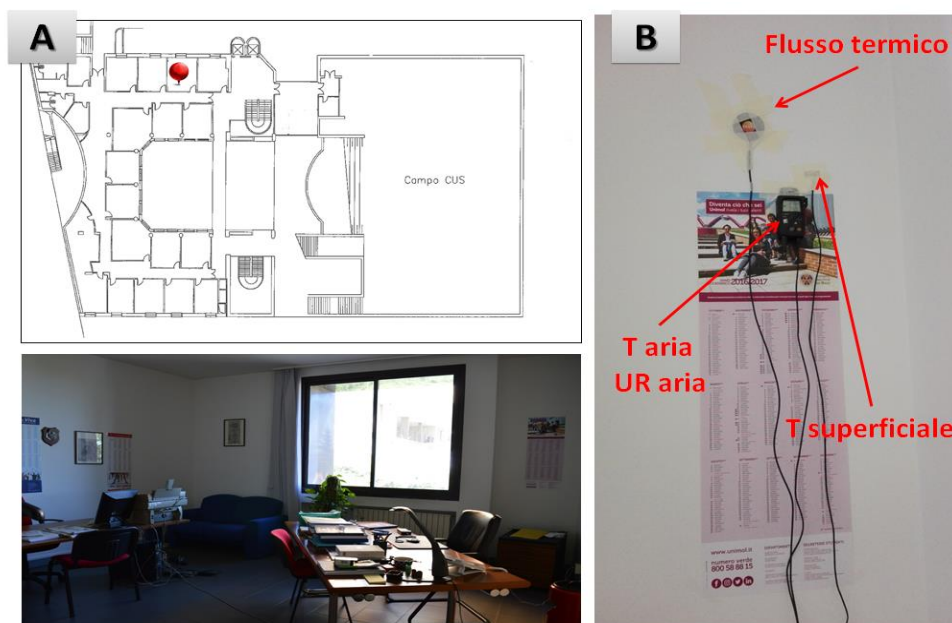


Figura 2. 26: Ufficio NO 8: a) posizione; b) sensore di temperatura e umidità.

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (22/01 – 1/03) è riportato nelle due figure seguenti (Figura 2.27 e Figura 2.28), in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità (in rosa) per assicurare le condizioni di comfort indoor e il valore medio, massimo e minimo.

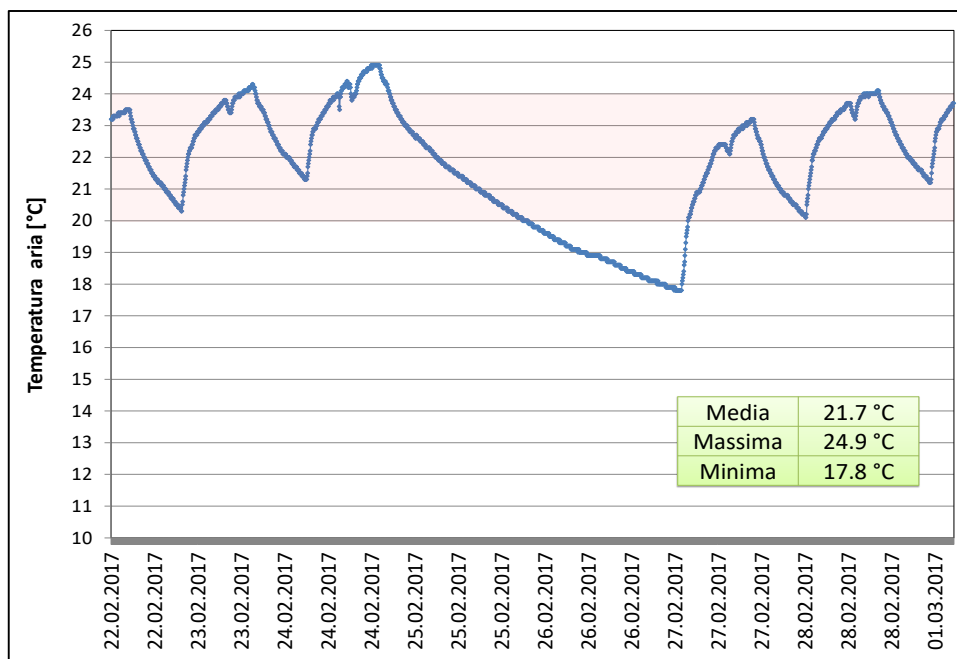


Figura 2. 27: Ufficio NO 8: andamento della temperatura interna 22Febbraio-1Marzo.

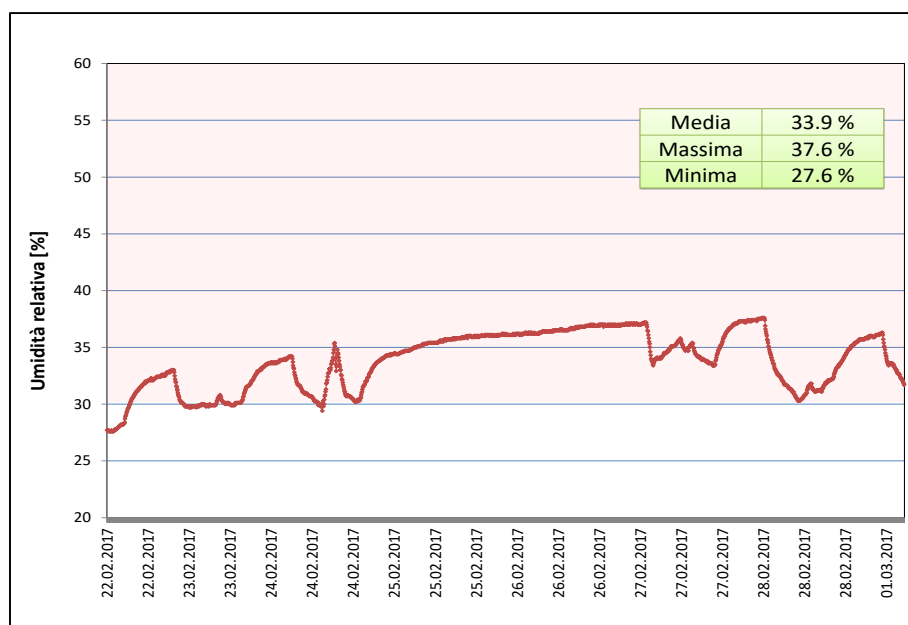


Figura 2. 28: Ufficio NO 8: andamento umidità relativa 22Febbraio-1Marzo.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria supera talvolta i 24°C, con valore massimo intorno a 25°C. Il valore dell'umidità relativa risulta tendenzialmente più basso della soglia 50% ritenuta ottimale, si mantiene infatti, intorno al 34%.

Inoltre è stata monitorata la temperatura superficiale interna (Figura 2.29), della parete esposta verso l'esterno, ovvero sulla parete adiacente la finestra. Come si vede dall'andamento riportato in figura, la temperatura superficiale segue l'andamento della temperatura dell'aria, e i valori registrati per ciascun intervallo di campionamento differiscono di circa 1°C dai valori della temperatura dell'aria. Non si registrano quindi particolari fenomeni di disuniformità della temperatura.

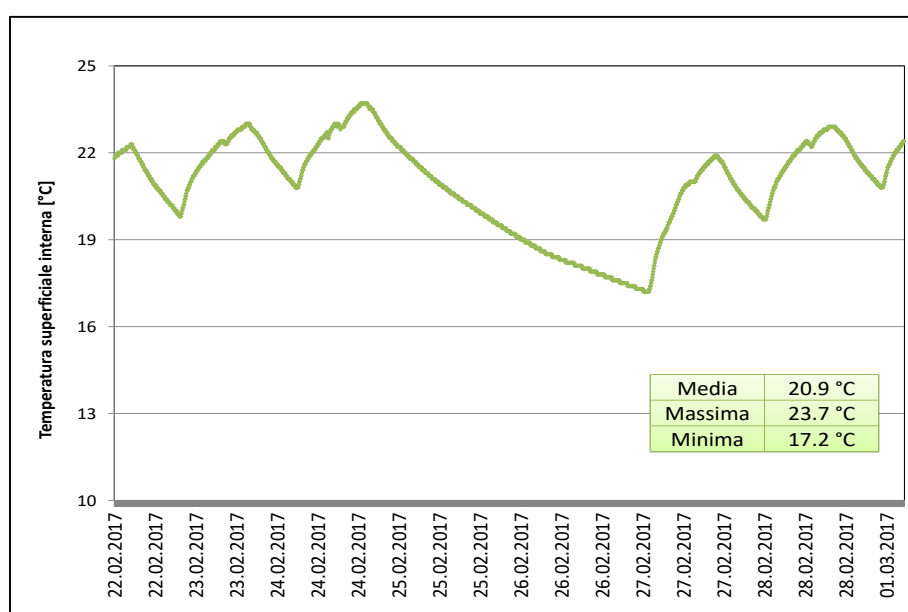


Figura 2. 29: Ufficio NO 8: andamento della temperatura superficiale interna 22Febbraio-1Marzo.

Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore a quella dell'aria, cosa verosimile in ambiente moderato e considerando l'andamento registrato per la temperatura superficiale, sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (23 febbraio) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00. In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è di 23,6°C e dell'umidità è 30%, mentre essendo chiuse le finestre il valore medio della velocità dell'aria è nullo. Per il periodo considerato, si è considerata la resistenza dell'abbigliamento tipica invernale, 1 clo, e un'attività metabolica d'ufficio pari a 1,2 met.

Globalmente tali condizioni del microclima sono contenute nel range di comfort, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari a 6,9%, mentre il limite massimo che la normativa vigente stabilisce per tale indice è pari a 10%. Il valore dell'indice di voto medio previsto risulta pari a 0,3.

Per quanto riguarda invece il livello di illuminamento dell'ambiente in oggetto, questo è stato analizzato con riferimento alla posizione dell'occupante seduto ad una delle due scrivanie presenti. Per ciascun punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m) con un tempo di acquisizione di 10 minuti. La misura è stata effettuata a circa 72 cm di altezza, e in riferimento a due posizioni:

- 1) scrivania destra (*Figura 2.30*);
- 2) scrivania sinistra (*Figura 2.31*);

nelle seguenti condizioni di misura:

- Desk 1: misura nella postazione individuata avendo aperto le tende utilizzate per oscurare il componente finestrato, e avendo spento il sistema di illuminazione;
- Desk 2: misura nella postazione individuata avendo chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 2 lampade fluorescenti (2x58W).
- Desk 3: misura nella postazione individuata avendo chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 2 lampade fluorescenti (2x58W) e la lampada da scrivania.



Posizione 1	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	395	51	394
Desk 3	640	520	622

Figura 2. 30: Ufficio 8: misura di illuminamento scrivania destra, desk 1 (22/03/2017).



Posizione 2	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	113	88	102
Desk 2	299	249	293

Figura 2. 31: Ufficio 8: misura di illuminamento scrivania sinistra, desk 2 (22/03/2017).

Considerando, per gli ambienti ad uso ufficio, accettabile un livello di illuminamento pari a 300-500Lux, si osserva che l'illuminazione naturale è sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista per l'occupante nella *posizione 1* ma, assolutamente non sufficiente per quello posto in corrispondenza della *posizione 2*. Anche l'illuminazione artificiale, in condizioni di cielo coperto o avendo attivato i sistemi schermanti, non consente, per la *posizione 2*, di garantire valori adeguati di illuminamento.

AULA SE 5

L'ambiente in considerazione, (Figura 2.32) è un'aula al piano terra con 50 posti a sedere, la cui climatizzazione invernale è garantita da un radiatore e da due bocchette di immissione dell'aria. Al momento in cui sono state effettuate le misure l'aula è stata occupata in modo saltuario per le lezioni.

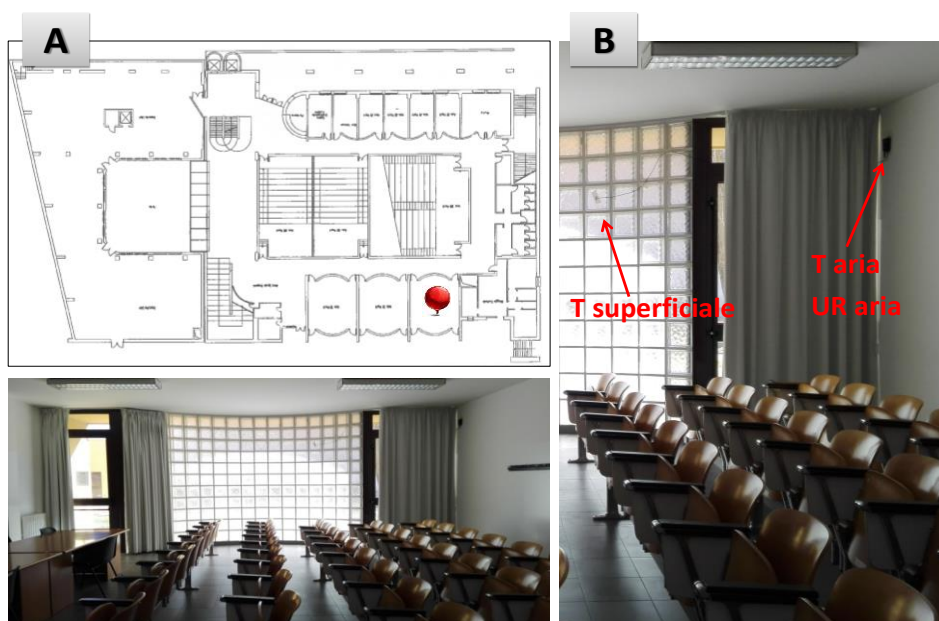


Figura 2. 32: Aula SE 5: a) posizione; b) sensori di temperatura e umidità in opera (22Febbraio-1Marzo).

L'aula presenta una parete esterna completamente finestrata, schermata interamente, dall'interno, da una tenda apribile bianca.

Data la peculiarità di tale ambiente si è ritenuto di particolare interesse anche il monitoraggio della temperatura superficiale della parte d'involucro trasparente, come indicato nella *Figura 2.32B*.

Inoltre la termografia riportata nell'immagine seguente (*Figura 2.33*) mostra come la parete in vetrocemento sia caratterizzata da elevati valori di temperatura superficiale, e quindi forti dispersioni termiche verso l'ambiente esterno.



Figura 2. 33: Immagine IR e fotografica del prospetto Sub-Est: particolare parete esterna in vetrocemento.

L'andamento della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (22/0-1/03) sono riportati nelle due figure seguenti (*Figura 2.34* e *Figura 2.35*), in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare come il valore di temperatura dell'aria sia decisamente superiore a 20°C, e in alcuni giorni raggiunga anche 26 °C nelle ore di massima irradiazione esterna, mentre il valore dell'umidità relativa si mantiene tendenzialmente più basso della soglia ottimale del 50%, presentando valori minimi pari al 23%.

Durante il fine settimana si ha una riduzione della temperatura; tuttavia, osservando gli andamenti monitorati, ad esempio della domenica (26/02), la temperatura che durante la notte è scesa anche sotto i 20°C, risale per effetto dei guadagni solari fino ad un valore ampiamente compreso nell'intervallo di comfort.

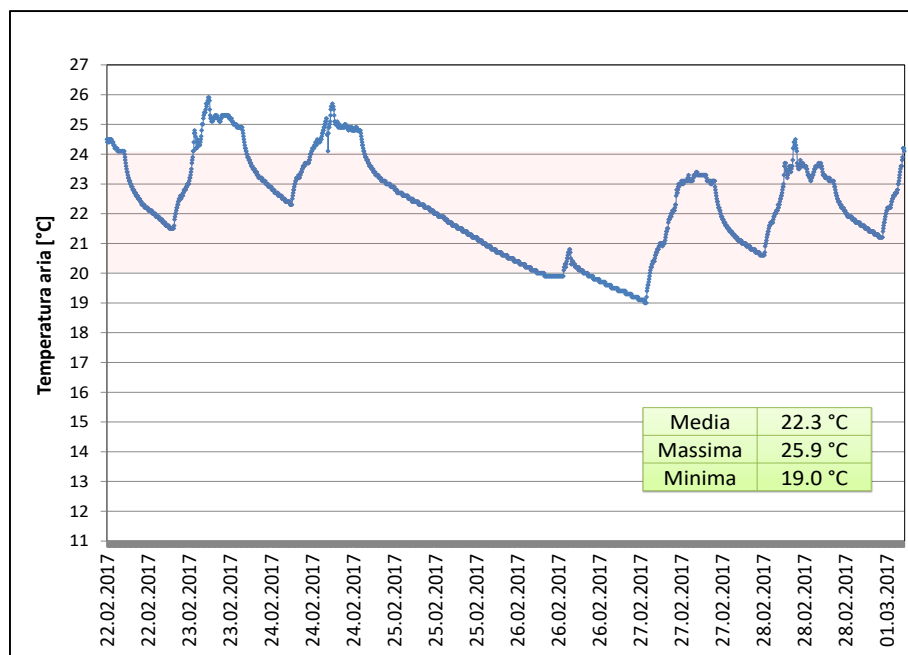


Figura 2. 34: Aula SE 5: andamento della temperatura interna, 22Febbraio-1Marzo.

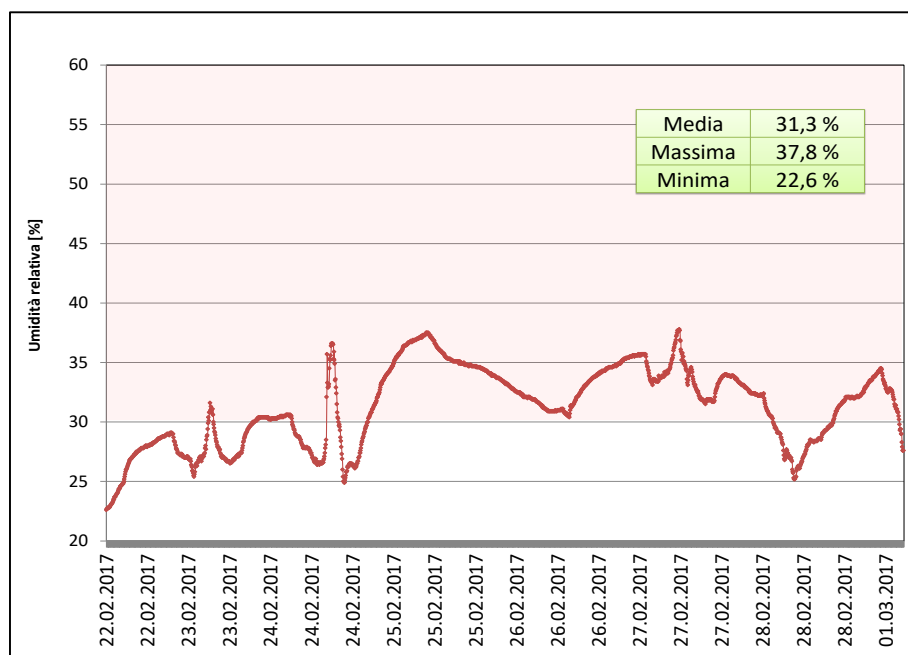


Figura 2. 35: Aula SE 5: andamento dell'umidità interna, 22Febbraio-1Marzo.

In tale ambiente, considerando l'esposizione particolarmente favorevole per i guadagni solari, per particolari condizioni l'impianto di riscaldamento potrebbe anche essere spento. In questo caso si sottolinea la necessità di un sistema di termoregolazione ambiente che potrebbe non solo determinare notevoli risparmi energetici ma condizioni di confort idonee alla stagione analizzata. D'altro canto, risulta necessario il controllo del carico latente, poiché il livello di umidità in ambiente è troppo basso.

La figura seguente (Figura 2.36) riporta il valore della temperatura superficiale della parete in vetrocemento. L'andamento è fortemente oscillante durante il periodo di accensione dell'impianto e di circa 1-2°C superiore al valore della temperatura dell'aria. Durante la notte, la temperatura si riduce di circa 6°C, mentre osservando l'andamento della grandezza durante il fine settimana è ancora più evidente l'incremento di temperatura che si ottiene per effetto dell'irradiazione solare.

