

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

file

allegato

**CALCOLO AUDIT ENERGETICO
EDIFICIO II POLIFUNZIONALE**

tavola

CIIP

rapp.

Indice

<i>Premessa</i>	3
<i>1. Metodologia di audit energetico</i>	5
<i>2. Diagnosi energetica del II edificio Polifunzionale</i>	8
<i>2.1 Caratterizzazione termo-fisica dell'involucro edilizio: Audit d'involucro</i>	9
<i>2.1.1 Involucro trasparente</i>	10
<i>2.1.2 Involucro opaco</i>	11
<i>2.2 Descrizione degli impianti asserviti all'edificio: Audit degli impianti</i>	16
<i>2.2.1 Impianti termici</i>	16
<i>2.2.2 Impianti illuminotecnici</i>	22
<i>2.2.3 Impianto fotovoltaico</i>	22
<i>3. Costruzione del modello di simulazione dinamica</i>	46
<i>4. Metodologia di analisi degli scenari di riqualificazione energetica</i>	47
<i>5. Analisi degli scenari di riqualificazione energetica per il II edificio Polifunzionale</i>	48
<i>5.1 Definizione degli interventi di riqualificazione energetica</i>	49
<i>5.1.1 Sostituzione dei serramenti e installazione di schermature esterne</i>	50
<i>5.1.2 Rifacimento dell'impianto di illuminazione interna</i>	52
<i>5.1.3 Sostituzione della caldaia tradizionale con una a condensazione</i>	54
<i>5.1.4 Sostituzione del chiller presente con uno caratterizzato da una maggiore efficienza</i>	55
<i>5.1.5 Adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione</i>	56
<i>5.1.6 Installazione di un impianto fotovoltaico</i>	57
<i>5.2 Misure di efficienza energetica applicate allo stato di fatto</i>	58
<i>Appendice</i>	64
<i>Documenti di riferimento</i>	68

Premessa

La presente relazione illustra le attività e i risultati frutto degli approfondimenti sviluppati sul tema della razionalizzazione energetica e ottimizzazione della gestione degli edifici.

Lo studio si articola in due fasi; la prima consiste in un dettagliato audit energetico del *II edificio Polifunzionale*, sede amministrativa e didattica del Dipartimento di Economia dell'Università degli 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 scelta e nella valutazione 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 individuati una serie di possibili misure di efficienza energetica per le quali è stato calcolato il relativo beneficio in termini di risparmio energetico/economico (*riqualificazione energetica*).

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

- **DIAGNOSI ENERGETICA E COSTRUZIONE DI UN MODELLO DI SIMULAZIONE DINAMICA:** caratterizzazione del sistema edificio/impianti; post-processing e organizzazione dei dati; calcolo e verifica indicatori prestazionali; diagnostica.

- ANALISI DEGLI SCENARI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA SOTTO IL PROFILO ENERGETICO ED ECONOMICO: identificazione delle misure di efficienza energetica; calcolo del fabbisogno di energia primaria; calcolo del costo di investimento; determinazione del tempo di ritorno dell'investimento e del valore attuale netto, per ciascun intervento di retrofit ipotizzato.

1. Metodologia di audit energetico

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.

Tale 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.

2. Diagnosi energetica del II edificio Polifunzionale

Il II edificio Polifunzionale, sito in Campobasso (come indicato in *Figura 2.1*), è sede amministrativa e didattica del Dipartimento di Economia dell'Università degli Studi del Molise. Presenta una superficie utile complessiva pari a circa 14901,11 m²; di cui 13048,64 m² costituiscono la sede del Dipartimento di Economia e 1852,47 m² l'aula magna della struttura. L'intero complesso è infatti costituito da due strutture adiacenti, il *Dipartimento di Economia* e l'*Aula magna*, edificate rispettivamente nel 1991 e nel 2001.

Attraverso un censimento preliminare in sito e alle relazioni tecniche disponibili, sono state ricavate tutte le informazioni necessarie in termini di caratterizzazione del sistema edificio/impianti. Per la modellazione degli involucri edilizi, le caratteristiche dimensionali sono state dedotte dagli elaborati digitali, nei quali sono rappresentate le planimetrie di ciascun livello calpestabile, mentre le elevazioni sono state dedotte dai prospetti cartacei nel progetto originale. La caratterizzazione dimensionale e tipologica dei serramenti è stata effettuata attraverso il rilievo degli stessi, al fine di determinare la conformità dello stato di fatto alle tipologie desunte dagli elaborati tipologici forniti.

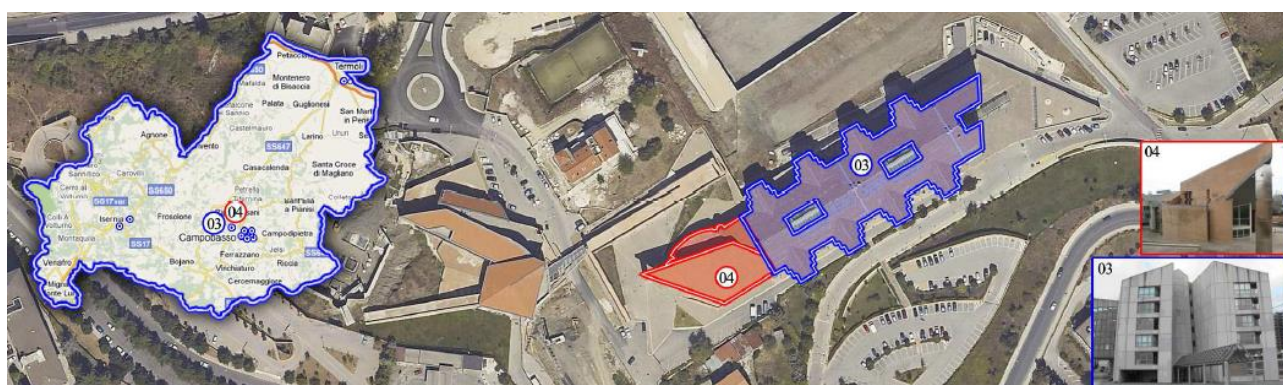


Figura 2. 1: Vista satellitare del II edificio polifunzionale dell'Università degli Studi del Molise

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''				
Attitudine (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.

Il II edificio Polifunzionale, come accennato, è costituito dal *Dipartimento di Economia* e dall'*Aula Magna*, servite, per le esigenze di riscaldamento, dalla stessa centrale termica, mentre la produzione di ACS è gestita da due impianti separati; per il *Dipartimento di Economia* la produzione avviene a partire dall'impianto termico centralizzato, destinato anche al riscaldamento degli ambienti, mentre per l'*Aula Magna* la produzione di ACS avviene mediante boilers elettrici distribuiti.

Tuttavia, dalle indagini effettuate, quest'ultima struttura risulta utilizzata per non più di 15 giorni all'anno, buona parte dei quali interessano le stagioni intermedie durante le quali non risulta necessario l'impiego di sistemi di climatizzazione. Per tale motivo l'*Aula Magna* incide in maniera irrisoria sul consumo complessivo dell'intera struttura, e pertanto, benché si sia ritenuto opportuno caratterizzarla al fine di ricostruire un modello reale ed attendibile dell'intera struttura, per essa non si effettuerà alcuno studio in termini di interventi di riqualificazione.