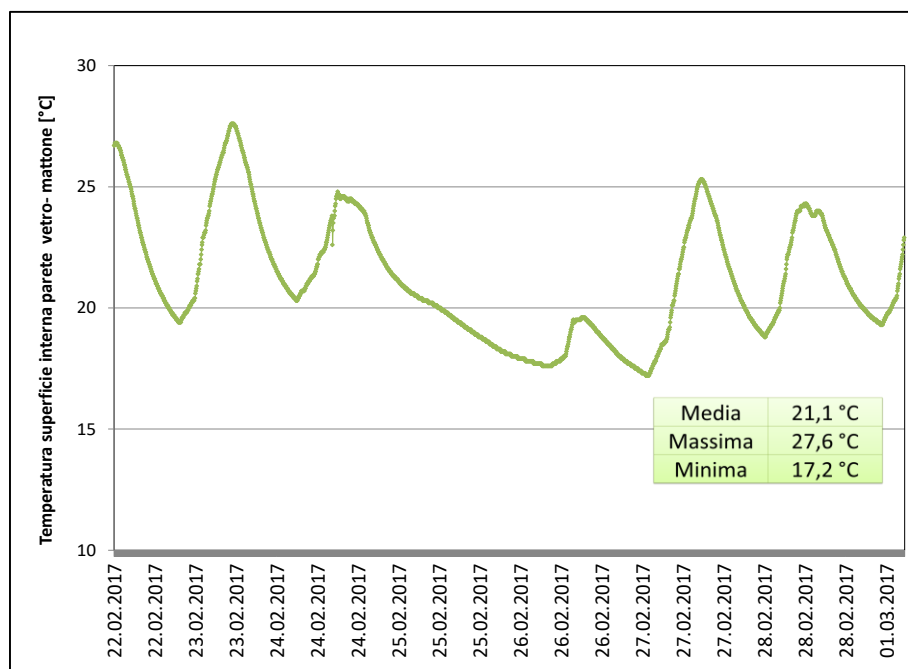


Figura 2. 36: Aula SE 5: andamento della temperatura superficiale della parete esterna in vetrocemento 22Febbraio-1Marzo.

Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore a quella dell'aria, cosa verosimile in ambiente moderato e considerando l'andamento registrato per la temperatura superficiale, sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (23 febbraio) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00. In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è di 25°C e dell'umidità è 27,5%, mentre essendo chiuse le finestre il valore medio della velocità dell'aria è nullo. Per il periodo considerato, si è considerata la tipica resistenza dell'abbigliamento tipica invernale, 1 clo, e un'attività metabolica d'ufficio pari a 1,2 met.

Globalmente tali condizioni del microclima non sono assolutamente contenute nel range di comfort e la percentuale prevista di insoddisfatti è pari a 12,5%, mentre il limite che la normativa vigente stabilisce per tale indice è pari a 10%. Il valore di PMV risulta essere pari a 0,6.

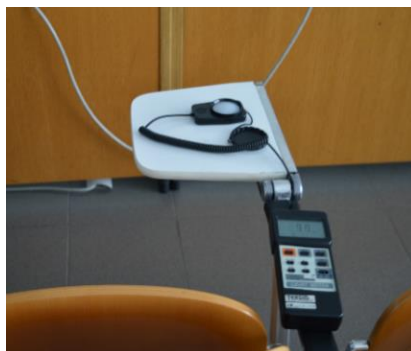
Per quanto riguarda le misure di illuminamento in ambiente, per ciascun punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m) con un tempo di acquisizione di 10 minuti. L'illuminamento dell'ambiente in oggetto è stato analizzato con riferimento a due posizioni:

1) si è considerato uno studente seduto al centro della prima fila (*Figura 2.37*), con un'altezza da terra del sensore pari a 70 cm;

2) lo strumento è stato posizionato al centro della scrivania (*Figura 2.38*), ad altezza da terra circa pari a 70 cm.

Per quanto riguarda le condizioni in cui vengono effettuate le misure, si ha:

- Desk 1: misura sulla postazione individuata avendo aperto le tende in tessuto chiaro utilizzate per oscurare la parete vetrata, e avendo spento il sistema di illuminazione costituito da 6 punti luce (2x58W);
- Desk 2: misura sulla postazione individuata avendo chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 6 lampade fluorescenti (2x32W).



Posizione 1	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	77	39	43
Desk 2	482	260	479

Figura 2. 37: Aula 5: misura di illuminamento, posizione studente in prima fila, Desk 1 (25/01/2017).



Posizione 2	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	541	450	514

Figura 2. 38: Aula 5: misura di illuminamento, posizione sensore sulla scrivania, Desk 1 (22/03/2017).

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto per le aule ma anche quello per le sale lettura della UNI EN 12464-1, il livello ottimale è tra 300-500 Lux. Si vede che, nella prima posizione l'illuminazione naturale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista. Mentre

l'illuminazione artificiale, consente di garantire adeguati valori di illuminamento anche in condizioni di cielo coperto e avendo attivato i sistemi schermanti; si garantiscono quindi sempre buone condizioni di comfort visivo.

Per quanto riguarda la seconda posizione, l'illuminazione naturale risulta essere ampiamente sufficiente a garantire il livello di illuminamento per lo svolgimento dell'attività prevista; ma bisogna ovviamente considerare che la giornata del 23/03/2017, durante la quale è stata effettuata tale misura, presentava delle condizioni atmosferiche particolarmente favorevoli in termini di illuminazione naturale.

AULA 8

L'ambiente in considerazione, (Figura 2.39) è un'aula al piano terra con 100 posti a sedere e caratterizzata dalla totale assenza di componenti finestrati. L'ambiente è servito da un impianto a tutt'aria che provvede alla climatizzazione sia estiva che invernale e al momento in cui sono state effettuate le misure è stato occupato in modo saltuario per le lezioni.

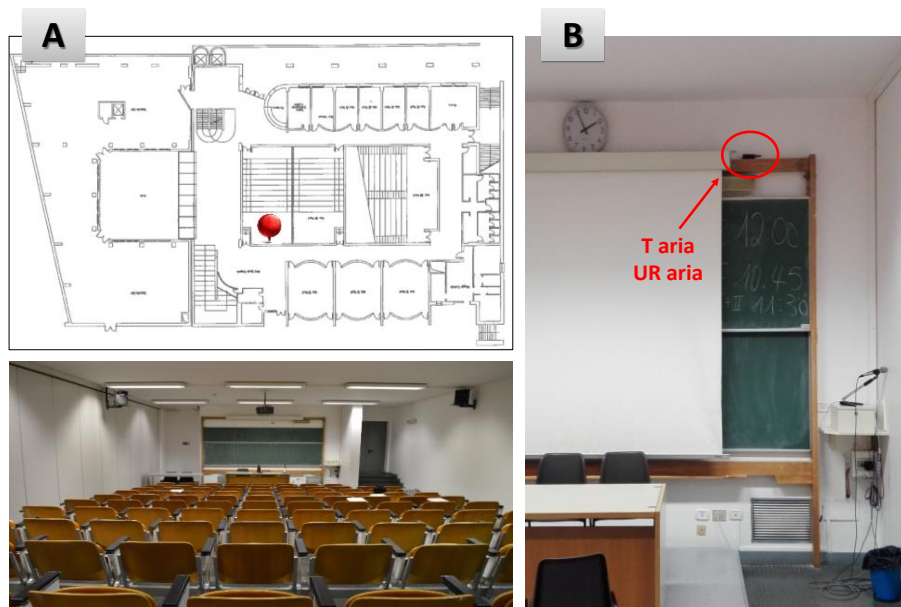


Figura 2. 39: Aula 8: a) posizione; b) sensore di temperatura e umidità in opera (22Febbraio-1Marzo).

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (22/02 – 1/03) è riportato nelle due figure seguenti (Figura 2.40 e Figura 2.41) in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor e il valore medio, massimo e minimo.

Il monitoraggio ha consentito di rilevare che spesso il valore di temperatura dell'aria sale oltre i 22°C con un valore massimo quasi pari a 25°C. Durante la notte invece, si vede che la temperatura decresce, fino a

raggiungere, a volte, circa 19°C, nel periodo oggetto di monitoraggio. D'altro canto il valore di umidità relativa si mantiene in media intorno al 29%, lontano quindi dal 50% ritenuto ottimale.

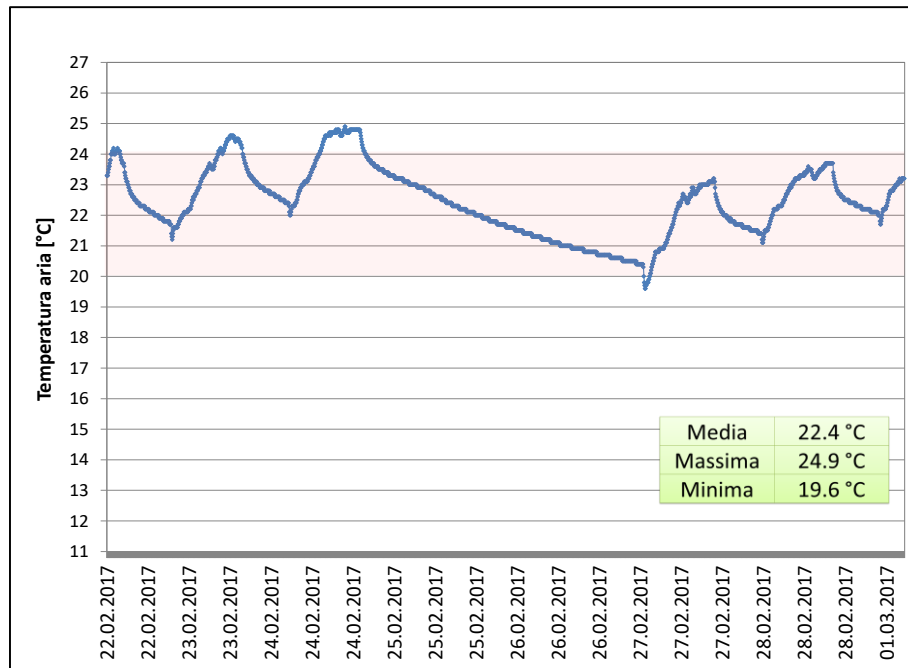


Figura 2. 40: Aula 8: andamento della temperatura interna 22 Febbraio-1 Marzo.

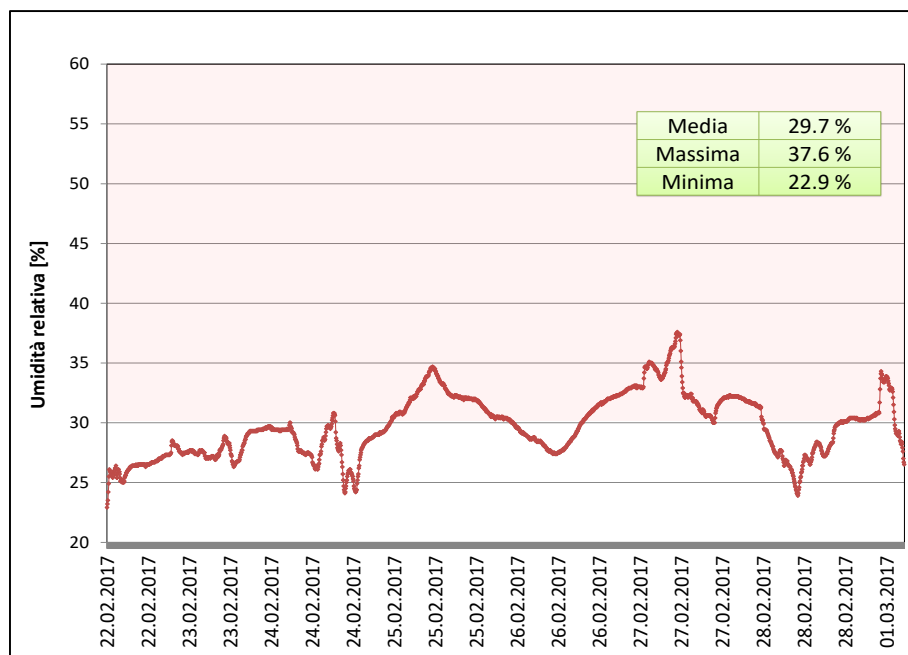


Figura 2. 41: Aula 8: andamento dell'umidità relativa interna 22 Febbraio-1 Marzo.

Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore alla temperatura dell'aria, cosa verosimile in ambiente moderato, sono stati calcolati gli indici per un giornata tipo (23 febbraio) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00. In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è di 23,7°C e

dell'umidità è 27,4%. Per il periodo in esame, si è considerata la resistenza dell'abbigliamento tipica invernale, 1clo, e un'attività metabolica d'ufficio pari a 1,2met.

Globalmente risulta che tali condizioni del microclima sono contenute nel range di comfort e la percentuale prevista di insoddisfatti è circa 6,9%, mentre il limite previsto dalla norma per tale indice è pari a 10%. Il voto medio previsto risulta pari a 0,3.

Per quanto riguarda invece la misura di illuminamento, per ciascun punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m) con un tempo di acquisizione pari a 10 minuti. L'illuminamento dell'ambiente in oggetto è stato analizzato con riferimento a due posizioni:

- 1) si è considerato uno studente seduto al centro dell'ottava fila, per cui il sensore è stato posizionato sulla ribaltina a circa 67cm di altezza (Figura 2.42);
- 2) lo strumento è stato posizionato al centro della cattedra (Figura 2.43), all'altezza di circa 84cm.

Per quanto riguarda invece le condizioni in cui vengono effettuate le misure, si ha in questo caso una sola condizione (essendo l'aula priva di componenti finestrati e quindi di apporti di luce naturale):

- Desk 2: misura sulla postazione individuata avendo acceso il sistema di illuminazione costituito da 12 punti luce (2x58W).



Posizione 1	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 2	477	154	471

Figura 2. 42: Figura 3. 45: Aula 8: misura di illuminamento, posizione 1, Desk 2.



Posizione 2	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 2	343	330	342

Figura 2. 43: Aula 8: misure di illuminamento, posizione 2, Desk 2.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto per le aule ma anche quello per le sale lettura della UNI EN 12464-1, il livello ottimale è tra 300-500 Lux. Si vede che, in entrambe le posizioni l'illuminazione artificiale è pertanto, sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista.

UFFICIO NO RA

L'ambiente considerato (*Figura 2.44*), è l'ufficio del responsabile amministrativo dell'università, caratterizzato dalla presenza di un'ampia finestra schermata internamente da tende a lamelle in tessuto chiaro. Durante il periodo di monitoraggio l'ufficio è stato caratterizzato da un'occupazione pressoché costante durante le ore lavorative; e il condizionamento invernale di tale ambiente avviene grazie ad un radiatore e all'immissione di aria attraverso un'apposita bocchetta.

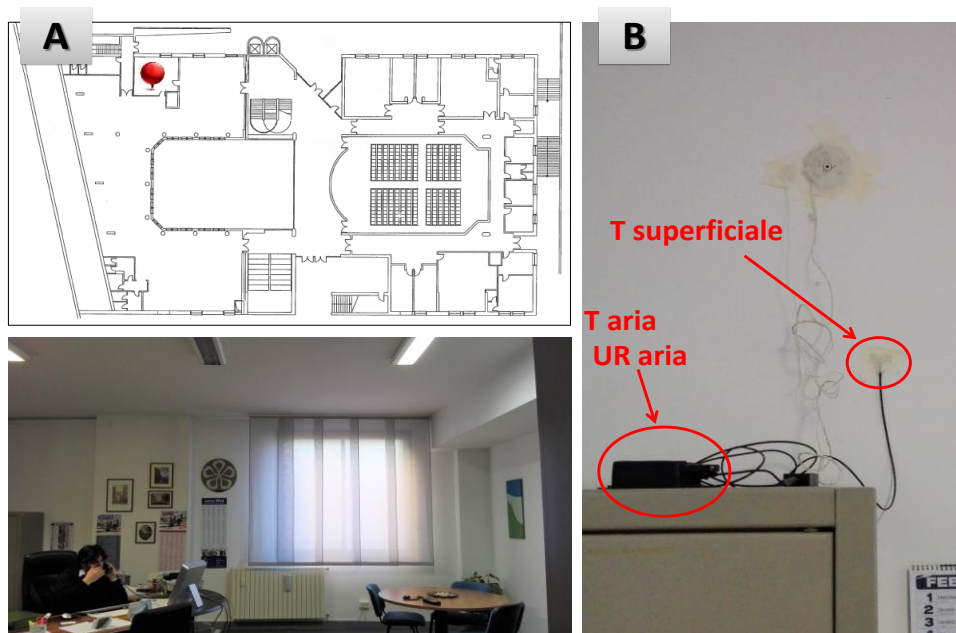


Figura 2. 44: Ufficio Responsabile Amministrativo: a) posizione; b) sensori temperatura e umidità in opera (22Febbraio-1Marzo).

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (22/02 – 1/03) è riportato nelle due figure seguenti (*Figura 2.45* e *Figura 2.46*), in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor e il valore medio, massimo e minimo.

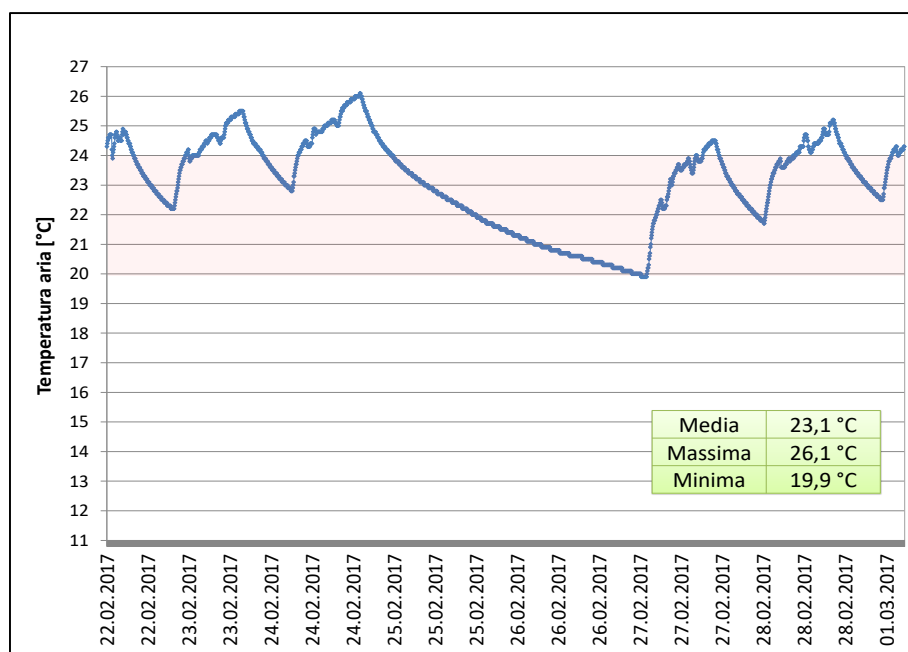


Figura 2. 45: Ufficio NO RA: andamento della temperatura interna 22Febbraio-1Marzo.

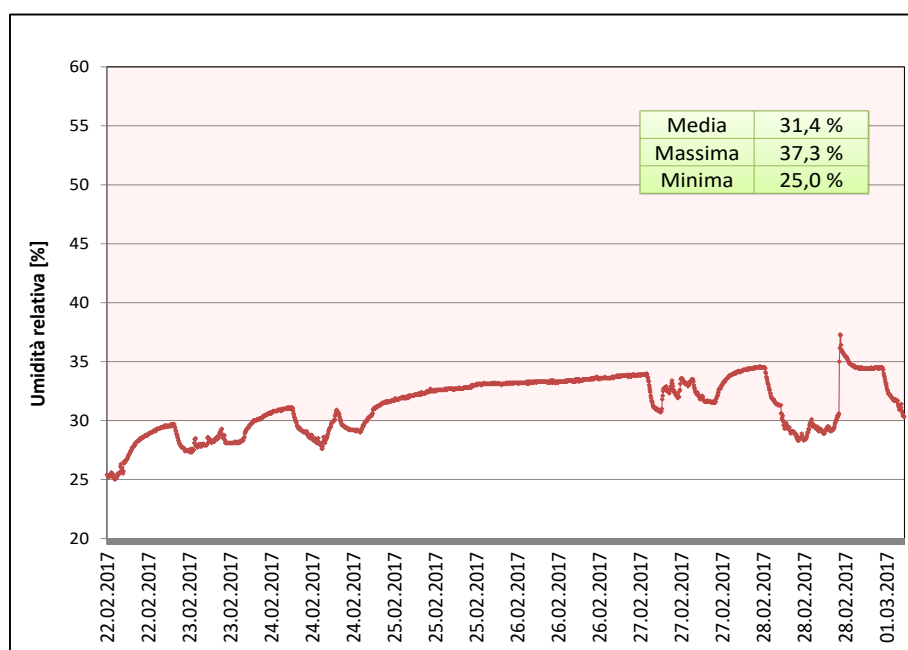


Figura 2. 46: Ufficio NO RA: andamento dell'umidità relativa interna 22Febbraio-1Marzo.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari 23,1 °C, con un valore massimo intorno a 26,1 °C. La temperatura interna, quindi, supera anche di 6°C il valore della temperatura di set-point indicato dalle normative vigenti (20°C) sul risparmio energetico. Il valore dell'umidità relativa d'altro canto si mantiene al di sotto della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente intorno ad un valore pari a 31%.

In tale ambiente, è stata monitorata anche la temperatura superficiale, per la parete esterna, ovvero sulla parete adiacente la finestra. Come si vede dall'andamento riportato in *Figura 2.47*, la temperatura superficiale segue l'andamento della temperatura dell'aria, e i valori registrati durante l'intervallo di

campionamento, differiscono di circa 1°C dai valori della temperatura dell'aria. Non si registrano quindi particolari fenomeni di disuniformità della temperatura.