L'immobile oggetto della presente diagnosi e riqualificazione è invece il *Dipartimento di Economia*. Questa presenta una pianta approssimativamente rettangolare e si sviluppa su diversi livelli; un piano completamente interrato, in parte adibito ad autorimessa ed ospitante, insieme a buona parte del piano terra, i locali tecnici e la centrale termica della struttura. I piani primo, secondo, terzo, quarto e quinto ospitano invece tutte le aule e gli uffici della struttura stessa. L'ultimo livello è dato dal sottotetto, in cui sono allocate le unità di trattamento aria e buona parte degli ausiliari dell'impianto di climatizzazione estiva ed invernale della struttura.

Si escludono ovviamente dall'analisi i locali tecnici, la centrale termica e il sottotetto, che non risultano serviti da impianti termotecnici, e per i quali non è quindi possibile valutare un fabbisogno di energia. Pertanto, analogamente a quanto fatto per l'*Aula Magna*, è stato necessario caratterizzarli per ricostruire un modello reale e attendibile dell'edificio, ma per essi 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 8:00 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, oltre agli elaborati grafici originali (piante sezioni e prospetti) relativi all'edificio, la descrizione stratigrafica di pareti e solai.

La superficie utile dell'edificio oggetto di analisi è circa pari a circa 13049 m², di cui quella netta condizionata risulta essere circa 12280 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)	11092	3589,18	2080,60	3408,89	2013,66
Superficie opaca fuori terra (m ²)	10171,13	3108,09	2038,03	31709,1	1854,83
Superficie trasparente (m ²)	1705.12	2108.09	2038.03	3170.17	1854.83
Rapporto opaco tot/finestrato	15.37	14.39	19.61	13.19	16.43
Rapporto opaco/finestrato	16.76	16.62	20.02	14.19	17.84

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

2.1.1 Involucro trasparente

I componenti finestrati dell'edificio oggetto di studio si differenziano nella forma e nelle dimensioni, ma sono essenzialmente riconducibili a due tipologie.

La prima tipologia (*Figura 2.2 A*) interessa esclusivamente parte di una parete esterna (esposizione nord), realizzata in vetrocemento, in particolare parte dell'atrio al piano terra e parte del corridoio al piano primo.

La seconda tipologia (*Figura 2.2 B e 2.2 C*) di componente finestrato, riguarda di fatto tutte le finestre e le porte finestre dell'edificio. Tali serramenti si compongono di un vetro camera chiaro e telaio 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 sia per le porte che 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 (*Figura 2.2 C*).

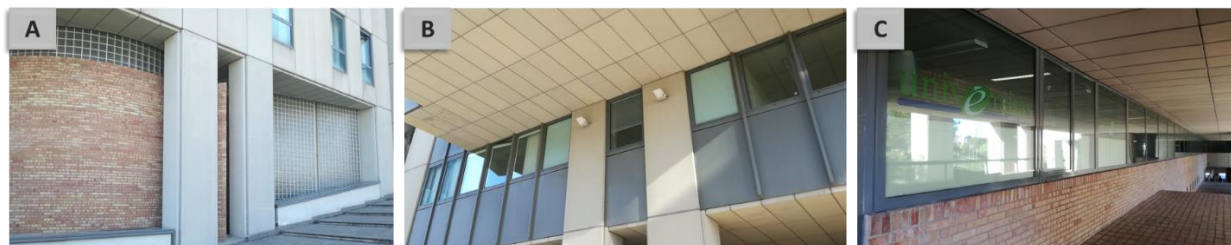


Figura 2. 2: Tipologia di componenti finestrati dell'edificio.

La *Tabella 2.3* riporta, per le tipologie di componente finestrato sopra indicate, i valori della trasmittanza complessiva di vetro e telaio ricavati dalla documentazione tecnica fornita e operando un confronto con materiali simili, per caratteristiche e proprietà, a quelli individuati all'interno dell'edificio.

Tipologia componente	U (W/m ² K)
Vetrocemento	2,30
Pareti vetrate e porte	3,67
Altri componenti finestrati	2,80

Tabella 2. 3: Trasmittanza componenti finestrati.

Inoltre, nelle zone quali aule minori, uffici e sale riunioni è stata censita, come sistemi di schermatura, un sistema interno di tende a lamelle verticali in tessuto rigido chiaro; mentre in altre zone come corridoi aule maggiori e punto ristoro è stata verificata la totale assenza di sistemi schermanti.

2.1.2 Involucro opaco

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.

Inoltre, al fine di aumentare le possibilità di interpretazione dei dati, 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.

Rilevamento in opera mediante termografia

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 ricorso alla termografia ad infrarossi. In particolare, la termocamera utilizzata in questa campagna di indagini la FLIR E8 (*Figura 2.3*); le cui caratteristiche tecniche sono le seguenti:

- Risoluzione IR: 320 x 240 pixels;
- Sensibilità: $<0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.11\text{ }^{\circ}\text{F}$) / $<60\text{mK}$;
- Campo visivo: $45^{\circ} \times 34^{\circ}$;
- Distanza minima di messa a fuoco: 0,5 m;
- Risoluzione spaziale (IFOV): 2,6 mrad;
- Rilevatore: FPA microbolometro non raffreddato;
- Intervallo spettrale: 7,5 – 13 μm ;
- Display LCD a colori da 3’’ 320 x 240;
- Intervallo di temperatura dell'oggetto: da -20°C a $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Accuratezza: $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$ della lettura, per la temperatura ambiente da 10 a 35°C e temperatura dell'oggetto superiore a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 2. 3: Termocamera impiegata.

Le analisi termografiche sono state svolte in regime invernale (15 novembre 2017), in condizioni di cielo coperto e sono state condotte sui prospetti della struttura per lo più a stabilire la presenza di dispersioni e ponti termici. Tali valutazioni sono, inoltre da ritenersi di carattere puramente qualitativo, motivo per il quale lo strumento non è tarato con una ϵ relativa al singolo materiale ma bensì rivolto a prospetti caratterizzati da

materiali diversi; pertanto, le temperature riportate sono solo indicative. 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.

A scopo esemplificativo, nella *Figura 2.4*, sono riportate alcune immagini all'infrarosso riferite al prospetto nord-ovest.