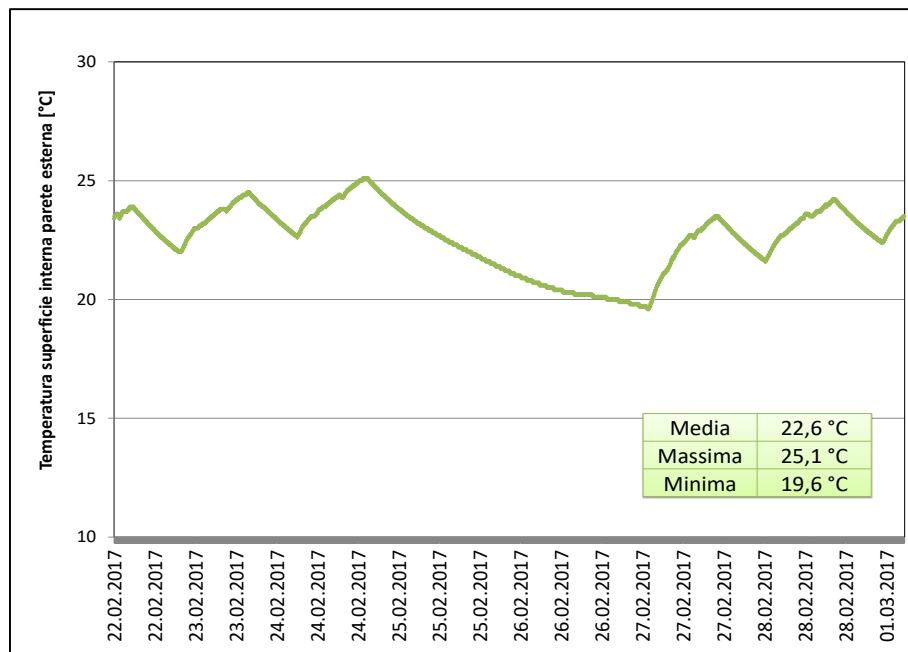


Figura 2. 47: Ufficio NO RA: andamento temperatura superficiale 22Febbraio-1Marzo.

Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante coincidente con la temperatura superficiale monitorata, cosa verosimile in ambiente moderato e considerando l'andamento registrato per le due temperature; sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (23 febbraio) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

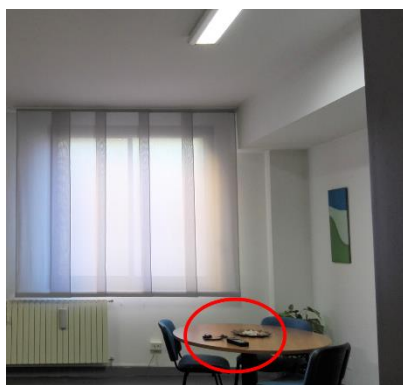
In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 24,7°C, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore rispetto a quella dell'aria, cosa verosimile in un ambiente moderato. Considerando inoltre il valore medio dell'umidità pari a 28,2%, ed essendo chiuse le finestre il valore medio della velocità dell'aria è nullo. Per il periodo considerato, si è considerata la resistenza convenzionale dell'abbigliamento invernale, 1 clo, e un'attività metabolica d'ufficio pari a 1,2met. Globalmente tali condizioni del microclima sono ampiamente contenute nel range di comfort previsto dalla normativa vigente, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 12,5%, mentre il valore limite previsto dalla normativa vigente per tale indice è pari a 10%. In questo caso, l'indice PMV risulta essere pari a 0,6.

Per quanto riguarda invece l'illuminamento dell'ambiente in oggetto, esso è stato analizzato in corrispondenza del tavolino posto di fronte alla scrivania di lavoro, per non interferire con le attività lavorative che si stavano svolgendo al momento della misura.

L'altezza a cui è stata fatta la misura è di circa 72 cm, ed per il punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m), con un tempo di acquisizione di 10 minuti.

Il giorno in cui è stata effettuata la misura (22/03/2017), le condizioni esterne erano di cielo sereno, ed è stata effettuata nella condizione che abitualmente sussiste all'interno dell'ambiente, come indicato dall'occupante (*Figura 2.48*):

- Desk 4: misura sulla posizione individuata con tende a lamelle bianche chiuse e avendo parzialmente acceso il sistema di illuminazione consistente in tre lampade fluorescenti (2x58W), in particolare due dei tre punti luce erano in funzione.



Posizione	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 4	253	249	251

Figura 2. 48: Ufficio RA NO: misura di illuminamento (22/03/2017). Indicazione posizione dello strumento di misura.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto per gli uffici, ma anche aule e sale lettura della UNI EN 12464-1, il livello ottimale è tra 300-500 Lux, si vede che la tipica configurazione adottata non consente di garantire adeguati valori di illuminamento. Tuttavia in tale specifico caso, bisogna considerare altri fattori, tra i quali il fatto che nell'ambiente è presente un altro punto luce spento, per volere specificatamente espresso dall'unico occupante del presente ufficio.

ATRIO-STUDIO

L'ambiente in considerazione (*Figura 2.49*) è un'ampia zona di passaggio su più livelli costeggiata dalla parete vetrata che affaccia sul cortile interno dell'edificio; esso è caratterizzato dal fatto che risulta essere un unico alto ambiente che si sviluppa sui tre piani interni dell'edificio. Inoltre la parte centrale dell'ambiente sotto la parete vetrata inclinata, è adibita ad aula studio.

Essenzialmente, tale ambiente è caratterizzato dalla presenza di 6 radiatori in ghisa, dall'ampia parete vetrata priva di un sistema di schermatura; e durante il periodo di monitoraggio (22febbraio-1marzo) è stato caratterizzato da un'occupazione saltuaria legata alla attività svoltesi all'interno dell'edificio.

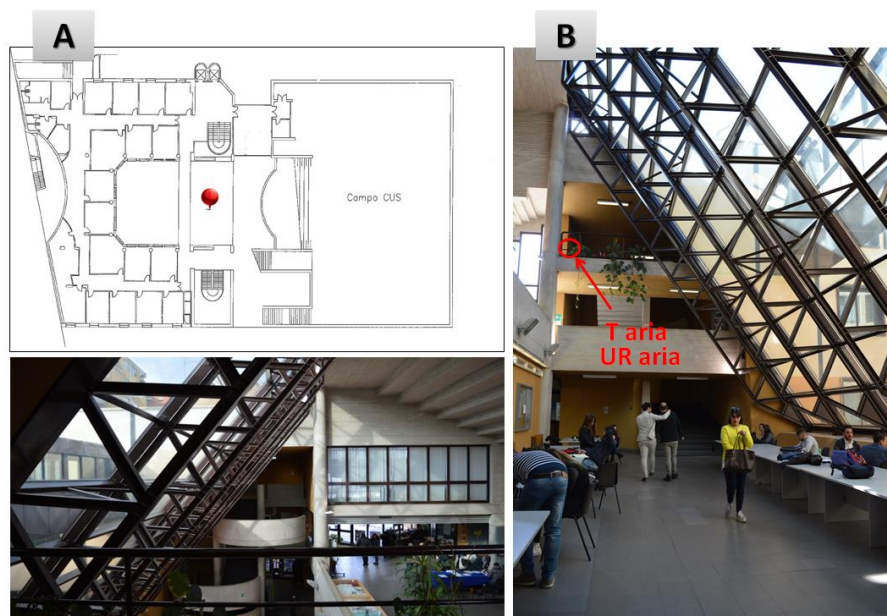


Figura 2. 49: Atrio-studio: piano 0; a) posizione; b) sensore di temperatura e umidità in opera (22 Febbraio-1Marzo).

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio è riportato nelle due figure seguenti (Figura 2.50 e Figura 2.51) in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor, e il valore medio, massimo e minimo delle misure.

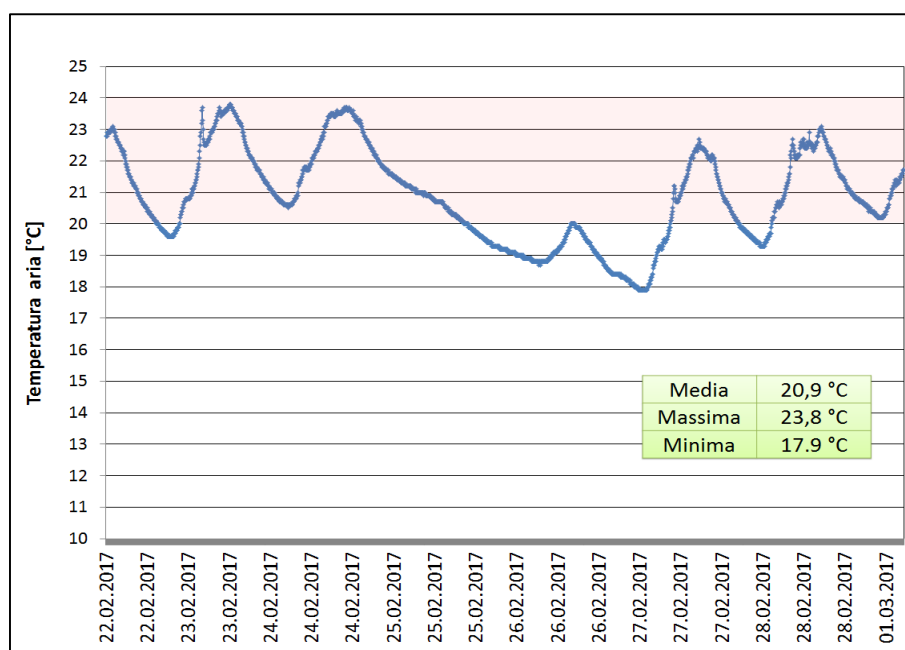


Figura 2. 50: Atrio-studio: andamento della temperatura interna (22Febbraio-1Marzo).

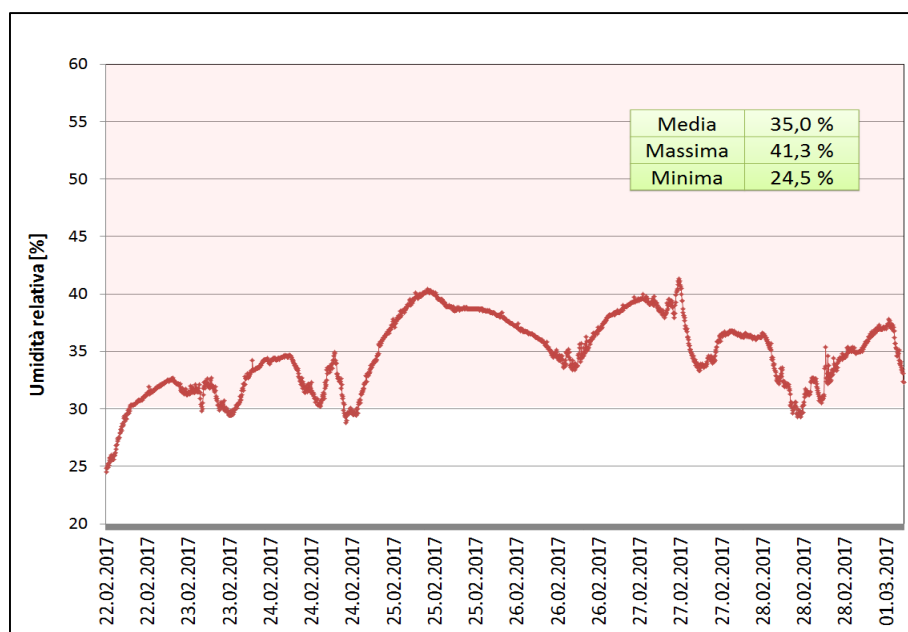


Figura 2. 51: Atrio-studio: andamento umidità relativa (22Febbraio-1Marzo).

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che anche in questo caso il valore di temperatura dell'aria supera talvolta il valore di 20°C, ma la temperatura si mantiene generalmente più bassa rispetto a quanto riscontrato negli ambienti fin ora analizzati, con valore massimo intorno a 23°C, mentre altrove si registrano picchi di temperatura anche di 25°C. Tale differenza si può pensare sia causata dal fatto che l'ambiente in questione presenta un notevole volume da climatizzare ed è caratterizzato dalla presenza della parete vetrata che in quanto componente finestrato comporta maggiori dispersioni termiche rispetto ai componenti opachi. Durante il fine settimana, si vede che la temperatura decresce fino a 18°C e che gli apporti gratuiti, a differenza di quanto avviene negli ambienti che presentano una parete in vetrocemento, non riescono a stabilire all'interno dell'ambiente le idonee condizioni di comfort previste dalla normativa vigente, presumibilmente anche a causa di una diversa esposizione. Il valore dell'umidità relativa si mantiene tendenzialmente più basso della soglia 50% ritenuta ottimale e presenta un andamento fortemente variabile durante il periodo di monitoraggio, con un valor medio pari al 35%, un minimo circa pari al 24% e un massimo circa del 41%.

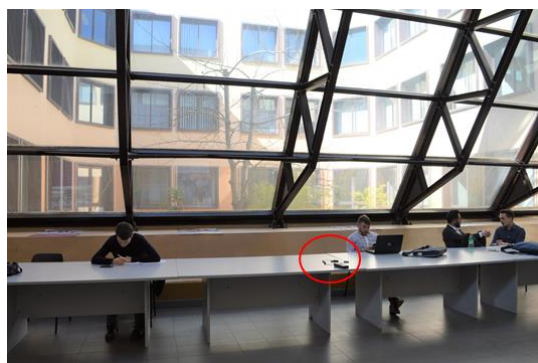
Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort nell'ambiente in esame, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore a quella dell'aria, cosa verosimile in ambiente moderato, sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (23 febbraio) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00. In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria nell'ambiente considerato è pari a 22,9°C e dell'umidità è pari al 30,9%, mentre essendo chiuse le finestre il valore medio della velocità dell'aria è nullo. Per il periodo considerato, si è considerata la massima resistenza dell'abbigliamento tipica invernale, 1clo, e un'attività metabolica d'ufficio pari a 1,2 met. Globalmente tali condizioni del microclima sono ampiamente contenute nel range di comfort, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 5,8%, mentre il voto medio previsto si attesta pari a 0,2.

Per quanto riguarda invece il di illuminamento nell'ambiente in considerazione, esso è stato analizzato in corrispondenza della zona al piano terra adibita ad aula studio e in particolare in due posizioni:

- 1) scrivania lato parete vetrata (*Figura 2.52*)
- 2) scrivania lato parete opaca (*Figura 2.53*)

L'altezza a cui sono state effettuate le misure è di circa 72 cm, e per ciascun punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m) con un tempo di acquisizione di 10 minuti. Nel giorno di riferimento (22/03/2017) le condizioni esterne erano di cielo sereno e le misure sono state effettuate tra le 10:15 e le 10:30 del mattino nella seguente condizione:

- Desk 5: i 4 faretti presenti nella zona risultavano spenti mentre i 12 neon erano accesi; tuttavia il loro contributo in termini di illuminamento sembrerebbe irrisorio rispetto al contributo dato dall'illuminazione naturale (parete vetrata priva di sistemi di schermatura).



Posizione 1	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 5	669	619	665

Figura 2. 52: Atrio-studio: piano 0; indicazione misura di illuminamento posizione 1; Desk 5.



Posizione 1	I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 5	669	619	665

Figura 2. 53: Atrio-studio: piano 0; misura di illuminamento posizione 2; Desk5.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto per le sale lettura della UNI EN 12464-1, il livello ottimale è tra 300-500 Lux, pertanto, confrontando tale valore con quelli misurati in loco,

si vede che nell'ambiente considerato, l'illuminazione naturale è ampiamente sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista. Tuttavia date le condizioni climatiche esterne particolarmente favorevoli, non è stato possibile verificare se l'illuminazione artificiale consente di garantire adeguati valori di illuminamento in condizioni di cielo coperto.

AULA 10

L'ambiente (Figura 2.54) è un'aula al secondo piano con 22 posti a sedere; per la climatizzazione invernale è servita da un ventilconvettore e non sono presenti sistemi per il rinnovo dell'aria. Al momento in cui sono state effettuate le misure l'aula è stata occupata in modo saltuario per lezioni ed esami.

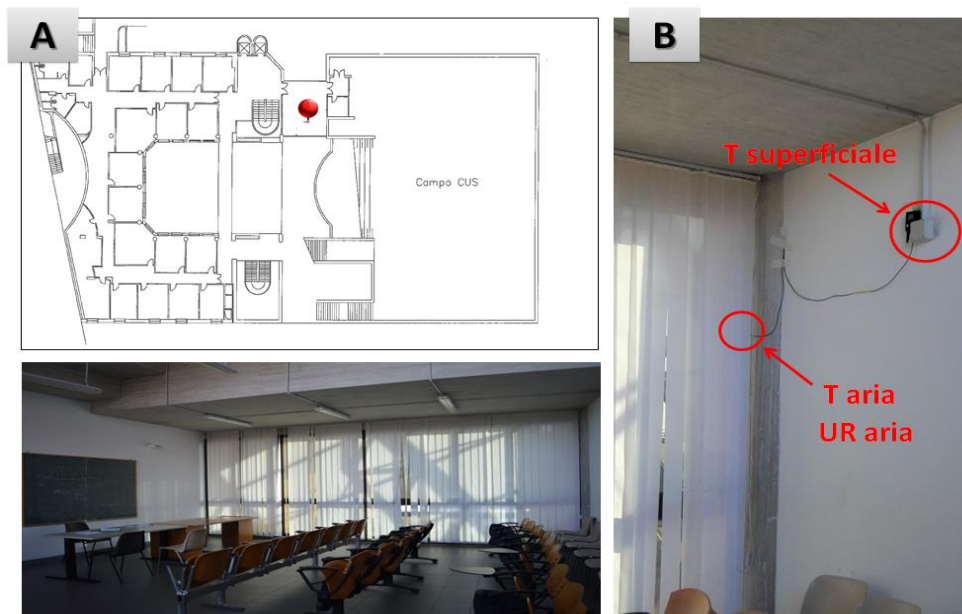


Figura 2. 54: Aula 10: a) posizione; b) sensori di temperatura e umidità in opera (22Febbraio-1Marzo).

L'aula scelta è caratterizzata da due pareti completamente finestate, una verso l'esterno e l'altra verso l'interno dell'edificio; e solo quest'ultima è schermata dall'interno con un sistema di tende a lamelle bianche. In questa stanza si è ritenuto di particolare interesse anche il monitoraggio della temperatura superficiale della parte d'involucro trasparente.

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (22/01 – 30/03) è riportato nelle due figure seguenti (Figura 2.55 e Figura 2.56) in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor.

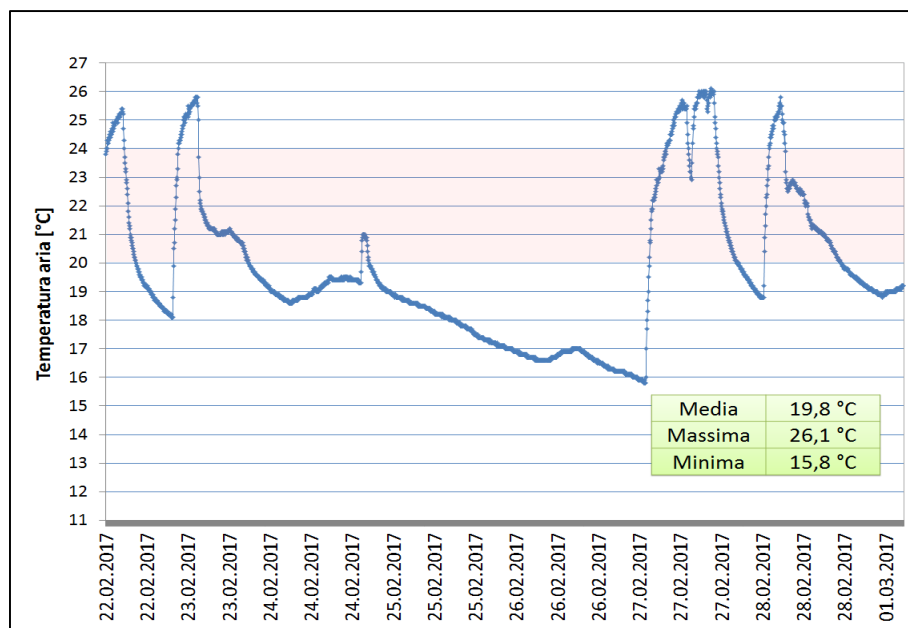


Figura 2. 55: Aula 10: andamento della temperatura interna (22Febbraio-Marzo).