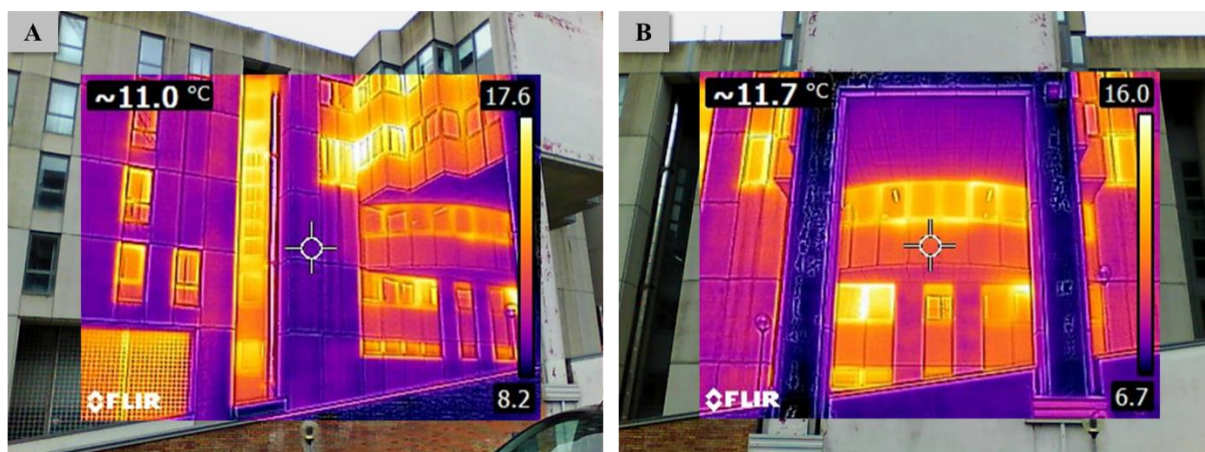


Figura 2. 4: Immagini IR e fotografiche dei componenti edilizi esposti. A) e B) prospetto nord-ovest.

Dalle figure non risultano visibili in maniera evidente ponti termici (travi, pilastri), mentre risultano invece evidenti le 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. Inoltre, nella *Figura 2.4 B*, risultano evidenti anche le dispersioni termiche in corrispondenza delle sotto-finestre, costituito infatti da una stratigrafia diversa dal resto del prospetto, caratterizzata da una minore resistenza termica.

Misura in opera della trasmittanza

Per valutare la corrispondenza delle stratigrafie e dei valori di trasmittanza calcolati con quelli reali in opera dell'edificio, per una parete campione (parete esterna intonaco), che si può considerare rappresentativa dell'intero edificio, 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 ThermoZig*, strumento che presenta una sensibilità, relativamente al flusso termico, pari a $0,01 \text{ W/m}^2$ e un'accuratezza della misura maggiore del 5%. Il sistema di acquisizione completo prevede la dislocazione di uno o più nodi di misura, dotati di opportuni sensori di temperatura e flusso termico, e di una datalogger predisposto per operare in una rete wireless (*Figura 2.5*).



Figura 2. 5: Termoflussimetro impiegato.

La misura mediante termo-flussimetro, è stata effettuata nel periodo tra il 5 dicembre ed il 19 dicembre, così che, essendo 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 1800s. 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. A tale scopo, la termografia 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, e così individuare un punto idoneo per la misura mediante termoflussimetro. In riferimento a ciò, si riporta, in *Figura 2.6*, l'immagine termografica dell'elemento opaco scelto per la misura della trasmittanza in campo. In particolare, si tratta della "parete esterna intonaco", rappresentativa della struttura verticale analizzata e localizzata nell'ufficio servizio informatici al quinto piano, con esposizione sud-est ma opportunamente ombreggiata. In particolare, in figura viene evidenziato il punto esatto del posizionamento del termoflussimetro, scelto poiché ha mostrato una temperatura superficiale sostanzialmente omogenea.

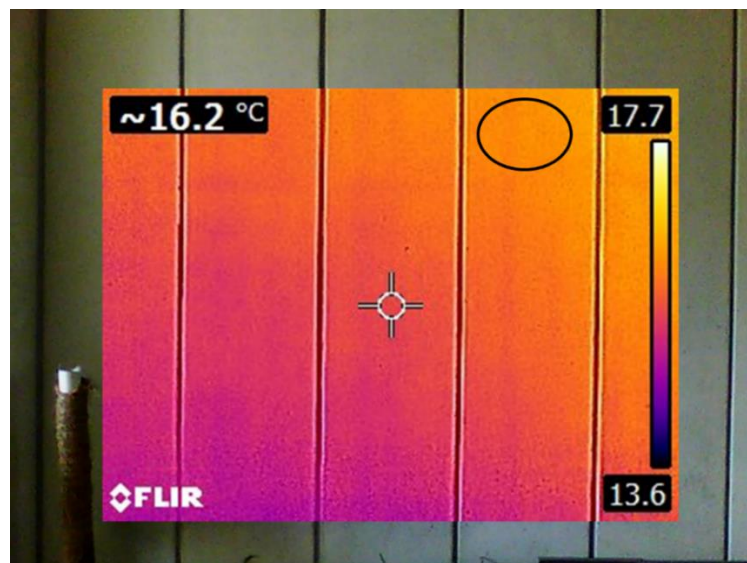


Figura 2. 6: Immagine IR e indicazione del punto per la misura della trasmittanza.

Come accennato, la parete in esame è la “*parete esterna intonaco*”, che presenta una struttura a cassetta con mattoni forati, intercapedine d’aria e polistirene, ed è rivestita internamente da uno strato di intonaco di calce e cemento, mentre esternamente presenta un blocco pieno, per uno spessore complessivo di circa 61 cm. La stratigrafia è descritta nel dettaglio nella *Figura 2.7*, dove vengono mostrate anche le immagini relative al posizionamento dei sensori all’interno (A) e all’esterno (B).

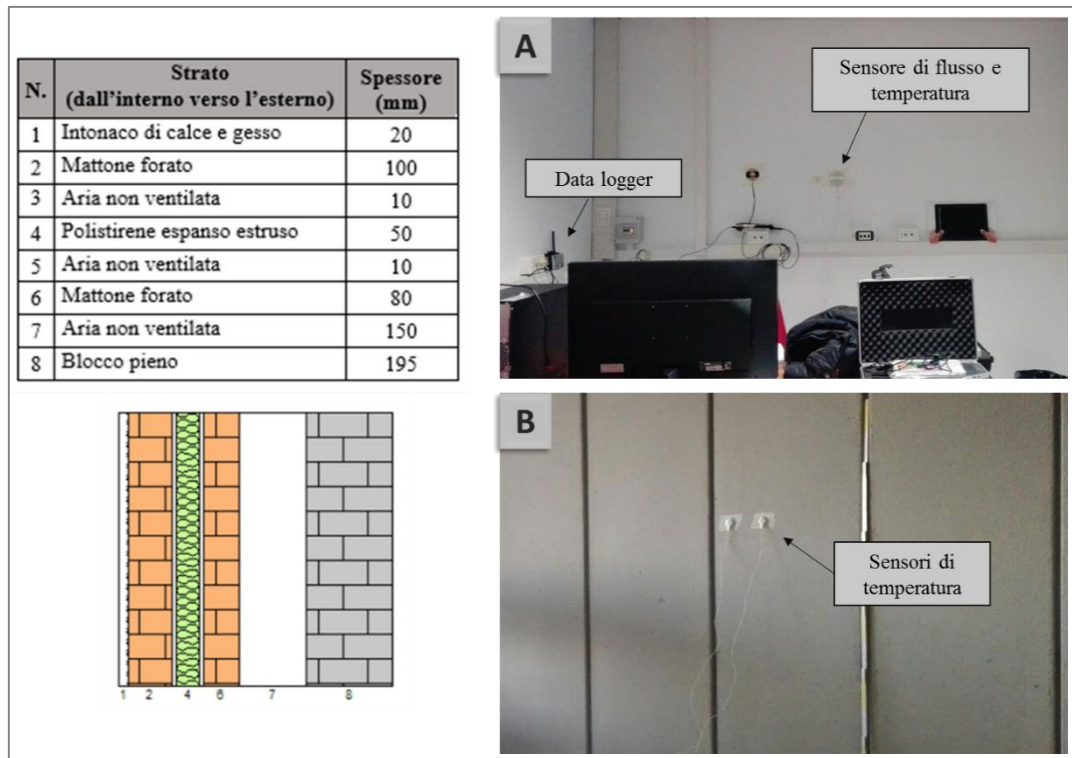


Figura 2. 7: Sensori in opera per la misura della trasmittanza sulla parete verticale esterna individuata.

Il periodo di rilevamento è stato, come già affermato, di circa 12 giorni, e con un intervallo di acquisizione di 1800s si è giunti ad ottenere 668 misure del valore della conducibilità, della temperatura interna, della temperatura esterna; i valori registrati sono stati elaborati secondo quanto prescritto dalla normativa tecnica. In *Figura 2.8* è mostrato l’andamento della trasmittanza termica per il periodo di monitoraggio in oggetto.

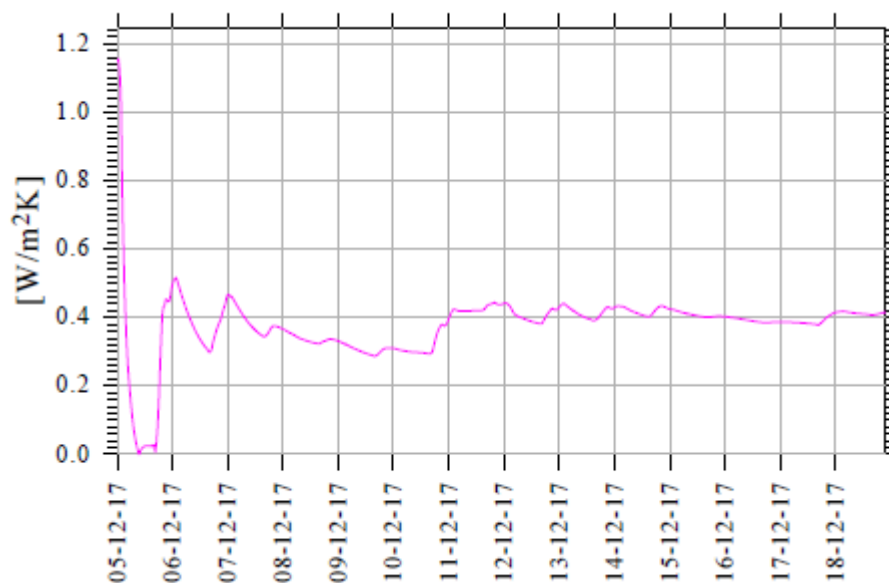


Figura 2. 8: Andamento della trasmittanza termica durante il periodo di monitoraggio indicato.

Il valore misurato della trasmittanza oscilla intorno a un valore di regime che è pari a $0,415 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

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 ($\text{W/m}^2\text{K}$)	Trasmittanza periodica ($\text{W/m}^2\text{K}$)
Parete esterna intonaco	0,615	0,415	0,035
Parete sottofinestra	0,204	0,446	0,346
Parete mattoni a vista	0,310	0,428	0,129
Parete confinante aula magna	0,020	3,460	0,498
Partizioni interne	0,39	0,963	0,018
Solaio interpiano	0,580	0,427	0,050
Tetto inclinato	0,466	0,529	0,498
Tetto aula magna	0,275	0,337	0,131

Tabella 2. 4: Tabella 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.

2.2 Descrizione degli impianti 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, cercando di individuare tipologia, potenza termica e caratteristiche di efficienza. Inoltre, sono stati condotti una serie di sopralluoghi 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 ed esterno dell'edificio e l'impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

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 di circa il 95% della superficie netta climatizzata. Per la restante porzione di superficie (costituita dalle 6 aule presenti nella parte centrale dell'edificio), 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, sito al livello seminterrato della struttura. A tale livello risultano presenti i boilers per la produzione

e l'accumulo di acqua calda sanitaria, collocati in un locale ad essi dedicato. Il fluido termovettore "acqua refrigerata" viene prodotto dalla centrale frigorifera posta all'esterno, in una zona annessa all'edificio. Le unità di trattamento dell'aria invece, si trovano nel sottotetto della struttura. In *Figura 2.9* vengono evidenziate le posizioni dei predetti sistemi rispetto al fabbricato.



Figura 2. 9: 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 7:00 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 1 luglio al 31 agosto dal lunedì al venerdì, dalle ore 07:00 alle ore 18:00 (escludendo il periodo delle vacanze estive);
- per la **sola ventilazione**: 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 IVAR da 1.047 kW, in parallelo e alimentate a gas naturale (*Figura 2.10*).



Figura 2. 10: Caldaie asservite all'edificio.

Per quanto riguarda la produzione di acqua refrigerata, l'edificio è dotato di due macchine frigorifere, mostrate in *Figura 2.11*, caratterizzate da una resa frigorifera di 850 kW.



Figura 2. 11: Macchine frigorifere allocate in una posizione adiacente all'edificio.

Le macchine della centrale termo-frigorifera, sono poi interfacciate con le cinque unità di trattamento aria (*Figura 2.12*) che servono l'edificio; di queste, le due denominate “*UTA primario*” dovrebbero provvedere a soddisfare solo le esigenze di rinnovo e qualità dell'aria, mentre i terminali idronici presenti in ambiente provvedono a bilanciare il carico termico sensibile (sistema di tipo misto). Le altre unità di trattamento dell'aria sono invece deputate anche a soddisfare le richieste di riscaldamento e raffrescamento, configurando, così, un impianto a tutt'aria.



Figura 2. 12: Unità di trattamento dell'aria installata nel sottotetto della struttura.

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

- le “UTA primario” provvedono al trattamento dell'aria di uffici, buona parte delle aule, zone di circolazione e zona ristoro;
- l'“UTA aula S-sala riunioni” provvede alla climatizzazione dell'aula S e dell'adiacente sala riunioni poste nella zona centrale del terzo piano;
- le “UTA aule N-P” e “UTA aule Q-R” provvedono alla climatizzazione rispettivamente una delle aule cieche N e P che si sviluppano tra il primo e il secondo piano e l'altra delle aule Q ed R che si sviluppano tra il secondo e il terzo piano.

Le UTA elencate sono dotate di una batteria di riscaldamento, di una di raffrescamento e una di post-riscaldamento alimentate dalle centrali termiche e frigorifere; sono inoltre dotate di un umidificatore a pacco evaporante, che però non risulta essere in funzione.

Per soddisfare le richieste di acqua calda sanitaria dell'intero immobile, sono presenti due bollitori, collegati alla centrale termica, che fungono anche da accumulo (Figura 2.13). Hanno una capacità di 1.500 l, ma uno solo di essi risulta funzionante.