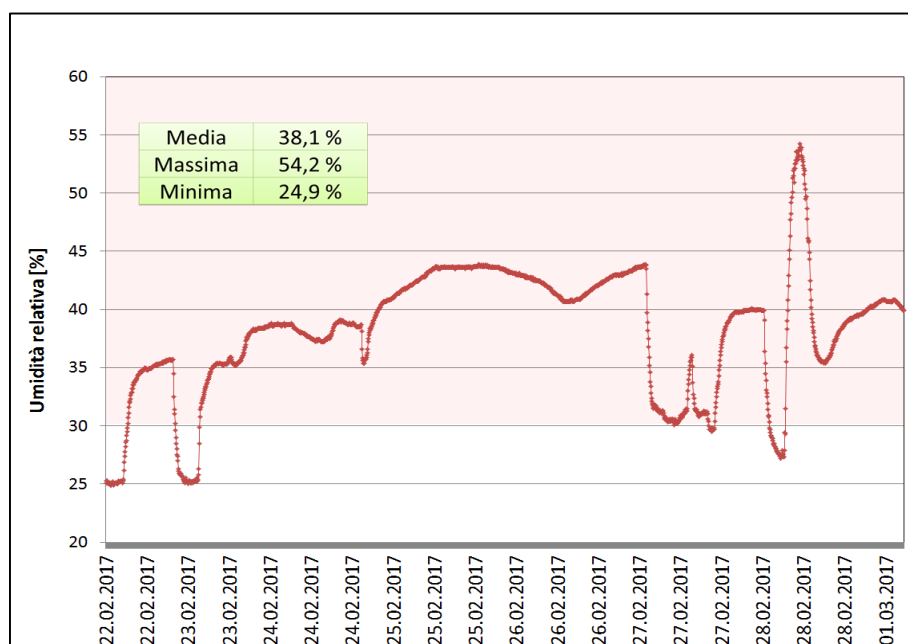


Figura 2. 56: Aula 10: andamento dell'umidità interna (22Febbraio-1Marzo).

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore della temperatura è fortemente oscillante, in quanto spesso è decisamente superiore ai 20°C ritenuti idonei dalla normativa vigente, con picchi fino ai 26°C e valori minimi raggiunti nelle ore notturne anche intorno ai 15°C. Anche il valore dell'umidità è abbastanza oscillante, ma comunque si mantiene tendenzialmente più basso della soglia 50% ritenuta ottimale, attestandosi mediamente intorno al 38% con dei valori minimi del 25% circa.

Durante il fine settimana la temperatura interna scende fino a raggiungere circa i 16°C per poi risalire una volta riaccesi gli impianti.

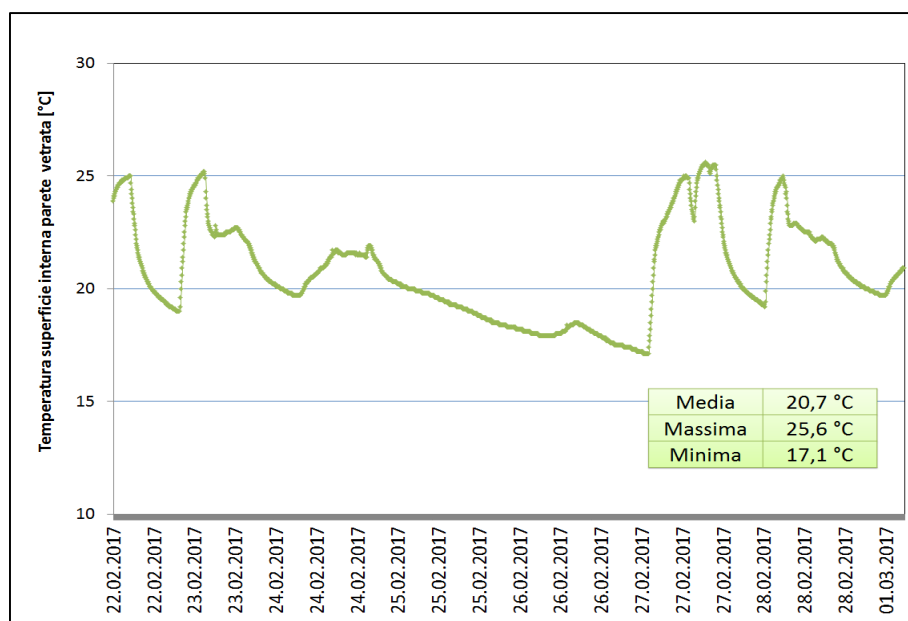


Figura 2. 57: Aula 10: andamento temperatura superficiale parete vetrata interna (22Febbraio-1Marzo).

La Figura 2.57 invece, riporta l'andamento della temperatura superficiale della parete vetrata interna, che mostra lo stesso andamento della temperatura interna; pertanto l'ambiente presenta un andamento pressappoco uniforme della temperatura almeno sul lato interno dello stesso, essendo la misura della temperatura superficiale eseguita solo per la parete vetrata interna.

Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore alla temperatura interna, cosa verosimile in ambiente moderato, sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (23 febbraio) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00. In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è di 22,1°C e dell'umidità è 32,8%, mentre essendo chiuse le finestre il valore medio della velocità dell'aria è nullo. Per il periodo considerato, si è considerata la massima resistenza dell'abbigliamento tipica invernale, 1 clo, e un'attività metabolica d'ufficio pari a 1,2met. Globalmente tali condizioni del microclima sono ampiamente contenute nel range di comfort e la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 5%. In questo caso il PMV risulta nullo.

Analizzando i risultati ottenuti attraverso il monitoraggio di temperatura e umidità relativa per gli ambienti sopra citati, due sono le conclusioni che si possono principalmente trarre:

- la temperatura interna supera, a seconda dei casi, anche dai 3 ai 5°C il valore della temperatura di set-point indicata dalle normative vigenti (20°C) sul risparmio energetico; questo è dovuto al fatto che essendo presente solo una regolazione centrale basata sulla temperatura dei fluidi termovettori, non è possibile adeguare localmente il funzionamento dei sistemi di emissione in funzione delle reali

condizioni che si verificano all'interno dell'ambiente. Dall'altra parte i picchi di temperatura si registrano nelle ore centrali della giornata quando i guadagni solari contribuiscono positivamente.

- il carico latente non risulta bilanciato; l'impianto attualmente in funzione infatti consente di controllare il solo carico sensibile, poiché è stato riscontrato dai sopralluoghi effettuati che l'umidificatore non è in funzione.

Elaborazione del monitoraggio del livello di illuminamento

Di seguito sono presentate le misure di illuminamento con riferimento ai singoli ambienti riportati nella *Figura 2.22*.

AULA 4

L'ambiente in esame (*Figura 2.58*) è un'aula al piano terra con 40 posti a sedere ed esposizione nord-ovest; per la climatizzazione invernale è servita da due radiatori in ghisa e da due bocchette di immissione dell'aria. L'illuminamento dell'ambiente in oggetto è stato analizzato con riferimento alla posizione occupata da uno studente seduto al centro della seconda fila. Per ciascun punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m), con un tempo di acquisizione di 10 minuti. L'altezza a cui è stata fatta la misura è di circa 68 cm.

- Desk 2: misura sulla postazione individuata avendo chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 6 lampade fluorescenti (2x32W).

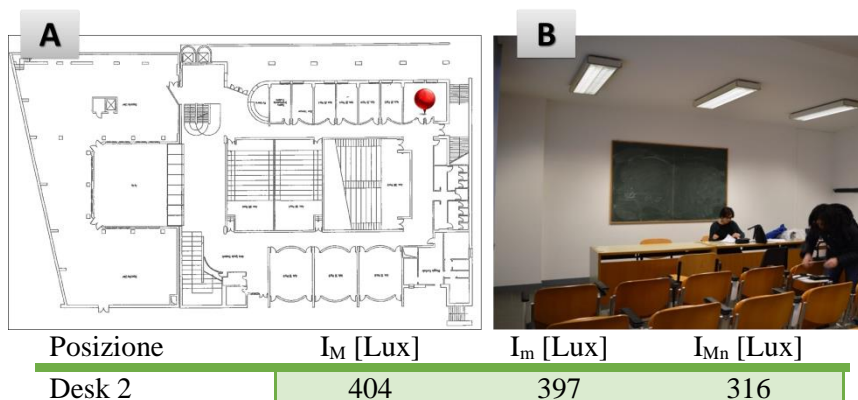


Figura 2. 58: Aula 4: misura di illuminamento a) posizione aula; b) misura di illuminamento in opera (25/01/2017).

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto per le aule ma anche quello per le sale lettura della UNI EN 12464-1, il livello ottimale è tra 300-500 Lux, si vede che l'illuminazione consente sicuramente di garantire adeguati valori di illuminamento per lo svolgimento dell'attività prevista anche in condizioni di cielo coperto e avendo attivato i sistemi schermanti.

AULA MAGNA

L'ambiente in esame (Figura 2.59) è l'aula magna della struttura che si sviluppa tra il piano terra e il primo piano, nella parte centrale dell'immobile; non presenta componenti finestrati e come già detto in precedenza è servito da un impianto a tutt'aria, infatti è dotato di 6 bocchette di immissione dell'aria condizionata e 4 griglie di estrazione.

L'illuminamento di tale ambiente è stato analizzato attraverso una misura che prevedeva il sensore posto al centro della cattedra ad un'altezza di circa 90 cm. Al solito per ciascun punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m), per un tempo di acquisizione di 10 minuti. Per quanto riguarda le condizioni in cui è stata eseguita la misura:

- Desk 2: misura sulla postazione individuata avendo chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 18 lampade fluorescenti (2x32W) accese e 5 faretti spenti, che essendo comunque molto lontani dal punto in cui è stata effettuata la misura non avrebbero comunque apportato un contributo significativo.

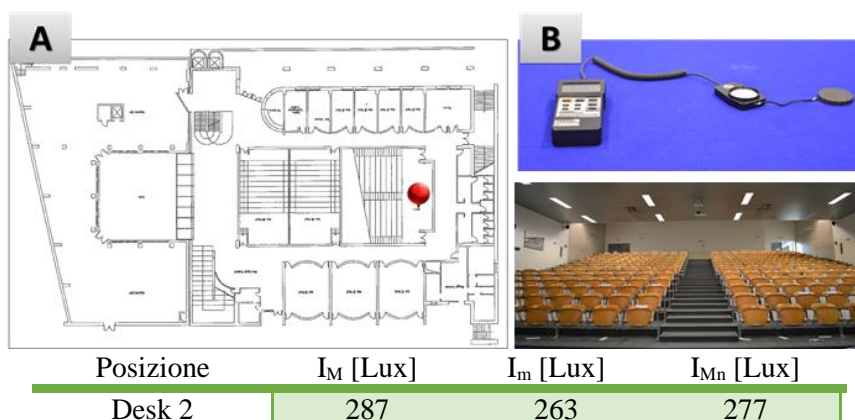


Figura 2. 59: Aula magna: misura di illuminamento a) posizione ambiente; b) strumento di misura (25/01/2017).

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto per aule, sale lettura e sale conferenze della UNI EN 12464-1, il livello ottimale è tra 300-500 Lux, si vede che l'illuminazione artificiale non è sufficiente a garantire lo svolgimento di lezioni in tale ambiente.

AULA SSPL GRAZIANI

L'ambiente in esame (Figura 2.60) è un'aula da circa 30 posti del primo piano con esposizione sud-est, è caratterizzata dalla presenza di due ampie finestre dotate di un sistema di schermatura interno, tende a lamelle in tessuto chiaro. Risulta servito da due radiatori in ghisa e da una bocchetta di immissione di aria.

L'illuminamento di tale ambiente è stato analizzato attraverso una misura che prevedeva il sensore posto al centro della cattedra ad un'altezza di circa 74 cm. Al solito per ciascun punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m), per un tempo di acquisizione di 10 minuti. Per quanto riguarda le condizioni in cui è stata eseguita la misura:

- Desk 1: misura sulla postazione individuata avendo aperto le tende in tessuto chiaro utilizzate per oscurare il componente finestrato, e avendo spento il sistema di illuminazione.

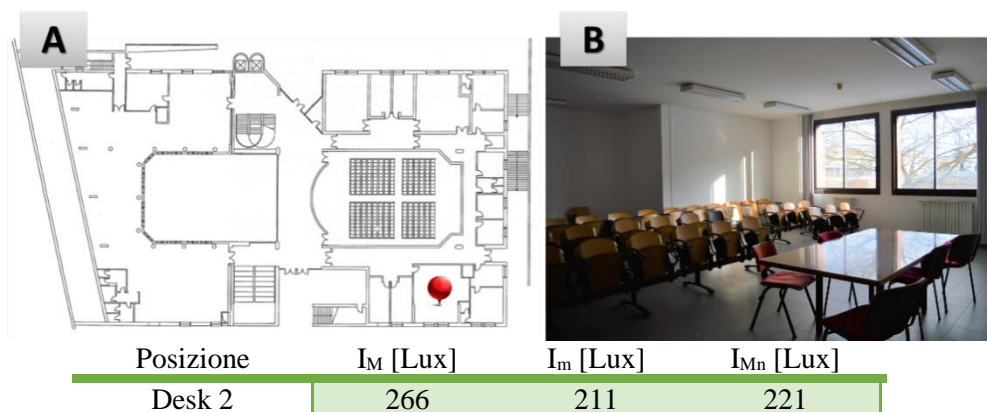


Figura 2. 60: Aula Graziani: misura di illuminamento; a) posizione aula; b) foto aula.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto per le aule ma anche quello per la lettura della UNI EN 12464-1, il livello ottimale è tra 300-500 Lux, si vede che l'illuminazione naturale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista.

Una caratterizzazione di questo tipo, per mezzo di misure puntuali o continue nel tempo, ha permesso di ottenere informazioni molto dettagliate circa le condizioni termiche e di illuminamento che si verificano agli interni degli ambienti, consentendo così una modellazione del sistema edificio-impianto quanto più prossima alla condizione reale.

2.4 Costruzione del modello di simulazione dinamica

Con i dati acquisiti è stato costruito il modello numerico del sistema edificio-impianti, in particolare attraverso la realizzazione delle seguenti fasi:

- scelta della località e definizione dell'orientamento dell'involucro;
- costruzione del modello geometrico e dei componenti di involucro;
- definizione dei parametri di attività e di funzionamento dell'edificio;
- scelta dell'intervallo di simulazione.

Il modello del sistema edificio-impianti è stato poi calibrato attraverso gli indicatori proposti dall'*ASHRAE Guideline 14* e le *M&V Guidelines*, sulla base dei consumi storici e su un'attenta analisi del profilo di utilizzo degli impianti e dei sistemi installati che ha condotto ad evidenziare alcune attuali criticità gestionali.

Nella *Figura 2.60* sono riportati i rendering del modello numerico dell'edificio in oggetto, mentre nella *Figura 2.61* sono riportati rispettivamente il rendering con esposizione nord-ovest e quella con esposizione sud-est, con la corrispondente immagine satellitare in basso a destra.

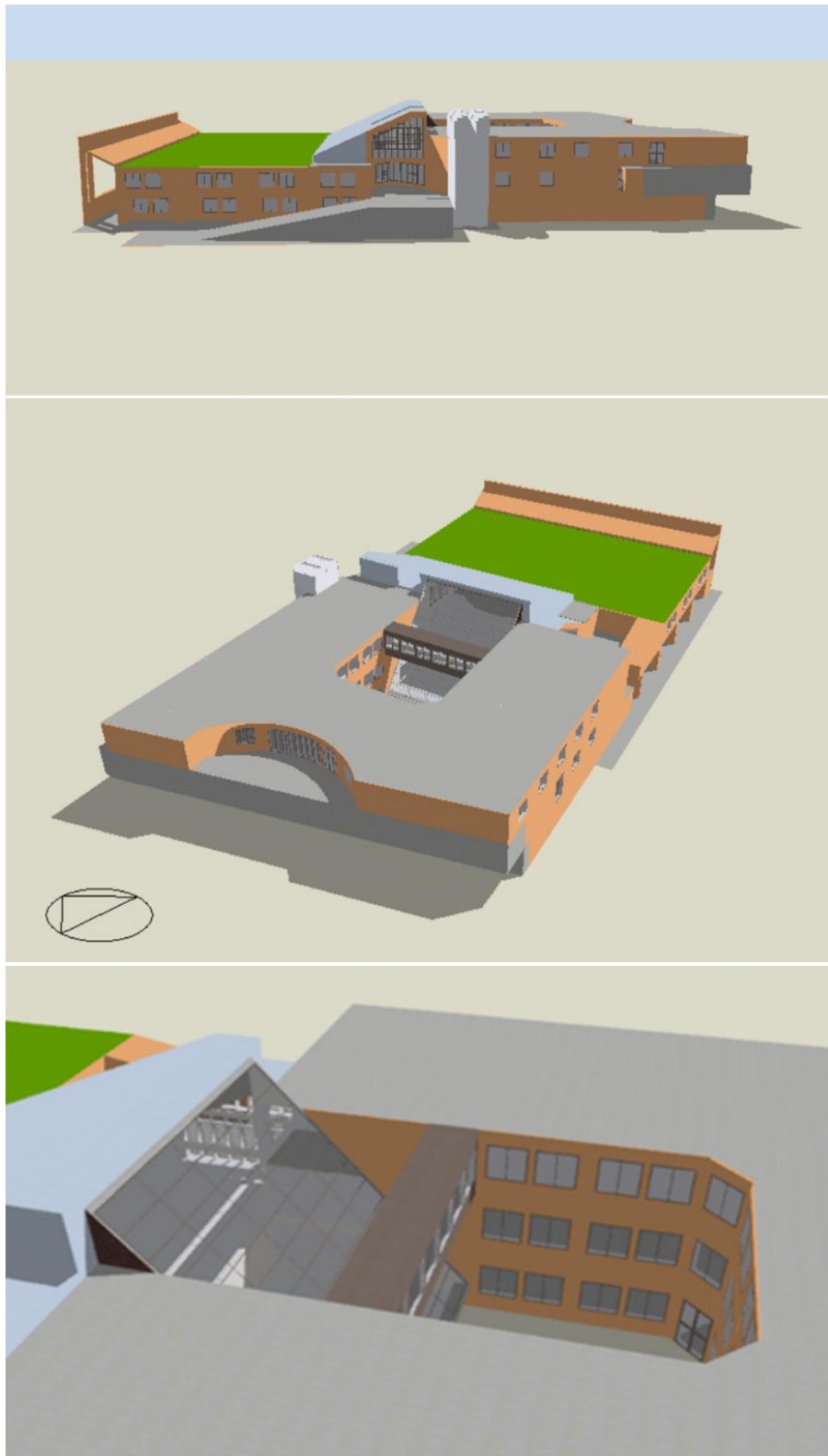


Figura 2. 61: Rendering I edificio polifunzionale dipartimento giuridico Unimol. Facciata n-o ed esposizione s-o.

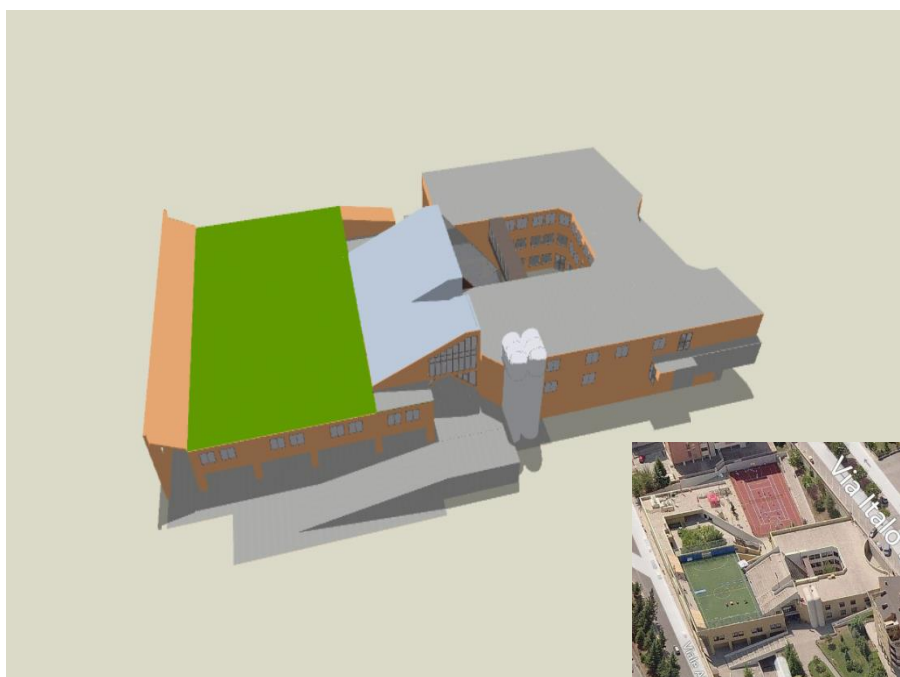


Figura 2. 62: Rendering e immagine satellitare esposizione sud-est.

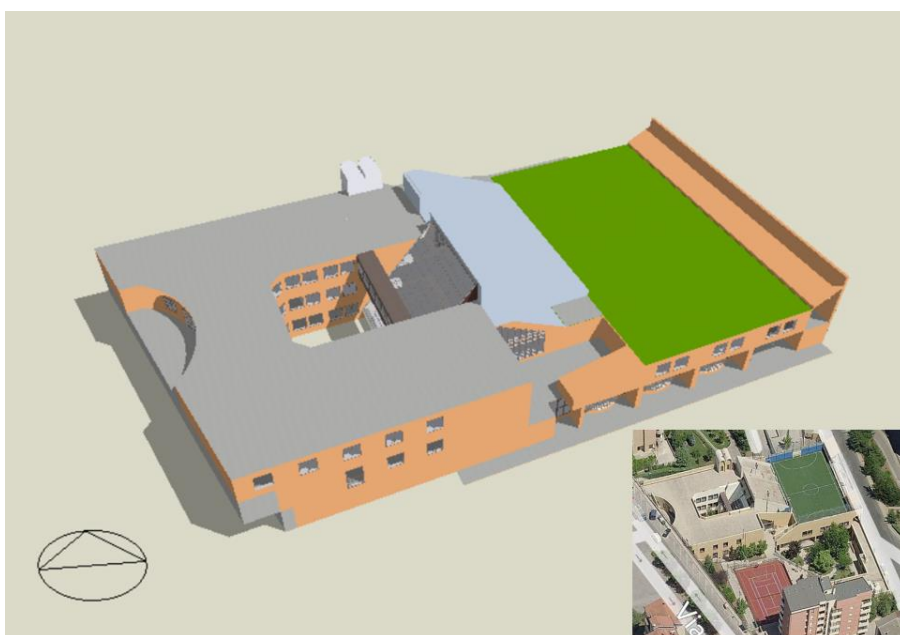


Figura 2. 63: Rendering e immagine satellitare esposizione nord-ovest.

3. Analisi degli scenari di riqualificazione energetica

La fase finale del servizio in oggetto consiste nell'applicazione della metodologia del *Cost Optimal* al I edificio polifunzionale del Dipartimento giuridico dell'Università degli Studi del Molise, al fine di valutare i possibili scenari di riqualificazione energetica ed individuare la configurazione ottimale sotto il profilo dei costi.

Per l'edificio in esame saranno analizzate 31 misure/pacchetti di misure di efficienza energetica e il costo globale di ciascuna di queste sarà calcolato attraverso l'analisi macroeconomica. Per ciascuna quindi, il costo globale sarà valutato al netto dell'Iva e di tutti gli oneri o sussidi, introducendo però il costo per le emissioni di gas a effetto serra. Il periodo di calcolo per l'applicazione di tale metodologia è stato scelto pari a 20 anni, in modo conforme a quanto prescritto per il settore terziario. Sono stati inoltre considerati i costi di rimozione degli elementi preesistenti tra cui rivestimenti e serramenti, gli oneri di carico, trasporto e smaltimento dei materiali di risulta.

Considerando che l'edificio esistente è "funzionante", per inseguire una situazione reale nei costi, è stata valutata l'incidenza in termini di sostituzione e manutenzione dei componenti installati su cui si pensa di fare un intervento, che sono quelli che hanno una durata non comparabile rispetto alla vita utile dell'edificio stesso nella sua interezza.

Dal grafico costi/energia che si otterrà, sarà possibile individuare l'insieme di soluzioni che rappresentano le configurazioni ottimali dal punto di vista energetico/ambientale e gestionale (ovvero dal punto di vista dei costi globali).

3.1 Definizione degli interventi di riqualificazione energetica

Prima di tutto, come riscontrato nella fase di audit del sistema edificio-impianti, negli ambienti interni oggetto di monitoraggio delle grandezze microclimatiche è stato rilevato un livello di umidità relativa molto più basso rispetto al livello ritenuto ottimale dalle normative vigenti in materia di comfort ambientale. Infatti il carico latente non risulta bilanciato, nonostante l'impianto presenti anche la possibilità di intervenire su di esso. Tale misura che imprescindibilmente è da mettere in atto non determina un costo di investimento iniziale per l'edificio, poiché la batteria di umidificazione risulta già presente.

Oltre all'intervento preventivo che prevede la semplice messa in funzione dei sistemi di umidificazione presenti, sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello energetico dell'edificio, e tenendo conto delle informazioni rilevate durante i diversi sopralluoghi effettuati, sono state individuate una serie di possibili misure di efficienza energetica per il sistema edificio-impianti, considerando le tecnologie più diffuse sul mercato. In particolare sono stati ipotizzati i seguenti interventi:

- incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco;
- sostituzione dei serramenti con altri caratterizzati da una maggiore resistenza termica;
- installazione di un sistema di schermatura esterno per i componenti finestrati;
- adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione;

- sostituzione/rifacimento dell'impianto di illuminazione;
- installazione di un recuperatore di calore all'interno delle unità di trattamento aria;
- sostituzione dei chiller e delle UTA esistenti.

Tali misure sono state poi combinate in pacchetti per un totale di 31 tipologie di interventi a cui si aggiunge lo scenario di riferimento. L'edificio nel suo stato di fatto costituisce infatti l'edificio di riferimento e dunque uno dei punti della curva di ottimo che si ottiene.

Come sarà riportato nel prosieguo della presente relazione, per ciascuna delle misure e i pacchetti di misure definiti è stato valutato il risparmio di energia primaria conseguibile (somme dell'energia primaria per il riscaldamento, la produzione di acqua calda sanitaria e dell'energia elettrica primaria per tutti gli usi inclusa l'illuminazione), ed è stato stimato il costo globale corrispondente.

3.1.1 Incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco

La prima tipologia di intervento riguarda l'incremento dell'isolamento termico dell'involucro, al fine di ridurre le dispersioni nel periodo invernale a cui sono imputabili i maggiori consumi per il soddisfacimento delle condizioni di comfort indoor.

Gli interventi per ridurre le dispersioni riguardano essenzialmente la scelta dei materiali e dei relativi spessori da utilizzare per rispettare i vincoli proposti dalle norme di legge sulla base di precise valutazioni tecnico-economiche. A tal proposito, il Decreto Ministeriale 26/06/2015, attuativo della Legge 90/2013, indica i valori limite dei parametri caratteristici degli elementi edilizi negli edifici sottoposti a riqualificazione energetica. Nella *Tabella 3.1*, sono riportati nello specifico, i valori limite della trasmittanza, previsti dal decreto, per gli elementi dell'involucro opaco di interesse per l'edificio oggetto del presente lavoro. Va sottolineato che gli interventi ipotizzati in tale analisi, non rientrano nelle riqualificazioni energetiche, ma nelle ristrutturazioni di primo e secondo livello, per le quali la norma prevede solo limiti sugli indici di prestazione energetica globale. Quindi i valori mostrati in *Tabella 3.1* sono sicuramente delle valide linee guida da considerare per la scelta degli interventi prescelti, ma non necessariamente da rispettare nel caso si volessero mettere in atto.

TABELLA 1 (Appendice B)			TABELLA 2 (Appendice B)			TABELLA 3 (Appendice B)		
Trasmittanza termica U massima delle <u>strutture opache verticali</u> , verso l'esterno soggette a riqualificazione.			Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o indicate di <u>copertura</u> , verso l'esterno soggette a riqualificazione.			Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di <u>pavimento</u> , verso l'esterno soggette a riqualificazione.		
Zona climatica	U _{limite} (W/m ² K)		Zona climatica	U _{limite} (W/m ² K)		Zona climatica	U _{limite} (W/m ² K)	
	dal 1° ottobre 2015	dal 1° gennaio 2021		dal 1° ottobre 2015	dal 1° gennaio 2021		dal 1° ottobre 2015	dal 1° gennaio 2021
A-B	0,45	0,40	A-B	0,34	0,32	A-B	0,48	0,42
C	0,40	0,36	C	0,34	0,32	C	0,42	0,38
D	0,36	0,32	D	0,28	0,36	D	0,36	0,32
E	0,30	0,28	E	0,29	0,24	E	0,31	0,29
F	0,28	0,26	F	0,24	0,22	F	0,30	0,28

Tabella 3. 1: Valori dei parametri caratteristici degli elementi edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica (DM 26/06/15 "requisiti minimi").

Gli interventi proposti in tale ambito per il caso studio sono:

- 1) aumento dell'isolamento termico delle pareti verticali;
- 2) aumento dell'isolamento termico dei pavimenti verso l'esterno;
- 3) aumento dell'isolamento termico del solaio di copertura.

3.1.1.1 Incremento dell'isolamento termico delle pareti verticali esterne e dei pavimenti verso l'esterno

Si è pensato di incrementare l'isolamento termico delle pareti verticali esterne e dei solai, con l'applicazione dall'esterno di 12 cm di materiale isolante. In particolare sono stati presi in considerazione due possibili materiali isolanti; la prima configurazione prevede l'impiego di pannelli di polistirene espanso sinterizzato, mentre la seconda si basa su uno strato di lana di roccia. La scelta di due tipi di materiali è stata fatta sulla base della diversa conducibilità e densità, al fine di considerare sia aspetti invernali che estivi. Le caratteristiche del primo materiale sono riportate nella *Tabella 3.2*, mentre le caratteristiche della lana di roccia sono riportate nella *Tabella 3.3*, sulla base di schede tecniche dei materiali in oggetto prese a riferimento.

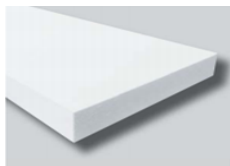
Polistirene espanso sinterizzato (pannello 1000x500x120 mm)		
conducibilità (W/mK)	0,04	
calore specifico (J/kgK)	1200	
densità (kg/m³)	30	
Prezzo (€/m²)	51,03	

Tabella 3. 2: Caratteristiche polistirene espanso sinterizzato.


Lana di roccia (pannello 1000x600x120 mm)		
conducibilità (W/mK)	0,033	
calore specifico (J/kgK)	1030	
densità (kg/m³)	75	
Prezzo (€/m²)	60,00	

Tabella 3. 3: Caratteristiche lana di roccia.

Nella pratica l'applicazione del materiale isolante, comporta una riduzione del valore della trasmittanza del pacchetto murario d'interesse e, in particolare nella *Tabella 3.4* ne sono riportate le principali caratteristiche prima e dopo l'intervento per entrambe le configurazioni previste. Si noti che i valori dopo l'applicazione dell'isolante risultano rientrati nei limiti riportati in *Tabella 3.1*.

Codice	Descrizione	U(W/m ² K)	Spessore (m)
Parete esterna nord-ovest			
PNO	stato di fatto	0,329	0,48
PNO-P12	12 cm polistirene	0,155	0,60
PNO-L12	12 cm lana di roccia	0,141	0,60
Parete esterna nord-est			
PNE	stato di fatto	0,729	0,30
PNE-P12	12 cm polistirene	0,229	0,42
PNE-L12	12 cm lana di roccia	0,200	0,42
Parete esterna sud-est			
PSE	stato di fatto	0,559	0,36
PSE-P12	12 cm polistirene	0,209	0,48
PSE-L12	12 cm lana di roccia	0,209	0,48
Pavimento su esterno (portico)			
PVP	stato di fatto	0,478	0,52
PVP-P12	12 cm polistirene	0,194	0,64
PVP-L12	12 cm lana di roccia	0,173	0,64

Tabella 3. 4: Interventi previsti per le pareti esterne verticali.

Dall'analisi del fabbisogno energetico si evince che il risparmio conseguibile per tali misure è in entrambi i casi di circa il 2%, come mostrato nella Tabella 3.5.

	Energia primaria (MWh)			ΔE%
	Elettrico	Termico	Totale	
Stato di fatto	415,16	388,64	803,799	2%
Isolamento pareti esterne con EPS	412,27	379,35	791,624	
Isolamento pareti esterne con lana di roccia	412,22	378,67	790,895	

Tabella 3. 5: Risultati dell'analisi energetica (isolamento pareti verticali).

Relativamente al costo del materiale isolante, è stato individuato un prezzo pari a 51,03 €/m² per l'EPS e pari a 60,00 €/m² per la lana di roccia. Considerando che la superficie verticale complessiva da isolare è pari a circa 2.311 m², il costo totale del solo materiale l'isolante è pari a 117.947,17 € nel caso dell'EPS e pari a 138.679,80 € nel caso della lana di roccia. Il costo complessivo dell'intervento di ricava sommando a tali importi le seguenti voci di costo, indicate nel computo fornitaci dall'ufficio tecnico dell'Università degli Studi del Molise:

- fondo per superficie esterna: 4.761,34 €;
- tinteggiatura con idropittura per esterno: 19.184,04 €;
- scossalina metallica: 19.184,04 €;
- ponteggi: 18.421,30 €;
- sovrapprezzo ponteggi per ogni mese succ. al primo: 3.651,90 €.

Applicando il metodo del costo globale, come imposto dal regolamento delegato n. 244/2012 della Commissione Europea, considerando una vita utile dei materiali impiegati nella realizzazione di tale intervento pari a 50 anni, il costo globale della misura risulta pari a 212 €/m² nel caso si impieghi il polistirene espanso sinterizzato, e pari a circa 215 €/m² nel caso si utilizzi la lana di roccia.

3.1.1.2 Incremento dell'isolamento termico del solaio di copertura

Un'ulteriore misura per l'involucro opaco prevede l'isolamento termico della copertura. Si è ipotizzato di realizzare tale isolamento sia mediante l'applicazione di 12 cm di EPS, le cui caratteristiche sono state già riportate in precedenza, che mediante l'impiego, sullo strato più esterno della struttura di interesse, di una vernice caratterizzata da un valore medio del coefficiente di riflessione solare, le cui caratteristiche sono riportate nella seguente tabella (*Tabella 3.6*). Tale vernice, oltre ad avere caratteristiche spettrali idonee per località con climi caratterizzati da inverni rigidi ed estati miti, è utilizzata per la protezione degli strati di materiali sottostanti.


Vernice POLYVER ALU		
Coefficiente di riflessione solare	0,56	
Emissività termica	0,48	
Prezzo (€/m ²)	3,30	

Tabella 3. 6: Caratteristiche spettrali della vernice impiegata.

L'applicazione del materiale isolante, comporta una riduzione del valore della trasmittanza termica del pacchetto murario d'interesse, mentre l'impiego della vernice incrementa il coefficiente di riflessione dello strato più esterno della stratigrafia, comportando, da un lato la riduzione delle richieste di raffrescamento estivo ma dall'altro un lieve incremento del fabbisogno per il riscaldamento invernale. In particolare nella *Tabella 3.7* sono riportate le principali caratteristiche prima e dopo l'intervento per entrambe le configurazioni previste.

Codice	Descrizione	U (W/m ² K)	ρ _s (-)
Soffitto a terrazzo piastrelle			
STP	stato di fatto	0,325	0,30
STP-P12	12 cm polistirene	0,165	0,30
STP-P12-VM	12cm polistirene+ vernice medio coeff di riflessione	0,165	0,56
Soffitto a terrazzo campo sportivo			
STC	stato di fatto	0,318	0,30
STC-P12	12 cm polistirene	0,163	0,30
STC-P12-VM	12 cm polistirene+vernice medio coeff di riflessione	0,163	0,56
Soffitto a terrazzo gradonatura			
STG	stato di fatto	0,376	0,30
STG-P12	12 cm polistirene	0,175	0,30

TG-P12-VM	12 cm polistirene+vernice medio coeff di riflessione	0,175	0,56
------------------	--	-------	------

Tabella 3. 7: Interventi previsti al solaio di copertura.

Anche in questo caso si sottolinea che le stratigrafie così composte rispettano i limiti riportati in *Tabella 3.1*. Dall'analisi del fabbisogno energetico si evince che il risparmio conseguibile per tali misure è nel caso di solo isolamento di circa il 2%, mentre nel caso di isolamento e applicazione di vernice con medio valore di riflettanza solare, circa 5%, come mostrato nella *Tabella 3.8*.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
Stato di fatto	415,16	388,64	803,799	
Isolamento solaio di copertura mediante EPS	411,47	373,61	785,077	2%
Intervento isolamento + applicazione vernice	403,23	363,14	766,367	5%

Tabella 3. 8: Risultati dell'analisi energetica. (Isolamento solaio di copertura).

Relativamente al costo, la stima complessiva al m² è stata fatta sommando, al prezzo indicato da listino dai produttori stessi dei materiali impiegati le voci di costo di seguito riportate, individuate sulla base dal prezzario regionale del Molise aggiornato al 2014.

Per la configurazione che prevede l'installazione del solo materiale isolante si sono considerate le seguenti voci:

- costo rimozione strato di rivestimento esterno e manto impermeabile, ivi compresi carico, il trasporto e lo scarico a rifiuto del materiale di risulta: 15,09 €/m²;
- manodopera per spianatura malta in preparazione del piano di posa: 8,50 €/m²;
- costo isolante termico: 50,03 €/m²;
- costo membrana impermeabilizzante bituminosa: 4,27 €/m²;
- costo manodopera posa: 1,27 €/m²;
- costo pavimentazione con piastrelle in calcestruzzo: 28,11 €/m².

Invece per la configurazione che prevede l'installazione della vernice POLYVER ALU oltre allo strato di materiale isolante sono state considerate le seguenti voci di costo:

- costo rimozione strato di rivestimento esterno e manto impermeabile, ivi compresi il carico, il trasporto e lo scarico a rifiuto del materiale da risulta: 15,09 €/m²;
- costo manodopera spianatura malta di preparazione del piano di posa: 8,50 €/m²;
- costo isolante termico: 50,03 €/m²;
- costo manodopera per posa: 1,27 €/m²;
- costo pavimentazione con piastrelle in calcestruzzo 28,11 €/m²;

- costo vernice a base di alluminio con caratteristiche impermeabilizzanti (POLYVER ALU): 3.3 €/m².

Applicando sempre il metodo del costo globale considerando una vita utile del polistirene pari a 50 anni e una vita utile della vernice pari a 5 anni, il costo globale dell'intervento risulta pari a circa 230 €/m² nel caso si preveda l'applicazione del solo polistirene espanso sinterizzato, e pari a 228 €/m² nel caso si preveda anche l'applicazione della vernice sopra indicata.

3.1.2 Sostituzione dei serramenti e installazione di schermature esterne

Le chiusure trasparenti influiscono sul controllo e sull'utilizzo della radiazione solare sia dal punto di vista del guadagno termico sia per l'illuminazione naturale degli ambienti interni. I componenti vetrati possono essere considerati come captatori della radiazione solare e contribuiscono in modo significativo al bilancio energetico dell'edificio nel riscaldamento invernale e nel raffrescamento estivo.

Inoltre, bisogna ricordare che anche in riferimento alle prestazioni energetiche dei componenti finestrati, il Decreto Ministeriale 26-06-2015, nello specifico l'Allegato 1, indica i valori limite dei parametri caratteristici di tali componenti negli edifici sottoposti a riqualificazione energetica, sulla base di precise valutazioni tecnico-economiche. Nella *Tabella 3.9*, sono riportati nello specifico, i valori limite della trasmittanza e del fattore solare totale previsti dal decreto.

TABELLA 4 (Appendice B)		
Trasmittanza termica U massima delle <u>chiusure tecniche trasparenti</u> e opache dei cassonetti, comprensivi infissi verso l'esterno e verso ambienti non climatiz. soggette a riqualificazione.		
Zona climatica	U _{limite} (W/m ² K)	
	dal 1° ottobre 2015	dal 1° gennaio 2021
A-B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

TABELLA 5 (Appendice B)		
Valore del fattore di trasmissione solare totale g _{gl+sh} per i <u>componenti finestrati</u> con orientamento da Est a Ovest passando per Sud, in presenza di schermatura mobile.		
Zona climatica	g _{gl+sh}	
	dal 1° ottobre 2015	dal 1° gennaio 2021
tutte	0,35	0,35

Tabella 3. 9: Valori dei parametri caratteristici degli elementi edilizi trasparenti negli edifici esistenti sottoposti a riqualificazione energetica (DM 26-06-15 "requisiti minimi").

Allo stato attuale, la maggior parte dei componenti finestrati dell'edificio e in particolare quelli per i quali si è previsto un intervento, sono costituiti da un vetrocamera con lastre chiare non rivestite e intercapedine d'aria e presentano un telaio in alluminio; la trasmittanza termica risulta rispettivamente pari a 2,665W/m²K per la lastra e 5,869W/m²K per il telaio. Per quanto riguarda invece i sistemi di schermatura, allo stato attuale sono installati sistemi interni di tipo mobili, ovvero tende a lamelle.

L'intervento previsto propone la sostituzione di tali vetrocamere con altre tipologie di forma conforme a quelle esistenti, con una doppia guarnizione per tenuta termica ed elastica. Sono stati individuati tre possibili componenti finestrati in sostituzione a quello attualmente presente; sicuramente si può prevedere l'impiego

di un telaio in alluminio con taglio termico e un vetrocamera con riempimento in argon e misure pari a 6-13-6 mm. Per le tre configurazioni analizzate si è valutato un diverso trattamento superficiale, in particolare la prima configurazione prevede un vetrocamera basso emissivo, la seconda un vetrocamera selettivo mentre per la terza, si è scelto un vetro elettrocromico.

Per quanto riguarda invece i sistemi di schermatura si sono considerate tre possibilità; oltre a quella di conservare i sistemi interni attualmente presenti, si è considerata la possibilità di installare sistemi esterni di tipo frangisole o di tipo a getto orizzontale.

Nella *Tabella 3.10* sono riportate tutte le combinazioni relative sia al serramento che al sistema di schermatura considerate come candidate in sostituzione degli attuali e le rispettive caratteristiche principali.