Figura 2. 13: Accumulo per ACS.

Per quanto riguarda i terminali 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 stati individuate diverse situazioni per il condizionamento dei locali:

- dove si ha un sistema di tipo misto, per zone quali uffici, aule studio, buona parte delle aule, zone di circolazione e zona ristoro, sono presenti diffusori o bocchette a soffitto, per l'immissione dell'aria, e fan coil;
- nei servizi igienici, gli unici terminali sono fan coil;
- negli ambienti collocati nella zona centrale della struttura, ovvero, aula P, aula N, aula Q, aula R, aula S e sala riunioni, sono presenti solo bocchette di immissione e griglie di estrazione;
- le sole aule A e B al primo piano, sono servite da sistemi aerotermini WOLF;
- infine, sono stati censiti 3 split collocati all'interno degli uffici del rettorato al quinto piano in aggiunta al sistema misto sopraindicato, e un multi-split con due unità interne serve la sala espositiva al secondo piano.

Complessivamente, oltre alle innumerevoli bocchette di immissione dell'aria dislocate in quasi ogni locale dell'edificio, sono stati censiti circa 370 fancoil SEVESO.

Nel corso dei diversi sopralluoghi effettuati, per i terminali presenti in ambiente, è stata effettuata una misura puntuale dell'aria da essi immessa. È emerso che, per la giornata 15/12/2017, la temperatura dell'aria immessa dai sistemi ad aria risulta essere mediamente pari a 27 °C; mentre per la giornata del 17/01/2018, gli stessi immettono aria ad una temperatura compresa tra 28 e 31 °C, come mostrato nelle immagini termografiche riportate in *Figura 2.14*. Si sottolinea quindi che, non essendo in alcun modo possibile fare una regolazione della temperatura di mandata, nel caso delle “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.

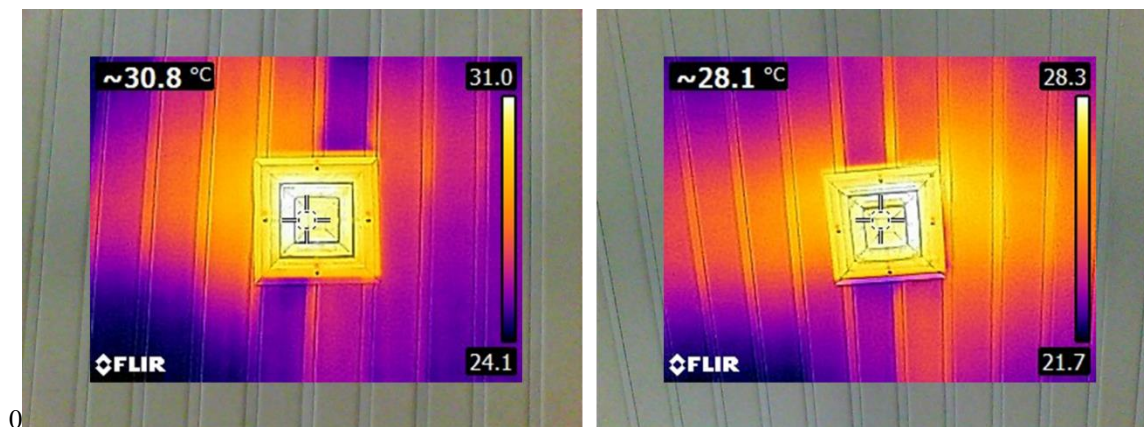


Figura 2. 14: Immagini termografiche dei terminali aeraulici.

Per quanto riguarda i terminali ad acqua, sempre durante il sopralluogo avvenuto il 17/01/2018, è risultato, a mezzo di indagini termografiche, che la temperatura massima dell'aria da essi immessa va circa 36 a circa 48 °C, come mostrato nelle immagini termografiche mostrate in *Figura 2.15*.

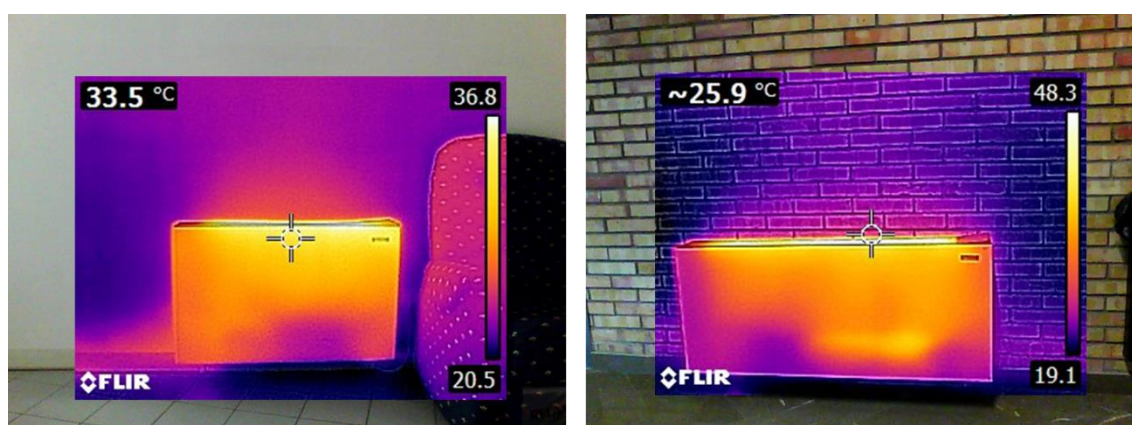


Figura 2. 15: Immagini termografiche dei terminali di tipo fan-coil.

Per quanto riguarda, infine, il sottosistema di regolazione, a livello centrale, il gruppo di termoregolazione è pilotato dalla temperatura esterna e opera sulla temperatura dell'acqua in uscita dal generatore dell'impianto termico (caldaie). Mentre a livello di singolo ambiente, durante i diversi sopralluoghi effettuati, si è riscontrata la totale assenza di sistemi di regolazione negli ambienti serviti da un impianto di tipo a tutt'aria, mentre per gli ambienti serviti da un impianto di tipo misto, la termoregolazione a tale livello avviene solo attraverso un'azione manuale ON-OFF sui ventilconvettori presenti.

Come si evince dalle misure effettuate in campo, il valore di set point negli ambienti (almeno per il periodo invernale) non è stato sempre costante, e in generale risulta superiore al valore di 20 °C prescritto dalla normativa vigente.

2.2.2 Impianti illuminotecnici

I dispositivi di illuminazione presenti nell'immobile, installati negli spazi comuni e negli uffici, sono lampade a scarica fluorescenti in corpi da singola lampada da 36W. 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 5W/m².

2.2.3 Impianto fotovoltaico

Sulla copertura dell'edificio in esame è presente un impianto fotovoltaico da 19,4 kWp. In particolare, attraverso la consultazione della documentazione tecnica disponibile, relativa al progetto dell'impianto, sono state ricavate tutte le informazioni utili alla modellazione dello stesso. Risultano installati 162 moduli solari da 120 Wp, divisi in 6 stringhe e complessivamente occupano una superficie pari a circa 160 m², al netto dello spazio occupato dai sistemi di ancoraggio. I pannelli sono posizionati parallelamente alla superficie del tetto, ovvero a 19° rispetto al piano orizzontale, e sono orientati a sud-est (150° rispetto al nord). Le stringhe sono collegate ad un gruppo di conversione DC/AC SUNWAY-T trifase in bassa tensione da 25 kWp.

Quindi, attraverso l'ausilio di un software per la progettazione di impianti solari fotovoltaici, è stata stimata la producibilità totale mensile dell'impianto, riportata in Figura 2.16. Ciò sulla base dei dati di irraggiamento solare, disponibili all'interno del software stesso, per la città di Campobasso.

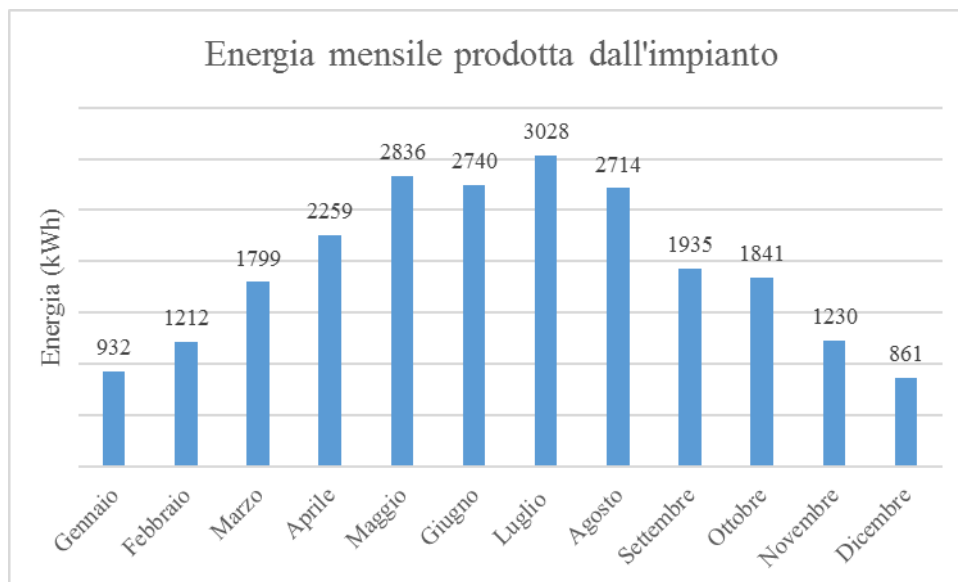


Figura 2. 16: Energia mensile stimata prodotta dall'impianto fotovoltaico.

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 2.5 riporta le zone termiche per ciascun piano.

Piano	Zone termiche
-1	Autorimessa
0	Presidio/Portineria, Locali tecnici
1	Presidio/Portineria, Bar, Aule, Servizi, Depositi
2	Uffici, Aule, Servizi
3	Aule, Uffici docenti, Aula studio, Servizi
4	Uffici docenti, Aule, Servizi
5	Uffici docenti, Rettorato, Servizi

Tabella 2. 5: 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 2.5*, 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, la *Figura 2.17* descrive le principali caratteristiche degli ambienti in cui sono state effettuate le misure di umidità, temperatura e illuminamento.

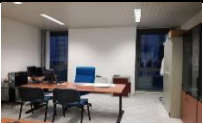
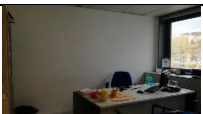
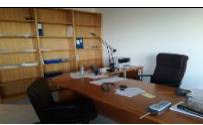



Destinazione	Piano	Esposizione	Superficie	Componenti finestrati	Terminali	Immagine
Ufficio amministrativo	III	Nord	44 m ²	2	1 Fan coil 1 Bocchetta	
Ufficio 1	III	Sud-ovest	13 m ²	1	1 Fan coil 1 Bocchetta	
Ufficio 2	IV	Est	80 m ²	Pareti est Finestra sud	2 Fan coil 1 Bocchetta	
Aula Q	III	-	98 m ²	Lucernaio	6 Bocchette 2 Griglie	
Aula S	III	-	110 m ²	-	8 Bocchette	
Aula 160 posti	III	Nord-est	230 m ²	14 Parete vetrata	4 Fan coil 2 Bocchette	

Figura 2. 17: 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. La *Tabella 2.6* a seguire, riassume le principali grandezze monitorate.

Simbolo	Grandezza	Tempo di campionamento	Tipo di misura
t_a (°C)	Temperatura dell'aria	5 minuti	Continuata (08/11 – 21/11)
UR (%)	Umidità relativa	5 minuti	Continuata (08/11 – 21/11)
E (Lux)	Illuminamento	10 minuti	Puntuale (08/1 e/o 15/11 o 22/11)

Tabella 2. 6: Grandezze monitorate.

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 disuniformità 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 8 novembre al 21 novembre, 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 2.18*. 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.

	Umidità	Temperatura
Campo di misura	0-100%	-20 a +70°C
Risoluzione	0.1%	0.1°C
Precisione	±2%	±0.5°C

Figura 2. 18: Data logger Testo 177-H1.

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 2.7*) 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. 7: 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.

I valori di illuminamento interni sono stati misurati con un luxmetro le cui caratteristiche tecniche sono specificate nel prospetto in *Figura 2.19*.



Figura 2. 19: Caratteristiche del luxmetro.

Analisi dei parametri descrittivi delle condizioni indoor

Come fin ora illustrato, in alcuni ambienti campione sono stati misurati 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 AMMINISTRATIVO

L'ufficio in oggetto (*Figura 2.20*) 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 fan coil e all'immissione di aria climatizzata attraverso una bocchetta.

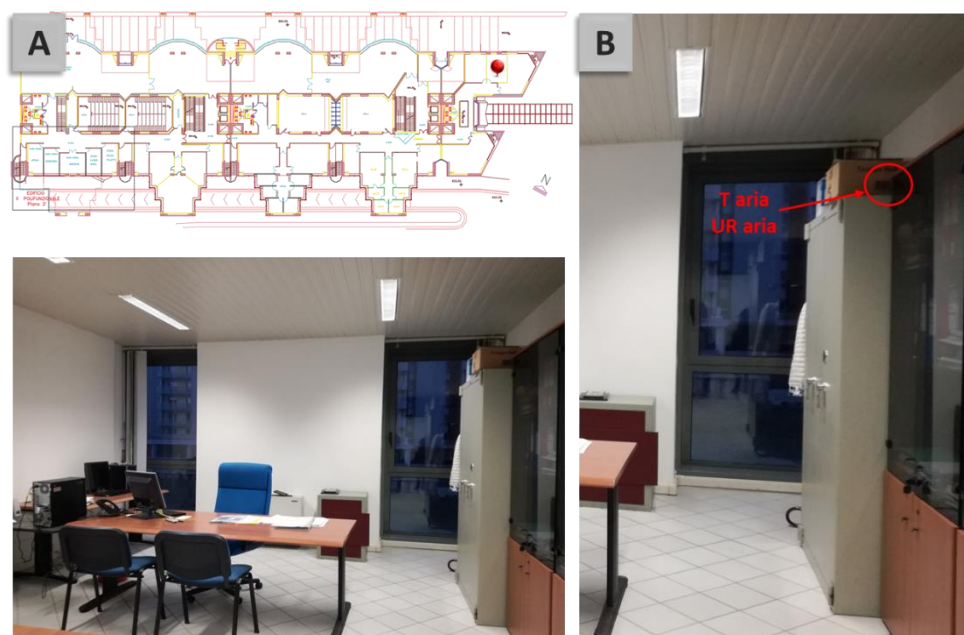


Figura 2. 20: Ufficio amministrativo: a) posizione; b) sensori di temperatura e umidità in opera (8/11 – 21/11).