Componenti finestrati (tipo 3)				
Codice	Descrizione	U _f	U _g	g _g
Stato di fatto	doppio vetro chiaro con aria telaio in alluminio schermature interne verticali	5,869	2,665	0,703
DBEAG-AT-EFOF	doppio vetro basso emissivo con argon telaio alluminio con taglio termico esterne frangisole orizzontali fisse	2,391	1,689	0,635
DBEAG-AT-ESOF	doppio vetro basso emissivo con argon telaio alluminio con taglio termico esterne sporgenze orizzontali fisse	2,391	1,689	0,635
DBEAG-AT-IV	doppio vetro basso emissivo con argon telaio alluminio con taglio termico schermature interne	2,391	1,689	0,635
DSAG-AT-EFOF	doppio vetro selettivo con argon telaio alluminio con taglio termico esterne frangisole orizzontali fisse	2,391	1,338	0,419
DSAG-AT-ESOF	doppio vetro selettivo con argon telaio alluminio con taglio termico esterne sporgenze orizzontali fisse	2,391	1,338	0,419
DSAG-AT-IV	doppio vetro selettivo con argon telaio alluminio con taglio termico schermature interne	2,391	1,338	0,419
EC	vetro elettrocromico telaio in alluminio con taglio termico	2,391	3,437	0,714

Tabella 3. 10: Interventi previsti per i componenti finestrati principali dell'immobile e relativi sistemi di schermatura.

Il confronto tra il fabbisogno energetico ottenibile con l'adozione di tali misure e lo scostamento dallo stato attuale è riassunto in *Tabella 3.11*.

	Energia primaria (MWh)			
	Usi elettrici	Termico	Totale	$\Delta E\%$
Stato di fatto	415,16	388,64	803,799	
DBEAG-AT-EFOF	413,59	382,43	796,024	1%
DBEAG-AT-ESOF	412,32	380,64	792,963	1%
DBEAG-AT-IV	415,21	382,38	797,59	1%
DSAG-AT-EFOF	408,14	375,11	783,252	3%

DSAG-AT-ESOF	407,19	373,67	780,858	3%
DSAG-AT-IV	409,51	375,54	785,051	2%
EC	416,97	390,90	807,87	-1%

Tabella 3. 11: Risultati dell'analisi energetica (sostituzione componenti finestrati e schermature).

Nel confronto tra le misure si nota come i benefici che dovrebbero portare i vetri elettrocromici non sono apprezzabili in quanto si ottiene un incremento di energia primaria rispetto al caso base. Ciò è dovuto al fatto che da un lato tale tecnologia comporta, per la sua alimentazione, un maggiore consumo di energia elettrica; mentre dall'altro lato va a minimizzare gli apporti gratuiti. Quindi in un clima caratterizzato da inverni rigidi ed estati miti, quale quello di Campobasso, in cui il fabbisogno estivo pesa molto meno rispetto al fabbisogno invernale, si può concludere che tale tecnologia non risulta adatta, fermo restando la sua validità in climi più caldi.

Infine per quanto riguarda l'aspetto economico, nella Tabella 3.12, sono riportati, applicando la metodologia del *Cost Optimal*, il costo per la sostituzione dei componenti finestrati, in termini di valore attuale netto dei costi sostenuti nel corso del periodo di riferimento, e il corrispondente aumento percentuale rispetto allo stato di fatto. Ciò considerando una vita utile dei componenti finestrati e dei sistemi frangisole pari a 35 anni e quella dei sistemi di schermatura a getto orizzontali pari a 50 anni. I prezzi dell'investimento iniziale e i costi di smaltimento dei materiali di risulta sono stati ricavati da quanto riportato nel computo fornitaci dall'ufficio tecnico dell'università del Molise, mentre per i sistemi di schermatura si è fatto riferimento al prezziario della regione Molise. In particolare, a seconda della combinazione considerata, si è tenuto conto di alcune delle seguenti voci di costo:

- costo del componente finestrato con telaio in alluminio a taglio termico con vetrocamera basso emissivo, ivi compresa la manodopera per l'installazione e rimozione del vecchio componente: 300€/m²;
- costo del componente finestrato con telaio in alluminio a taglio termico con vetrocamera selettivo, ivi compresa la manodopera per l'installazione e rimozione del vecchio componente: 320 €/m²;
- costo del sistema di schermatura esterna tipo frangisole compresa la messa in opera: 100 €/m²;
- costo del sistema di schermatura esterna tipo a getto orizzontale compresa la messa in opera: 64,9 €/m²;
- oneri di discarica rifiuti ferrosi (alluminio): 375,45 €;
- oneri di discarica rifiuti in vetro: 1.225,16 €.

	Costo globale (€/m²)	ΔCosto (%)
DBEAG-AT-EFOF	212,70	16
DBEAG-AT-ESOF	207,29	13
DBEAG-AT-IV	205,10	12
DSAG-AT-EFOF	211,38	16
DSAG-AT-ESOF	205,38	12
DSAG-AT-IV	203,97	12
EC	246,66	35

3.1.3 Adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione

Un ulteriore e importante intervento proposto riguarda l'adeguata gestione del sistema di regolazione dei livelli di temperatura settati negli impianti, intervento che può comportare notevoli risparmi energetici.

Infatti nella maggior parte degli ambienti, che nella fase di diagnosi sono stati oggetto di monitoraggio delle grandezze microclimatiche, si è rilevata una temperatura interna che supera, a seconda dei casi, anche di 3 gradi il valore della temperatura di set-point indicata dalle normative vigenti sul risparmio energetico ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ di tolleranza). Ciò è dovuto al fatto che essendo presente solo una regolazione centrale basata sulla temperatura del fluido termovettore acqua, non è possibile adeguare localmente il funzionamento dei sistemi di emissione in funzione delle reali condizioni che sussistono all'interno dell'ambiente. Dall'altra parte infatti i picchi di temperatura sono stati registrati nelle ore centrali della giornata quando i guadagni solari contribuiscono positivamente, e per alcuni locali, in determinate condizioni climatiche esterne, questi potrebbero persino garantire da soli il rispetto del range di comfort per la temperatura interna, previsto dalla normativa vigente.

Bisogna fare due considerazioni alla base dell'intervento proposto, una relativa alla percezione delle condizioni di comfort da parte degli occupanti, l'altra a carattere strettamente normativo. Per quanto riguarda in primo aspetto, come fin ora illustrato, i requisiti di comfort raccomandati per destinazioni d'uso con attività leggere fondamentalmente sedentarie non sono sempre rispettati. Per quanto riguarda il secondo aspetto, le leggi sul risparmio energetico prescrivono, all'articolo 4, comma I, del DPR 412/93, che durante il periodo in cui è in funzione l'impianto di climatizzazione invernale, la media aritmetica delle temperature dell'aria, nei diversi ambienti di ogni singola unità immobiliare, non deve superare per tutti gli edifici, tranne quelli della categoria E.8 (per i quali sono previsti altri valori), il valore di 20°C , con una tolleranza di 2°C . Evidentemente quindi il valore di set point al quale deve essere impostato l'impianto, a rigore, è di 20°C , per il funzionamento invernale. Tuttavia nell'edificio in oggetto tale indicazione non può essere rispettata in virtù del fatto che non sono presenti sistemi di regolazione a livello di singolo ambiente.

La riconfigurazione dei profili di utilizzo degli impianti è possibile in modo semplice e relativamente economico tramite l'adozione nelle seguenti istruzioni:

- settare a 20°C il valore della temperatura dell'aria immessa nei locali serviti dall'impianto misto, ciò mediante l'installazione di una sonda per il controllo della temperatura dell'aria di immissione dell'UTA primario;
- installazione di termostati per il controllo della temperatura dell'aria in ambiente, in ognuno dei locali serviti dall'impianto a tutt'aria;
- installazione di una valvola termostatica in corrispondenza di ogni radiatore presente negli ambienti serviti da un sistema di climatizzazione misto o ad acqua.

Tali componenti permettono di regolare la temperatura in modo differenziato e soprattutto in base alle reali condizioni all'interno dell'ambiente che va a controllare, andando ad attivare i terminali solo quando opportuno, comportando, in tal modo, un sensibile risparmio di energia primaria e un miglioramento delle condizioni di comfort per gli occupanti.

Nella *Tabella 3.13* sono riportati i risparmi energetici conseguibili attraverso tale intervento di installazione e corretto settaggio dei sistemi di regolazione degli impianti a livello di singolo ambiente climatizzato.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Riscaldamento	Totale	
Stato di fatto	415,16	388,64	803,799	
Sistema di regolazione ambiente	406,72	342,35	749,07	7%

Tabella 3. 13: Risultati dell'analisi energetica (installazione sistemi di regolazione a livello ambiente).

L'intervento consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria del 7% rispetto al fabbisogno attualmente richiesto dall'edificio.

Il costo di investimento per tale misura è stato scelto in base ad indagini di mercato, in particolare per quanto riguarda i prezzi dei dispositivi previsti per la regolazione si è considerato:

- costo per l'installazione di una sonda per il controllo della temperatura dell'aria di immissione dell'UTA primario: 100 €/cad;
- costo per l'installazione dei termostati: 30 €/cad;
- costo per l'installazione su ogni radiatore di una termovalvola: 40 €/cad.

In conclusione il costo complessivo considerato per la misura è circa pari a 4.460 €; applicando il metodo del costo globale, considerando una vita utile dei componenti installati pari a 15 anni e il costo di manutenzione pari al 4% del costo di investimento, il costo globale della misura risulta pari a 172 €/m².

3.1.4 Intervento sull'impianto illuminotecnico

I corpi illuminanti presenti nell'edificio oggetto del presente lavoro, sono per lo più lampade a fluorescenza della tipologia a neon e in alcuni ambienti sono presenti anche dei faretti alogeni.

Attraverso il monitoraggio del livello di illuminamento all'interno dell'edificio, si è osservato che tali lampade spesso non garantiscono l'illuminazione necessaria, indicata dalla norma UNI EN 12464, allo svolgimento dell'attività prevista in base alla destinazione d'uso dell'ambiente. Pertanto, sia al fine di ridurre il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminamento interno, che per garantire adeguati livelli di illuminamento negli ambienti stessi, si è ipotizzato di effettuare una sostituzione dei sistemi di illuminazione all'interno dell'edificio.

L'intervento proposto quindi mira sia a soddisfare le richieste di maggiore comfort da parte degli occupanti, sia a ottimizzare il processo di riqualificazione, cercando da un lato di ridurre i consumi per l'illuminazione, dall'altro di migliorare la qualità complessiva dell'illuminamento

Tra le tecnologie di possibile uso per la sostituzione degli apparati illuminanti si sono prese in considerazione le lampade a elettroluminescenza – LED (*light emitting diode*), in particolare come riferimento per le indicazioni circa prezzo e caratteristiche tecniche (*Tabella 3.14*) sono state considerate dei tubi LED OSRAM ST 8V-EM 20W/861 1500mm.


LED OSRAM ST 8V-EM 20W/861		
Potenza nominale (W)	20	
Temperatura di colore	6500	
Indice di resa cromatica	>80	
Vita utile (h)	30.000	
Efficienza luminosa	100	

Tabella 3. 14: Caratteristiche LED considerato per l'intervento.

Nella *Tabella 3.15* è invece riportato il confronto tra il fabbisogno energetico ottenibile con l'adozione di tale misura e il fabbisogno energetico allo stato di fatto, nonché lo scostamento dallo stato attuale.

	Energia primaria (MWh)			Δ E%
	Elett rico	Riscaldam ento	Tot ale	
Stato di fatto	415, 16	388,64	803, 799	
Installazione lampade a LED	320, 17	409,31	723, 48	1 0 %

Tabella 3. 15: Risultati analisi energetica (sostituzione lampade).

Considerando un funzionamento medio giornaliero di 8 ore per 5 giorni a settimana per tutto l'anno, è evidente che la lampada a LED considerata avrà una vita utile di circa 14 anni, con tutte le conseguenti riduzioni dei costi di manutenzione programmata e di conseguenza del costo globale.

Sotto il profilo economico, considerando le seguenti voci di costo:

- fornitura e posa in opera di lampade a tupo LED 20W/861 1500mm: 18,06 €/cad;
- manodopera specializzata di 5^a cat. per modifica linea elettrica di alimentazione rilevatori: 1.336,61 €.

e applicando quanto indicato dalla norma per la metodologia del cost optimal, il costo per la sostituzione dei corpi illuminanti in termini di valore attuale netto dei costi sostenuti nel corso del periodo di riferimento risulta pari a circa 167 €/m².

In riferimento all'impianto illuminotecnico, è stata ipotizzata un'altra misura che prevede, oltre all'installazione delle suddette lampade, un sistema di regolazione delle stesse, ovvero l'installazione di un rilevatore di presenza e luminosità in ogni ambiente. Il controllo dell'illuminazione con rivelatore di presenza si basa da una parte sulla registrazione di movimenti e dall'altra sulla misurazione della luce. I rivelatori di presenza misurano costantemente la luminosità dell'ambiente, e attraverso tale misurazione permanente della luce è in grado non solo di accendere ma anche di spegnere la luce artificiale quando la luce naturale è rispettivamente insufficiente o sufficiente.

La Tabella 3.16 mostra come varia il fabbisogno energetico con l'adozione di questa seconda tecnologia:

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Riscaldamento	Totale	
Stato di fatto	415,16	388,64	803,799	
Installazione lampade a LED e controllo	293,23	409,01	702,24	13 %

Tabella 3. 16: Risultati analisi energetica (sostituzione lampade e installazione sistema di controllo).

In questo secondo caso, la vita stimata per entrambi i componenti è assunta pari a 15 anni, tuttavia oltre al costo per l'installazione delle lampade, bisogna considerare anche i costi associati all'installazione del rilevatore di presenza e luminosità, ovvero le seguenti voci:

- fornitura e posa in opera di rilevatore di presenza e luminosità: 22 €/cad;
- manodopera specializzata di 2^a cat. per modifica linea elettrica di alimentazione rilevatori: 1.069,49 €.

Pertanto, applicando la metodologia del cost optimal, il costo per la sostituzione dei corpi illuminanti insieme all'installazione di rivelatori di presenza e luminosità per il controllo dei corpi illuminanti stessi, in termini di valore attuale netto dei costi globali sostenuti nel corso del periodo di riferimento risulta pari a 163 €/m² anno.

3.1.5 Installazione di un recuperatore di calore all'interno delle UTA

I recuperatori di calore sono degli scambiatori che permettono il trasferimento di calore e/o umidità tra un flusso d'aria di espulsione ed un flusso di aria di immissione, sotto l'azione di una differenza di temperatura (o di umidità). Spesso essi sono impiegati negli impianti di climatizzazione, in particolare all'interno delle unità di trattamento aria per una migliore gestione dell'energia termica finalizzata al risparmio energetico.

Nel caso dell'impianto asservito all'edificio oggetto di analisi, appurato che il flusso di aria esterna di rinnovo e quella interna di espulsione si incontrano proprio all'interno delle unità di trattamento aria, è possibile pensare di prevedere un intervento che implichi l'inserimento di un recuperatore all'interno delle UTA stesse così da conseguire una riduzione del fabbisogno energetico per la climatizzazione degli ambienti e una conseguente riduzione dei costi di esercizio degli impianti di climatizzazione stessi.

In particolare, per l'intervento previsto si è considerato l'impiego di recuperatori ad aria a flussi incrociati le cui caratteristiche sono riportate nella *Tabella 3.17*.

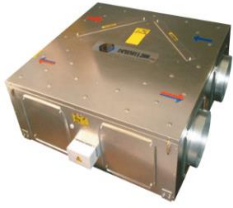
Recuperatori di calore		
portata (m³/h)	4300	
recupero di energia (%)	52	
portata (m³/h)	17900	
recupero di energia (%)	54	
portata (m³/h)	13800	
recupero di energia (%)	54	

Tabella 3. 17: Caratteristiche recuperatori considerati nell'intervento

In riferimento a tale intervento, nella *Tabella 3.18* è riportato il fabbisogno di energia primaria derivante dall'adozione di tale misura e lo scostamento rispetto allo stato attuale.

	Energia primaria (MWh)			
	Elettrico	Riscaldamento	Totale	ΔE%
Stato di fatto	415,16	388,64	803,799	
Installazione recuperatore di calore	423,01	267,39	690,40	14 %

Tabella 3. 18: Risultati dell'analisi energetica (installazione recuperatori di calore).

Relativamente al costo dell'intervento, la stima è stata fatta a partire da quanto indicato nel computo fornito dall'ufficio tecnico dell'università:

- fornitura e posa in opera di recuperatore di calore per UTA primaria: 6.551,40 €/cad;
- fornitura e posa in opera di recuperatore di calore per aula magna: 5.050,80 €/cad;
- fornitura e posa in opera di recuperatore di calore per UTA aule 100 e aule 180 posti: 8.052,00 €/cad.

Il costo complessivo considerato per l'installazione dei cinque recuperatori considerati è pari a circa 19654€ ivi incluso il costo della manodopera per l'installazione. Applicando il metodo del costo globale, considerando una vita utile del recuperatore pari a 20 anni e stimato il 2 % del valore dell'investimento iniziale come costo di manutenzione, il costo globale della misura risulta pari a circa 164 €/m² anno.

3.1.6 Sostituzione dei chiller e delle UTA

In ragione del grado di obsolescenza e della scarsa efficienza dei due gruppi esistenti, si è ipotizzato di installare n° 2 gruppi d'acqua acqua refrigerata con condensazione ad aria con ventilatori elicoidali - PF = 176,0 PA = 59,0. e delle unità di trattamento aria presenti nel complesso edilizio con apparecchiature delle medesime caratteristiche tecniche e funzionali, ma con migliore grado prestazionale.

3.2 Misure e pacchetti di misure di efficienza energetica applicati allo stato di fatto

Si sono individuati una serie di pacchetti, aggregando due o più misure precedentemente descritte, al fine di individuare la combinazione ottimale degli interventi dal punto di vista sia energetico che economico. Tutte le misure e i pacchetti di misura proposti ed analizzati per la riqualificazione energetica dell'edificio, con i rispettivi fabbisogni energetici, costi globali ed emissioni di CO₂ vengono riportati in *Tabella 3.19*.

	Ep tot (kWh)	Ep (kWh/m ²)	ΔEp (%)	Costo (€/m ²)	Δcosto (%)	ΔCO ₂ (%)
CB	803.798,92	166,25		182,86		
P-P12	791.623,84	163,73	1,51	212,29	-16,10	1,44
P-L12	790.894,94	163,58	1,61	215,00	-17,58	1,53
S-P12-VM	766.367,38	158,51	4,66	228,39	-24,90	4,50
S-P12	785.076,99	162,38	2,33	229,70	-25,62	2,20
P-P12+S-P12-VM	746.841,61	154,47	7,09	256,17	-40,09	6,84
P-P12+S-P12	765.781,22	158,39	4,73	257,53	-40,84	4,51
P-L12+S-P12-VM	746.182,71	154,33	7,17	258,89	-41,58	6,91
P-L12+S-P12	765.156,77	158,26	4,81	260,25	-42,33	4,59
DBEAG-AT-EFOF	796.024,13	164,64	0,97	212,70	-16,32	0,92
DBEAG-AT-ESOF	792.962,74	164,01	1,35	207,29	-13,36	1,29
DBEAG-AT-IV	797.587,82	164,97	0,77	205,10	-12,16	1,26
DSAG-AT-EFOF	783.251,81	162,00	2,56	211,38	-15,60	2,48
DSAG-AT-ESOF	780.858,26	161,51	2,85	205,38	-12,32	2,77
DSAG-AT-IV	785.051,00	162,37	2,33	203,97	-11,54	2,25
EC	807.868,22	167,09	-0,51	246,66	-34,89	-0,50
P-P12+S-P12-VM+DBEAG-AT-IV	747.386,70	154,58	7,02	280,07	-53,17	6,72
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV	727.279,19	150,42	9,52	278,93	-52,54	9,18
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-EFOF	747.628,51	154,63	6,99	292,35	-59,88	6,73
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-ESOF	745.299,41	154,15	7,28	286,37	-56,61	7,01
REG	749.073,72	154,93	6,81	172,34	5,75	6,30
REC	690.397,33	142,80	14,11	163,48	10,59	12,69
REG+REC	636.937,82	131,74	20,76	153,23	16,20	11,92
LED	723.481,15	149,64	9,99	167,22	8,55	11,13
LEDC	702.237,38	145,25	12,64	162,87	10,93	14,11
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC	605.770,54	125,29	24,64	256,01	-40,00	22,73
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LED	526.337,46	108,86	34,52	237,06	-29,64	33,74
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LEDC	504.868,19	104,42	37,19	232,75	-27,29	36,74
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LEDC+REG	461.570,93	95,47	42,58	190,76	-4,32	41,82
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REG	687.748,63	142,25	14,44	270,78	-48,08	13,83
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV+ LEDC	625.959,39	129,47	22,12	257,84	-41,01	23,21
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC + REG	564.946,63	116,85	29,72	233,42	-27,65	0,28

Tabella 3. 19: Misure e pacchetti di misure applicate al caso studio.

Nel presente lavoro si è deciso di individuare prima il miglior pacchetto (dal punto di vista strettamente energetico) di misure riguardante solo la riqualificazione dell'involucro opaco e trasparente, in modo da allinearsi ai limiti di legge per riqualificazioni energetiche previsti per il 2021; successivamente si è passati all'analisi dei pacchetti di misure inerenti gli impianti asserviti all'edificio e le modalità di gestione degli stessi. Dall'analisi della *Tabella 3.19* si evince che il miglior pacchetto di misure da applicare all'involucro opaco è quello corrispondente alla sigla "P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV", ossia quello che prevede l'isolamento a cappotto (pareti e solai) mediante 12 cm di EPS, vernice con medio coefficiente di riflettanza solare, doppi vetri selettivi (6-13-6mm) con argon e telaio a taglio termico, con sole schermature interne (come nello stato di fatto). Quindi individuato il migliore pacchetto di interventi per l'involucro edilizio si passa all'implementazione su di esso dei pacchetti dati dalla combinazione di interventi sugli impianti e si individua in tal modo la migliore configurazione complessiva per la riqualificazione energetica del sistema edificio-impianti sotto il profilo dei costi.

3.3 Applicazione della metodologia del *Cost-Optimal*

I costi associati alle misure e i pacchetti di misure sopra riportati sono stati determinati come indicato dal *Regolamento Delegato 244/2012* per l'applicazione della metodologia del *Cost-Optimal*, considerando quindi l'investimento iniziale, i costi di gestione e di sostituzione e il valore monetario del danno ambientale causato dalle emissioni dei gas ad effetto serra. Dai calcoli sul costo globale si è ottenuto il valore attuale netto (VAN) dei costi sostenuti nel corso di un periodo di riferimento definito; ottenendo così il valore attuale di una serie di flussi di cassa attualizzandoli sulla base di un tasso di rendimento. In tal modo sono stati riferiti al medesimo orizzonte temporale i flussi di cassa che si manifesterebbero in momenti diversi e quindi non sarebbero direttamente confrontabili.

L'equazione, indicata dal regolamento per il calcolo dei costi globali per il calcolo macroeconomico, tiene conto di una serie di parametri economici riassunti per chiarezza nella *Tabella 3.20*.

Periodo di calcolo	T	20 anni
Tasso di inflazione	R_i	0,3%
Tasso di interesse reale	R_r	3,0%
Tasso di sconto	R_d	0,70
Ciclo di vita del componente	P	[anni]
Il fattore di valore presente	f_{pv}	14,878

Tabella 3. 20: Parametri utilizzati per il calcolo del costo globale.

La successiva fase della metodologia del *Cost-Optimal* prevede la derivazione del livello ottimale in funzione dei costi della prestazione energetica. Per fare ciò si effettua il confronto tra il costo globale calcolato per le diverse misure e pacchetti di misure di efficienza energetica ipotizzate e riportate nella *Tabella 3.19*. Nel seguente grafico (*Figura 3.1*) è in particolare riportato, per ogni misura e pacchetto di misure applicate all'edificio, il costo globale dell'intervento e il corrispondente fabbisogno di energia primaria.

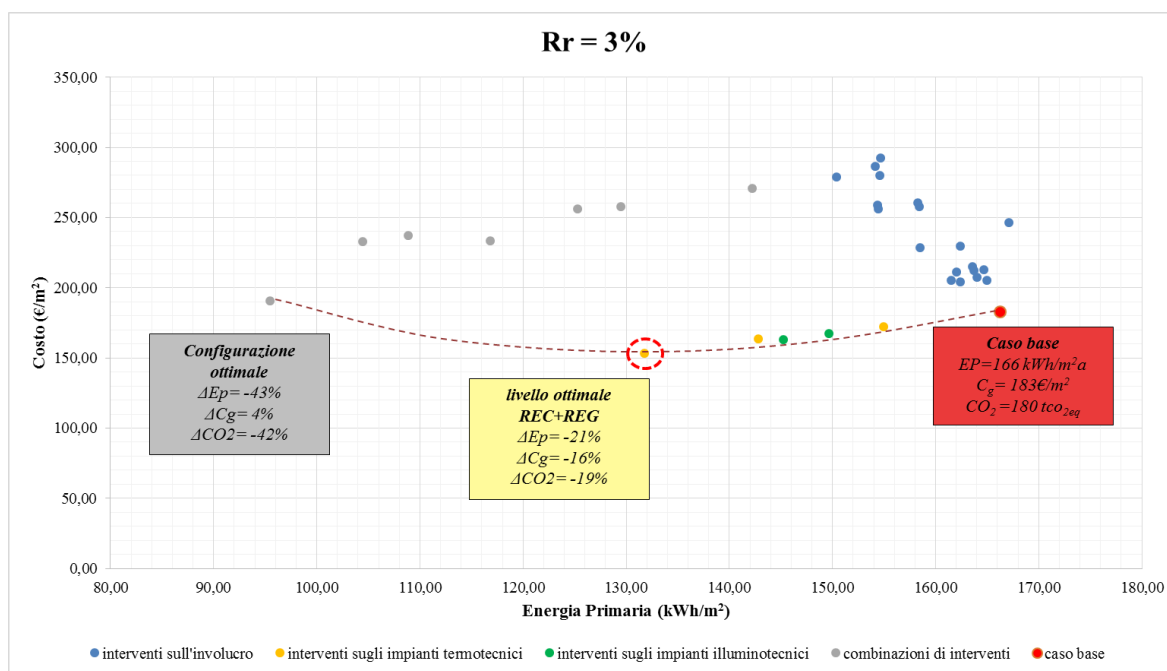


Figura 3. 1: Grafico delle misure e pacchetti di misure e pacchetti di misure di efficienza energetica. Tasso di interesse pari al 3%.

Analizzando il grafico dal punto di vista strettamente energetico, è possibile innanzitutto notare la posizione dello stato di fatto ($166 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ e 183 €/m^2), caratterizzato dal maggior valore di fabbisogno energetico, e di tutte le altre misure, caratterizzate da una riduzione del fabbisogno di energia. Infatti l'unico punto a destra di quello rappresentativo del caso base è quello che corrisponde all'installazione di vetri elettrocromici, i quali per l'edificio in esame e per le condizioni climatiche in cui si trova, non apportano alcun beneficio in termini di risparmio energetico. Inoltre si nota come i soli interventi sugli impianti (termotecnici o illuminotecnici) riescono a garantire un maggiore risparmio in termini di energia primaria rispetto agli interventi sull'involucro; infatti il miglior pacchetto sull'involucro, che prevede la realizzazione sia di un cappotto termico che la sostituzione dei componenti finestrati, determina una riduzione del 10% del fabbisogno di energia che può essere facilmente raggiunta con la sola sostituzione dei corpi illuminanti all'interno dell'edificio.

In dettaglio la configurazione che rispetta i limiti presi come riferimento per l'involucro edilizio e che risulta migliore dal punto di vista energetico, per quanto riguarda il solo involucro opaco, prevede un cappotto termico con pannelli di EPS da 12 cm con l'aggiunta di uno strato di vernice con pigmenti di alluminio per il solaio di copertura; prevede inoltre l'installazione di componenti finestrati con un telaio in alluminio con taglio termico e vetri selettivi. Tale configurazione comporta complessivamente una riduzione del 10% sul fabbisogno di energia primaria rispetto al caso base, al fronte di un costo globale annuo pari a circa 247 €/m^2 , con una variazione di circa il 35%.

Invece il pacchetto di misure complessivamente migliore, sempre dal punto di vista prettamente energetico, considerando quindi anche gli interventi sugli impianti, è quello che, partendo dal miglior

pacchetto sull'involucro, prevede l'installazione di un recuperatore di calore all'interno delle unità di trattamento aria, la sostituzione delle lampade attualmente installate con lampade al LED accoppiate con un sistema di controllo ed infine l'installazione in ognuno degli ambienti condizionati di dispositivi quali termostati e valvole termostatiche per una adeguata gestione degli impianti di climatizzazione stessi (P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + REC +LEDC+REG). Per esso l'energia primaria risulta essere pari a 95 kWh/m²a, con una riduzione rispetto al caso base di circa il 43%. Inoltre, il costo globale per tale pacchetto di misure si attesta a circa 160 €/m², con una riduzione dell'13%.

Analizzando i singoli interventi, l'installazione dei recuperatori di calore comporta da sola una riduzione del fabbisogno di energia primaria circa pari al 14%. Invece la sostituzione delle lampade insieme all'installazione dei rilevatori di presenza e illuminazione comportano complessivamente una riduzione del fabbisogno del 13%. Infine l'installazione di dispositivi di regolazione nei singoli ambienti comporta una riduzione del fabbisogno di energia primaria del 14% circa.

Se si considerano invece solo i costi, il pacchetto di misure caratterizzato dal costo maggiore, rispetto allo stato di fatto è quello denominato "P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-EFOF" in cui oltre agli interventi sull'involucro precedentemente descritti vengono aggiunti anche sistemi schermanti fissi quali frangisole. Tale punto infatti è caratterizzato da un costo globale pari a 270 €/m², maggiore del 48% rispetto al caso base.

In definitiva, la combinazione di misure con il costo più basso è il minimo dell'curva tratteggiata nella figura precedente che idealmente unisce i punti caratterizzati dal costo minore. Tale pacchetto, evidenziato con un tratteggio rosso, e denominato "REG+REC" risulta essere quello che prevede, l'installazione di recuperatori di calore all'interno delle unità di trattamento aria presenti e l'adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione attraverso l'installazione di una sonda per la regolazione della temperatura di mandata dell'*UTA primario* e di opportuni sistemi di controllo nei singoli ambienti (termovalvole e termostati). Tale misura garantisce il miglior compromesso tra costi e risparmio di energia primaria per gli interventi considerati, infatti prevede un fabbisogno complessivo di energia primaria di circa 132 kWh/m² comportando una riduzione complessiva del fabbisogno energetico di circa il 21 % rispetto all'attuale stato di fatto, ciò al fronte di un costo globale pari a circa 164 €/m².

I valori numerici di tutti i punti diagrammati sono riportati in *Tabella 3.19*.

3.4 Analisi di sensibilità

L'ultima fase della metodologia del *Cost-Optimal* prevede l'analisi di sensibilità dei risultati ottenuti in funzione di ipotesi realistiche di variazione dei parametri fondamentali del metodo, il cui andamento futuro può avere un impatto significativo sul risultato finale. In particolare il regolamento consiglia agli Stati membri di effettuare un'analisi di sensibilità dei diversi scenari di prezzo per tutti i vettori energetici rilevanti nel contesto nazionale e impone di effettuare almeno due scenari per i tassi di sconto da

utilizzare nei calcoli sui valori ottimali in funzione dei prezzi. Ragion per cui sono state riprodotte le stesse analisi con tassi diversi, in particolare sono stati utilizzati tassi reali dell'1,5% e del 5,0%.

3.4.1 Analisi di sensibilità, tasso di interesse reali pari all'1,5%

La Figura 3.2 mostra i risultati ottenuti dall'analisi condotta con un tasso reale dell'1,5%. Dall'analisi del diagramma si osserva immediatamente una leggera traslazione verso l'alto di tutte le soluzioni considerate, l'edificio nello stato di fatto, ad esempio, è caratterizzato, nel caso di tasso di interesse pari all'1,5%, da un costo globale pari a 207 €/m² mentre nel caso con tasse di interesse del 3% il costo globale risulta pari a 183 €/m². Si nota come le differenze percentuali dei costi globali, tra il caso base e quello dei vari interventi, si riducono rispetto al caso con tasso di interesse pari a 3%. Le considerazioni energetiche restano pressoché le stesse fatte per lo scenario precedente. Appare però interessante notare che in questa condizione analizzata, il punto livello ottimale delle prestazione energetica in funzione dei costi risulta essere quello caratterizzato dal miglior pacchetto sull'involucro e da tutti gli interventi considerati sugli impianti (P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV+REC +LEDC+REG).

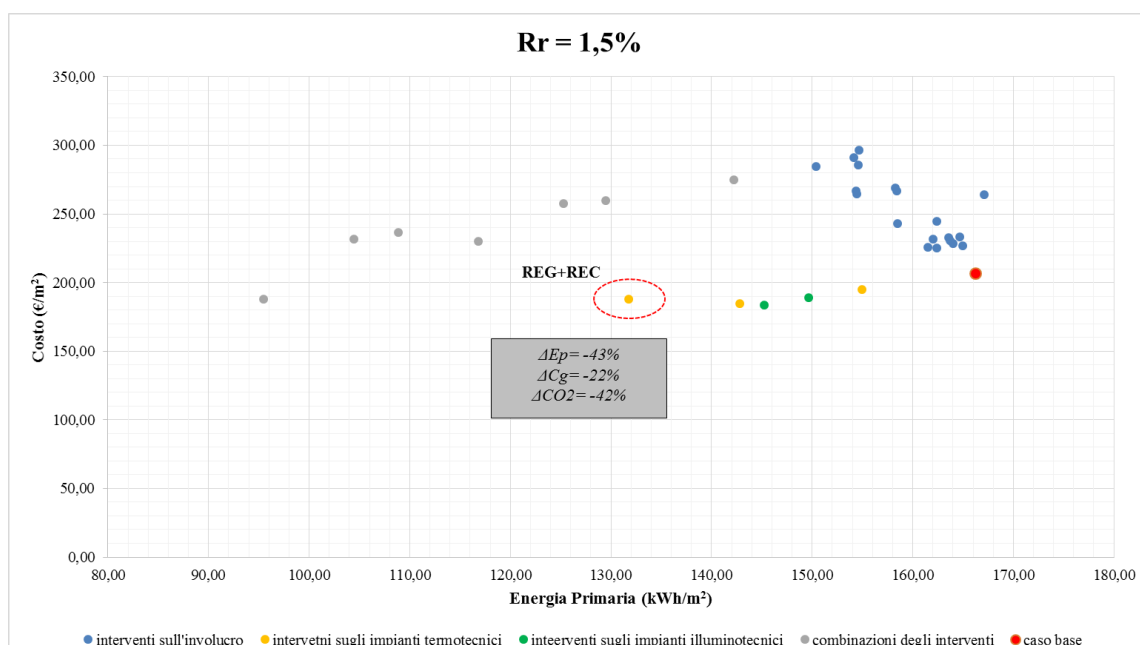


Figura 3. 2: Grafico delle differenti misure e pacchetti di misure di efficienza energetica. Tasso di interesse pari al 1,5%.

La Tabella 3.21 riporta di seguito i valori numerici di quanto diagrammato in Figura 3.2.

	Ep tot (kWh)	Ep (kWh/m ²)	ΔEp (%)	Costo (€/m ²)	Δcosto (%)
CB	803.798,92	166,25		207,07	
P-P12	791.623,84	163,73	1,51	230,70	-11,41
P-L12	790.894,94	163,58	1,61	232,89	-12,47
S-P12-VM	766.367,38	158,51	4,66	242,78	-17,24
S-P12	785.076,99	162,38	2,33	244,71	-18,18
P-P12+S-P12-VM	746.841,61	154,47	7,09	264,52	-27,74
P-P12+S-P12	765.781,22	158,39	4,73	266,51	-28,71
P-L12+S-P12-VM	746.182,71	154,33	7,17	266,74	-28,81
P-L12+S-P12	765.156,77	158,26	4,81	268,73	-29,78

DBEAG-AT-EFOF	796.024,13	164,64	0,97	233,32	-12,68
DBEAG-AT-ESOF	792.962,74	164,01	1,35	228,66	-10,42
DBEAG-AT-IV	797.587,82	164,97	0,77	226,60	-9,43
DSAG-AT-EFOF	783.251,81	162,00	2,56	231,45	-11,77
DSAG-AT-ESOF	780.858,26	161,51	2,85	225,96	-9,12
DSAG-AT-IV	785.051,00	162,37	2,33	224,93	-8,62
EC	807.868,22	167,09	-0,51	264,07	-27,53
P-P12+S-P12-VM+DBEAG-AT-IV	747.386,70	154,58	7,02	285,92	-38,08
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV	727.279,19	150,42	9,52	284,64	-37,46
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-EFOF	747.628,51	154,63	6,99	296,72	-43,29
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-ESOF	745.299,41	154,15	7,28	291,25	-40,65
REG	749.073,72	154,93	6,81	195,00	5,83
REC	690.397,33	142,80	14,11	184,59	10,86
REG+REC	636.937,82	131,74	20,76	187,95	9,23
LED	723.481,15	149,64	9,99	188,84	8,81
LEDC	702.237,38	145,25	12,64	183,80	11,24
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC	605.770,54	125,29	24,64	257,74	-24,47
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LED	526.337,46	108,86	34,52	236,42	-14,17
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LEDC	504.868,19	104,42	37,19	231,45	-11,77
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LEDC+REG	461.570,93	95,47	42,58	187,95	9,23
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REG	687.748,63	142,25	14,44	274,89	-32,75
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + LEDC	625.959,39	129,47	22,12	259,87	-25,50
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC + REG	564.946,63	116,85	29,72	230,25	-11,19

Tabella 3. 21: Valutazione del costo globale per ogni misura con tasso di interesse 1,5%.

3.4.2 Analisi di sensibilità, tasso di interesse reale pari al 5%

Dall'analisi della *Figura 3.3* emerge che un tasso di interesse reale più alto riduce l'incidenza sul costo globale dei costi di esercizio e manutenzione, riducendone così il valore assoluto. Ad esempio si nota che l'edificio nello stato di fatto attuale nel caso di tasso di interesse pari al 3% presentava un costo globale pari a 183€/m², nel caso invece di tasso pari a 5 % il costo globale si attesta al valore di 157€/m². Tuttavia, in uno scenario di questo tipo, si va a confermare l'intervento REC+REG come livello ottimale sotto il profilo dei costi.

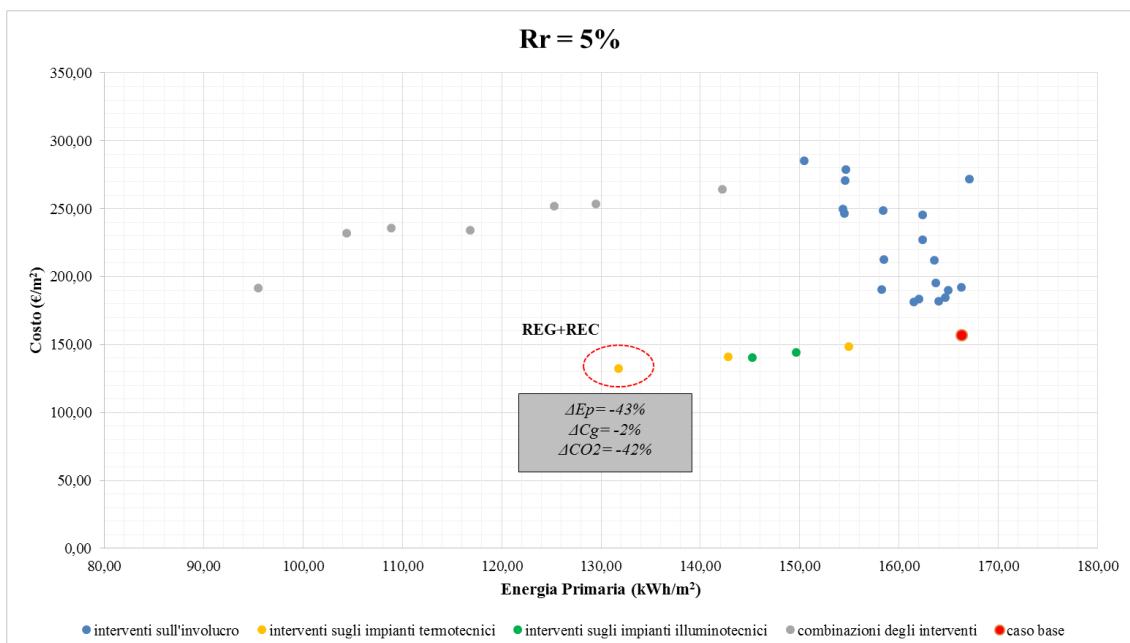


Figura 3. 3: Grafico delle differenze misure e pacchetti di misure di efficienza energetica. Tasso di interesse pari al 5%.

In Tabella 3.22 vengono riportati i valori numerici di quanto diagrammato in Figura 3.3.