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (08/11 – 21/11) è riportato nelle due figure seguenti (Figura 2.21 e Figura 2.22), in cui è evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità (rispettivamente in azzurro e in rosa) per assicurare le condizioni di comfort indoor e il valore medio minimo e massimo.

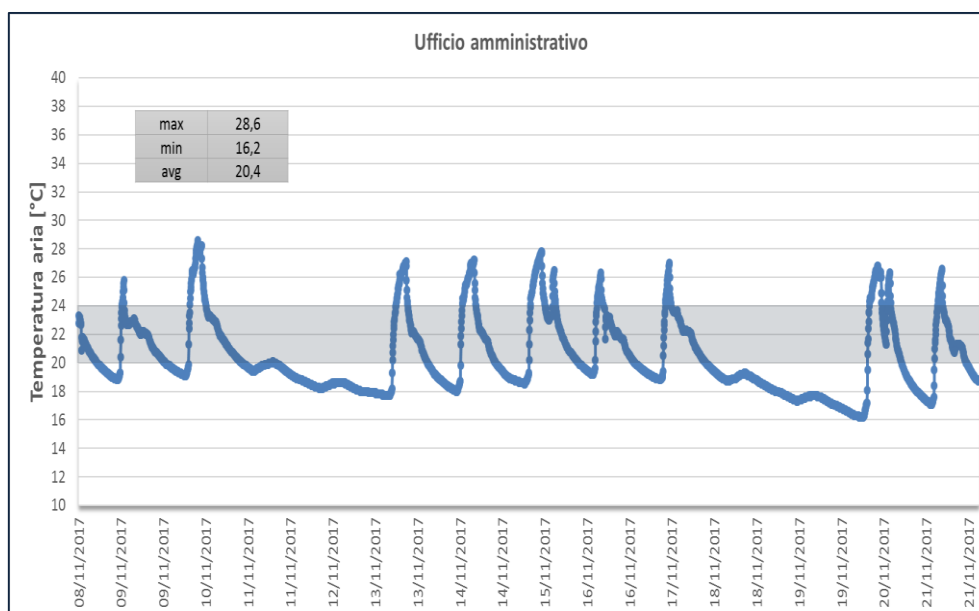


Figura 2. 21: Ufficio amministrativo: andamento della temperatura interna 08 - 21 novembre.

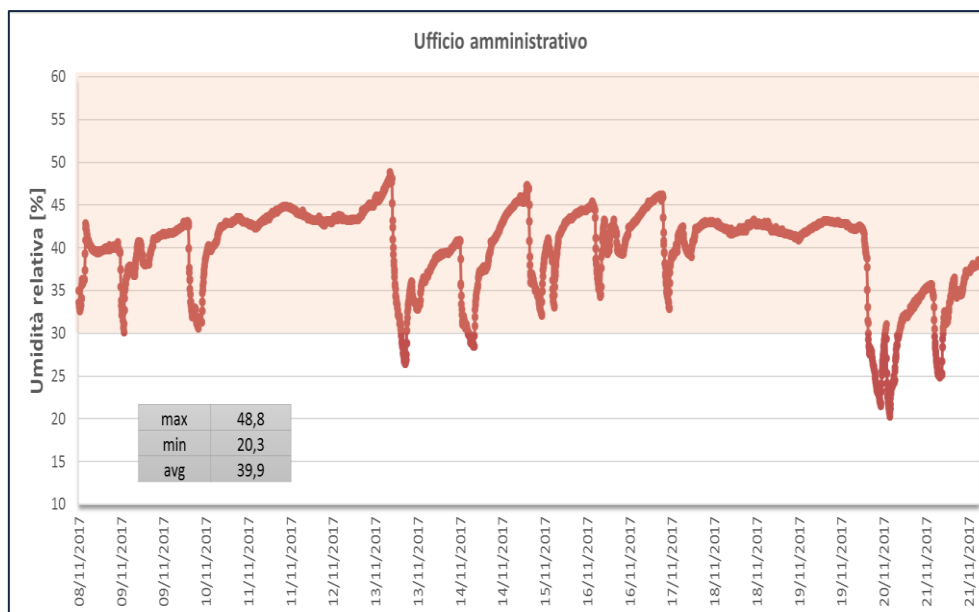


Figura 2. 22: Ufficio amministrativo: andamento dell'umidità 08 - 21 novembre.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 20,4 °C, con un valore massimo intorno a 28,6 °C. La temperatura interna, quindi supera anche di 8 °C il valore di temperatura di set-point indicato dalla normativa vigente (20 °C) sul risparmio energetico. Il valore di umidità relativa d'altro canto si mantiene al disotto della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente ad un valore circa pari al 40%.

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 come quello analizzato; sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (15 novembre) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 24,71 °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 37,4 %, 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 1,2 met. Globalmente tali condizioni del microclima non sono 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 invece essere pari a 0,6.

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 73 cm di altezza, e in riferimento a due posizioni:

- 1) scrivania porta (*Figura 2.23*);
- 2) scrivania finestra (*Figura 2.24*);

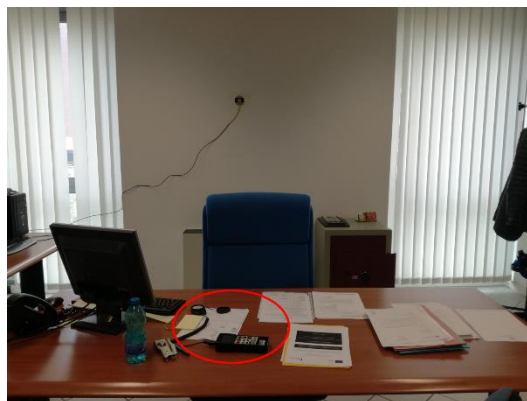
nelle seguenti condizioni di misura:

- Desk 1: misura nella postazione individuata, dopo il tramonto e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 6 lampade fluorescenti (36W);
- Desk 2: misura nella postazione individuata, in condizioni di cielo coperto, avendo aperto le tende e avendo spento il sistema di illuminazione;
- Desk 3: misura nella postazione individuata, in condizioni di cielo coperto, avendo chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione.



Posizione 1		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	08/11/2017 17:04	306	284	304
Desk 2	15/11/2017 15:08	65	38	51
Desk 3	15/11/2017 15:23	384	363	381

Figura 2. 23: Ufficio amministrativo: misura di illuminamento in posizione 1.