	Ep tot (kWh)	Ep (kWh/m²)	ΔEp (%)	Costo (€/m²)	Δcosto (%)
CB	803.798,92	166,25		157,33	
P-P12	791.623,84	163,73	1,51	192,25	-22,20
P-L12	790.894,94	163,58	1,61	195,43	-24,22
S-P12-VM	766.367,38	158,51	4,66	212,04	-34,78
S-P12	785.076,99	162,38	2,33	212,85	-35,29
P-P12+S-P12-VM	746.841,61	154,47	7,09	245,54	-56,07
P-P12+S-P12	765.781,22	158,39	4,73	246,40	-56,61
P-L12+S-P12-VM	746.182,71	154,33	7,17	248,73	-58,10
P-L12+S-P12	765.156,77	158,26	4,81	249,60	-58,65
DBEAG-AT-EFOF	796.024,13	164,64	0,97	190,56	-21,12
DBEAG-AT-ESOF	792.962,74	164,01	1,35	184,47	-17,25
DBEAG-AT-IV	797.587,82	164,97	0,77	182,13	-15,76
DSAG-AT-EFOF	783.251,81	162,00	2,56	189,80	-20,64
DSAG-AT-ESOF	780.858,26	161,51	2,85	183,34	-16,53
DSAG-AT-IV	785.051,00	162,37	2,33	181,55	-15,40
EC	807.868,22	167,09	-0,51	227,28	-44,46
P-P12+S-P12-VM+DBEAG-AT-IV	747.386,70	154,58	7,02	271,79	-72,75
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV	727.279,19	150,42	9,52	270,85	-72,16
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-EFOF	747.628,51	154,63	6,99	285,46	-81,44
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-ESOF	745.299,41	154,15	7,28	279,01	-77,34
REG	749.073,72	154,93	6,81	148,43	5,66
REC	690.397,33	142,80	14,11	141,23	10,23
REG+REC	636.937,82	131,74	20,76	132,56	15,74
LED	723.481,15	149,64	9,99	144,38	8,23
LEDC	702.237,38	145,25	12,64	140,74	10,54
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC	605.770,54	125,29	24,64	252,03	-60,20
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LED	526.337,46	108,86	34,52	235,58	-49,74
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LEDC	504.868,19	104,42	37,19	231,96	-47,44

P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC +LEDC+REG	461.570,93	95,47	42,58	191,50	-21,72
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REG	687.748,63	142,25	14,44	264,27	-67,97
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV+ LEDC	625.959,39	129,47	22,12	253,54	-61,15
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV +REC + REG	564.946,63	116,85	29,72	234,16	-48,84

Tabella 3. 22: Variazione del costo globale per ogni misura e pacchetto con tasso di interesse del 5%.

Si riporta di seguito una tabella di riepilogo (Tabella 3.23) dei costi specifici stimati per ogni singolo intervento, e le relative quantità.

Intervento	Codice	€/m ²	€/cad.	m ²	n.	Altre voci di costo (€)	€tot
Isolamento parete (12 cm EPS)	P-P12	51,03		2311.33		114.814,32	232.761,49
Isolante parete (12 cm Lana di roccia)	P-L12	60,00		2311.33		114.814,32	253.494,12
Isolamento solaio (12 cm EPS)	S-P12	108,27		3410.28			369.231,02
Isolamento solaio (12 cm EPS + vernice alluminio)	S-P12-VM	107,30		3410.28			365.923,04
Doppio vetro basso emissivo con telaio a taglio termico	DBEAG-AT	300		496.79		1.600,61	150.637,01
Doppio selettivo con telaio a taglio termico	DSAG-AT	320		496.79		1.600,61	160.576,61
Vetro elettrocromico	EC	800		496.79		1.600,61	399.031,01
Frangisole	FR	100		496.79			49.678,80
Sporgenza orizzontale	SP	64.9		248.39			16.120,51
	Sonda regolazione aria immissione "UTA primario"		100		1		
	Termostati		30		12		
	Termovalvole		40		100		
Regolazione (termostati + termovalvole)	REG						4.460,00
Lampade LED	LED		18.06		800	1.336,61	15.784,61

	Controllo LED		22		107	1.069,49	3.423,49
LED + Controllo	LEDC						19.208,10
	Recuperatore “UTA primario”		6551.4		1		
	Recuperatore “aula magna”		5050.8		1		
	Recuperatore “aula 100posti e 180posti”		2684		3		
Recuperatori di calore	REC						19.654,20

Tabella 3. 23: Tabella riepilogativa relativa ai costi.

Infine nella *Tabella 3.24* si riportano i tempi di ritorno dell’investimento dei principali pacchetti di misure considerati per l’edificio analizzato.

Codice	SPB (anni)
P-P12+S-P12-VM	12,60
P-P12+S-P12-VB	12,36
P-L12+S-P12-VM	13,04
P-L12+S-P12-VB	12,37
DBEAG-AT-EFOF	3,96
DBEAG-AT-ESOF	3,31
DBEAG-AT-IV	2,97
DSAG-AT-EFOF	4,22
DSAG-AT-ESOF	3,56
DSAG-AT-IV	3,22
P-P12+S-P12-VM+DBEAG-AT-IV	15,75
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV	16,40
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-EFOF	17,00
P-L12+S-P12-VM+DSAG-AT-ESOF	16,35
REG	0,09
REC	0,45
REC+REG	0,66
LED	0,34
LEDC	0,43
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + REC	20,05
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + REC +LED	23,65
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + REC +LEDC	24,80
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + REC +LEDC+REG	27,22
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + REG	17,42
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + LEDC	19,66
P-P12+S-P12-VM+DSAG-AT-IV + REC+REG	21,57

Tabella 3. 24: Simple pay back dei principali pacchetti di misure considerati.

3.5 Analisi economia mediante Simple Pay Back

La metodologia del Cost-optimal ha fatto emergere che l'intervento REC+REG rappresenta il punto di minimo con riferimento al costo globale; tuttavia tra i punti che appartengono alla curva che unisce le possibili soluzioni di ottimo c'è anche il punto rappresentativo dell'intervento sull'impianto di illuminazione, caratterizzato da un costo globale inferiore rispetto al reference building e con un buon risparmio energetico. Pertanto si è ritenuto opportuno effettuare anche un'ulteriore analisi per evidenziare in maniera più chiara la convenienza economica degli interventi proposti.

Un metodo semplice per una indicazione immediata della convenienza economica dell'investimento è quello di valutare il numero di anni necessari affinché i risparmi conseguiti eguagliino il sovraccosto d'investimento iniziale con il parametro definito Simple Pay Back period (SPB). Esso rappresenta il numero di anni necessario per il ritorno dell'investimento, ed è definito dal rapporto tra il sovraccosto iniziale e il risparmio annuo nei costi di esercizio.

Tale metodo può essere usato per effettuare una preselezione delle possibili alternative tecniche in quanto il numero di anni impiegato a recuperare l'investimento può essere discriminante nell'accettazione di un progetto; tuttavia esso non fornisce alcuna indicazione sulla redditività dell'investimento in quanto non va oltre il tempo di rimborso necessario.

Pertanto a supporto dell'analisi effettuata e illustrata precedentemente con metodo dettagliato, si è ritenuto opportuno utilizzare anche questo approccio.

Nella figura seguente, per ciascuno degli scenari già analizzati, si riporta il calcolo del SPB.

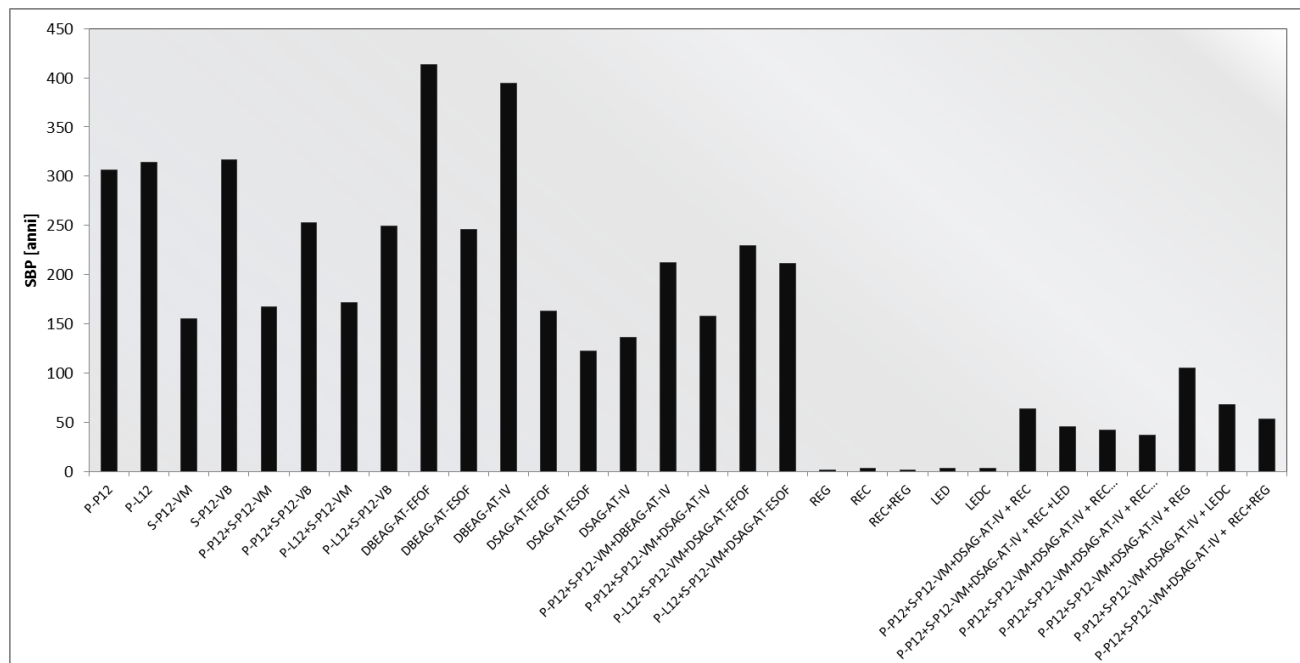


Figura 3. 4: Analisi del SPB per i diversi interventi

Conclusioni e raccomandazioni

La presente relazione descrive i risultati dell'audit energetico *del I edificio Polifunzionale dell'Università degli studi del Molise*, e l'analisi di alcuni interventi di efficienza energetica volti al miglioramento delle prestazioni dell'edificio e delle condizioni di comfort indoor degli occupanti.

L'approccio metodologico per la redazione dell'audit in oggetto è sviluppato in accordo alla normativa vigente mediante la raccolta della documentazione tecnica necessaria, la misura puntuale di alcuni parametri di interesse e il monitoraggio. Attraverso l'audit energetico sono state reperite le necessarie informazioni relativamente a:

- caratteristiche termofisiche dell'involucro opaco e trasparente (audit d'involucro associato a misure in opera della conduttanza termica degli elementi edilizi e termografia);
- tipologia, profili di funzionamento e di regolazione dell'impianto di climatizzazione;
- destinazione d'uso degli ambienti, tipologie di apparecchiature elettriche installate e la loro modalità di utilizzo.

La fase di audit ha richiesto misure in situ, per stimare i parametri che condizionano significativamente i flussi energetici e dunque misure di parametri che definiscono il comfort ambientale; misure sull'involucro; misure sull'impianto; misure climatiche esterne. In dettaglio, la procedura di monitoraggio messa in atto ha riguardato misure puntuali effettuate con monitoraggi ambientali di breve periodo, utilizzando strumentazione portatile o removibile ma anche l'elaborazione di dati disponibili relativi ad acquisizioni su lungo periodo compatibilmente con i tempi posti per la realizzazione dell'attività. Con le misure effettuate dei parametri ambientali indoor sono stati stimati i principali indici di valutazione delle condizioni ambientali all'interno degli edifici in accordo alla normativa EN ISO 7730. L'analisi dei dati e degli indici PMV e PPD, suggerisce che per il livello di temperatura all'interno degli ambienti, sia in regime invernale che estivo (primaverile) è elevato rispetto allo standard ottimale.

Per quanto riguarda la caratterizzazione termo-fisica dell'involucro edilizio le informazioni fornite dall'ufficio tecnico sono state adoperate come fonti per l'audit, in conformità alle prescrizioni di legge in cui si fa esplicito riferimento alla valorizzazione della documentazione già esistente. Ma al fine di aumentare le possibilità di interpretazione dei dati monitorati, si è ritenuto opportuno prevedere per l'edificio anche il monitoraggio dei flussi termici mediante l'utilizzo di un termo-flussimetro in opera e l'acquisizione di immagini termografiche. Per quanto riguarda invece la caratterizzazione degli impianti termotecnici e illuminotecnici asserviti all'edificio, mediante il reperimento di libretti macchine costituenti le centrali, è stata individuata tipologia, potenza e caratteristiche di efficienza. Mentre attraverso accurati sopralluoghi sono stati individuati numero e tipo di terminali installati, la loro collocazione, la presenza di eventuali sistemi di regolazione nonché il regime di funzionamento degli impianti. Per quanto riguarda l'audit delle

zone termiche costituenti l'edificio, attraverso un accurato sopralluogo è stata verificata ed individuata la destinazione d'uso di ogni singolo ambiente interno alla struttura.

Con i dati acquisiti, nella seconda fase del lavoro, è stato costruito il modello numerico del sistema edificio-impianti, definendo collocazione, orientamento, geometria e parametri di attività. Il modello dell'edificio è stato calibrato attraverso gli indicatori proposti da ASHRAE Guideline 14 e M&V Guidelines, sulla base dei consumi storici e su un'attenta analisi del profilo di utilizzo degli impianti e dei sistemi installati che ha condotto ad evidenziare alcune attuali criticità gestionali.

Quindi nell'ultima fase del presente lavoro, per l'edificio in esame, sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello energetico, e tenendo sempre conto delle informazioni rilevate durante i diversi sopralluoghi, sono stati individuati una serie di possibili misure di efficienza energetica, scelte considerando le tecnologie più diffuse sul mercato. In particolare sono stati ipotizzati ed analizzati i seguenti interventi:

- sostituzione delle unità di trattamento aria;
- incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco;
- sostituzione dei serramenti con altri caratterizzati da una maggiore resistenza termica;
- prevedere un sistema di schermatura esterno per i componenti finestrati;
- adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione;
- sostituzione dei chiller esistenti con macchine della stessa potenza ma maggiormente performanti;
- sostituzione/rifacimento dell'impianto illuminotecnico;
- installazione di un recuperatore di calore all'interno delle unità di trattamento aria.

Tenuto conto della volontà dell'Amministrazione di procedere per step successivi in ragione delle disponibilità economiche, nonché del grado di obsolescenza di alcune apparecchiature si è deciso in questa prima fase di intervenire su:

- sostituzione delle unità di trattamento aria;
- sostituzione dei chiller esistenti con macchine della stessa potenza ma maggiormente performanti.

La metodologia utilizzata è quella imposta a livello europeo dal documento cardine per gli obiettivi di efficienza energetica in edilizia: la Direttiva 2010/31/UE, "Energy Performance of Buildings, EPBD- recast" del 19 maggio 2010. Tale direttiva ha richiesto agli Stati membri di adottare, a livello nazionale o regionale, una metodologia di calcolo della prestazione energetica degli edifici basata sull'analisi del ciclo di vita economico e che i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici siano definiti in un'ottica di raggiungimento dei livelli ottimali in funzione dei costi. Il livello di prestazione energetica ottimale in funzione dei costi (cost optimal level of energy performance) è la quantità di energia necessaria per il soddisfacimento del fabbisogno energetico di un edificio che richiede il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio stesso.

In totale quindi, per l'edificio in oggetto sono stati analizzati 31 misure/pacchetti di misure di efficienza energetica. Il costo globale di ciascuna di queste è stato calcolato attraverso l'analisi macroeconomica utilizzando come riferimento la norma UNI EN 15459 del 2008: Prestazione energetica degli edifici -

Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici. Il costo globale dunque è stato valutato in accordo alle indicazioni fornite dall'ufficio tecnico sul costo dell'investimento e il costo per le emissioni di gas a effetto serra. Il periodo di calcolo per l'applicazione di tale metodologia è stato scelto pari a 20 anni ed è stata fatta un'analisi di sensibilità rispetto ai principali parametri economici utilizzati.

Per ogni misura o pacchetto di misure pertanto, è stata calcolata l'energia primaria richiesta per tutti gli usi connessi all'edificio (riscaldamento, raffrescamento, usi elettrici, illuminazione, produzione di acqua calda sanitaria) e il costo globale. Successivamente sono stati calcolati il risparmio di energia primaria, le emissioni evitate in termini di anidride carbonica equivalente e la variazione di costo rispetto all'edificio nel suo stato di fatto. La successiva fase della metodologia del Cost-Optimal prevede la derivazione del livello ottimale in funzione dei costi della prestazione energetica; per cui essa prevede il confronto tra il costo globale calcolato per le diverse misure e pacchetti di misure di efficienza energetica ipotizzate. Analizzando la curva di costo, per il tasso di interesse reale del 3%, è stato riscontrato che l'edificio nello stato di fatto attuale, escludendo dalle considerazioni la misura con l'installazione del vetro elettrocromico, è caratterizzato dal più alto fabbisogno, 166 kWh/m², e un costo globale pari a circa 183 €/m².

La combinazione di misure con il costo più basso è quello che prevede, l'installazione di recuperatori di calore all'interno delle unità di trattamento aria presenti e l'adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione attraverso l'installazione di una sonda per la regolazione della temperatura di mandata dell'*UTA primario* e di opportuni sistemi di controllo nei singoli ambienti (termovalvole e termostati). Tale misura garantisce il miglior compromesso tra costi e risparmio di energia primaria per gli interventi considerati, infatti prevede un fabbisogno complessivo di energia primaria di circa 132 kWh/m² comportando una riduzione complessiva del fabbisogno energetico di circa il 21 % rispetto all'attuale stato di fatto, ciò al fronte di un costo globale pari a circa 164 €/m².

Inoltre, gli interventi sono stati confrontati anche in termini di tempo di ritorno dell'investimento, non attualizzato (SPB-Simple pay back). Il calcolo del SPB ha dimostrato che l'intervento REC+REG si ripaga in meno di due anni mentre l'intervento di sostituzione dei corpi illuminanti e del sistema di controllo si ripaga in circa 3 anni.

Documenti di riferimento

- Commission of the European Communities. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: 20 20 by 2020, Europe's climate change opportunity. COM (2008) 30, 23 Gennaio 2008.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: I Principi Fisici di Base. Disponibile online (www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/italian/ar4-wg1-spm.pdf)
- European Parliament. European Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC, 25 Ottobre 2012.
- European Parliament. European Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings, 16 Dicembre 2002.
- European Parliament. European Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast), 19 Maggio 2010.
- Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 19 Agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia (G.U. n. 222 del 03.09.2005).
- Parlamento della Repubblica Italiana. Legge del 3 Agosto 2013, n.90. Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale (GU Serie Generale n.181 del 3-8-2013).
- CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI/TR 11428: Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica, 2011.
- CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16247-1: Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali, 2012.
- ISO - International Organization for Standardization. ISO 9869: Thermal insulation, Building elements, In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, 1994.
- UNI 10824-1:2000 "Prove non distruttive – Termografia all'infrarosso – Termini e definizioni".
- UNI EN 473:2008 "Prove non distruttive – Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive – Principi generali".
- ISO 9712 – Third edition – 2005 "Non-destructive testing – Qualification and certification of personnel".

- UNI EN 13187:2000 “Prestazione termica degli edifici – Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi – Metodo all’infrarosso”.
- UNI 9252:1988 “Isolamento termico – Rilievo e analisi qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri degli edifici – Metodo della termografia all’infrarosso”.

Indice

Premessa	1
1. 1 Procedura per la realizzazione di audit energetico e metodologia del Cost-Optimal	3
1.1 Diagnosi energetica	3
1.2 Metodologia del Cost-Optimal	5
2. Diagnosi energetica del I edificio Polifunzionale	9
2.1 Caratterizzazione termo-fisica dell'involucro edilizio: Audit d'involucro	10
2.1.1 Involucro trasparente	10
2.1.2 Involucro opaco	12
2.2 Descrizione degli impianti termotecnici e illuminotecnici asserviti all'edificio: Audit di impianto	18
2.2.1 Impianti termici	18
2.2.2 Impianti illuminotecnici	25
2.3 Destinazione d'uso e misure dei parametri ambientali interni: Audit delle zone termiche	26
2.3.1 Elaborazione del monitoraggio	32
2.4 Costruzione del modello di simulazione dinamica	56
3. Analisi degli scenari di riqualificazione energetica	59
3.1 Definizione degli interventi di riqualificazione energetica	59
3.1.1 Incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco	60
3.1.1.1 Incremento dell'isolamento termico delle pareti verticali esterne e dei pavimenti verso l'esterno	61
3.1.1.2 Incremento dell'isolamento termico del solaio di copertura	63
3.1.2 Sostituzione dei serramenti e installazione di schermature esterne	65
3.1.3 Adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione	68
3.1.4 Intervento sull'impianto illuminotecnico	69
3.1.5 Installazione di un recuperatore di calore all'interno delle UTA	71
3.2 Misure e pacchetti di misure di efficienza energetica applicati allo stato di fatto	72

3.3 Applicazione della metodologia del Cost-Optimal	74
3.4 Analisi di sensibilità	76
3.4.1 Analisi di sensibilità, tasso di interesse reali pari all'1,5%	77
3.4.2 Analisi di sensibilità, tasso di interesse reali pari all'1,5%	78
3.5 Analisi economia mediante Simple Pay Back	81
Conclusioni e raccomandazioni	83
Documenti di riferimento	86