Posizione 2		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	08/11/2017 17:10	306	302	304
Desk 2	15/11/2017 15:15	134	80	131
Desk 3	15/11/2017 15:27	347	334	336

Figura 2. 24: Ufficio amministrativo: misura di illuminamento in posizione 2.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto dalla UNI EN 12464-1 “*illuminazione nei luoghi di lavoro interni*”, il livello ottimale di illuminamento previsto per ambienti ad uso ufficio è tra 300-500Lux. Si osserva che, per l’ambiente considerato, l’illuminazione artificiale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell’attività prevista, sia per l’occupante nella *posizione 1* che per quello nella *posizione 2*.

UFFICIO 1

L’ufficio in oggetto (*Figura 2.25*) è organizzato con un’unica postazione 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 fan coil e all’immissione di aria climatizzata attraverso una bocchetta.

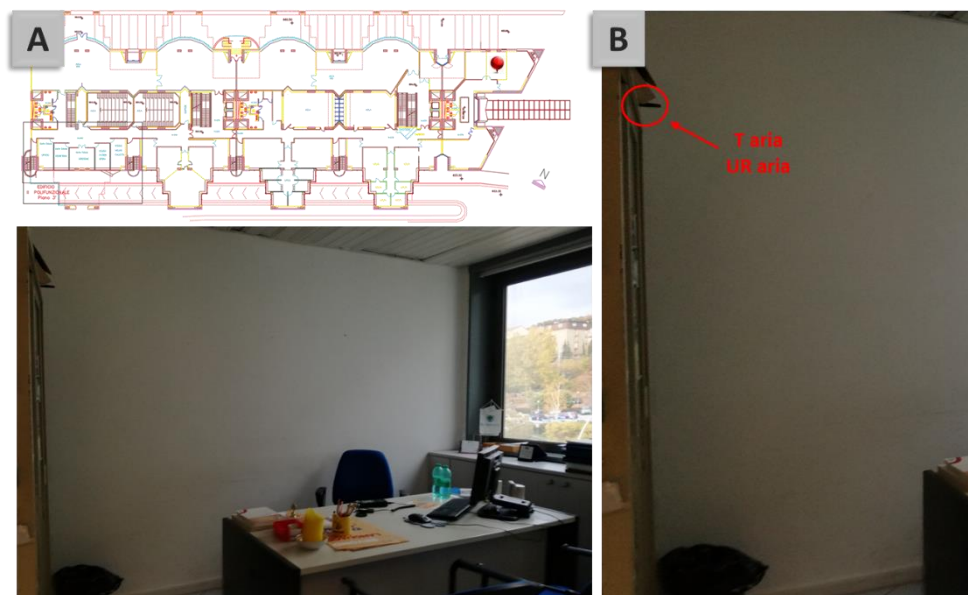


Figura 2. 25: Ufficio 1: a) posizione; b) sensori di temperatura e umidità in opera (8/11 – 21/11).

L’andamento della temperatura dell’aria e dell’umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (08/11 – 21/11) è riportato nelle due figure seguenti (*Figura 2.26* e *Figura 2.27*), in cui è anche evidenziato l’intervallo consigliato di variabilità (rispettivamente in azzurro e in rosa) per assicurare le condizioni di comfort indoor e il valore medio, minimo e massimo delle grandezze stesse.

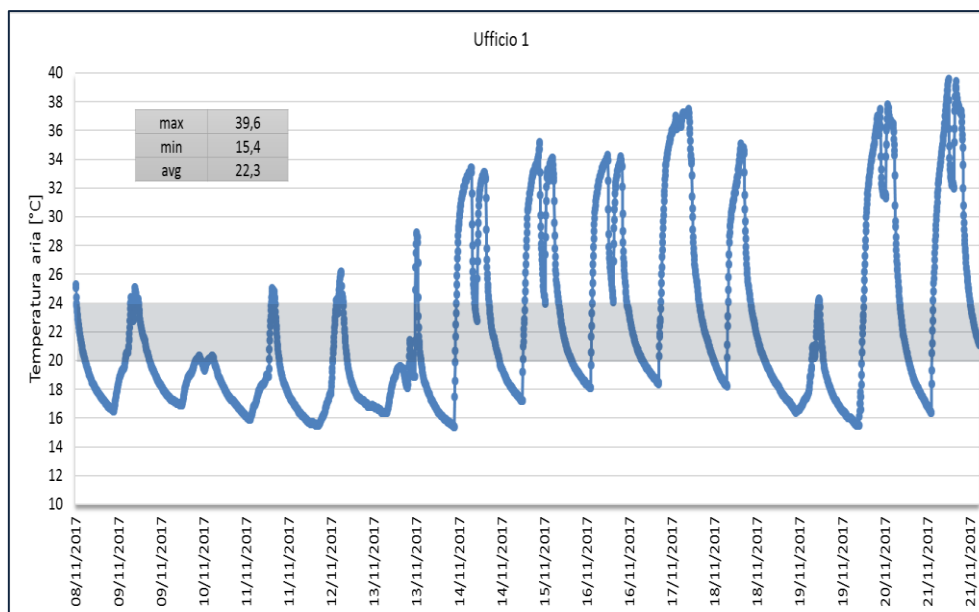


Figura 2. 26: Ufficio 1: andamento della temperatura interna 08/11 - 21/11.

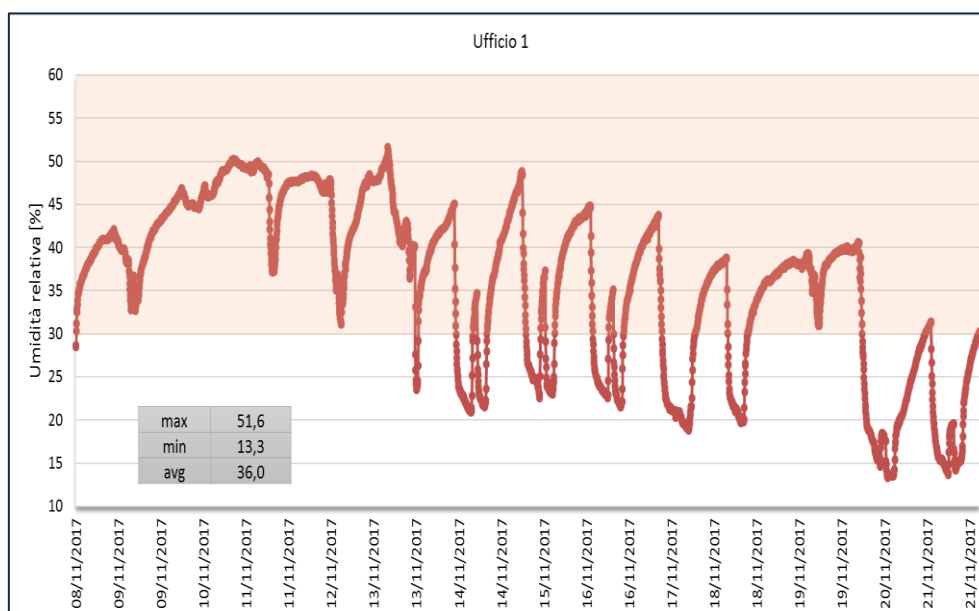


Figura 2. 27: Ufficio 1: andamento dell'umidità interna 08/11 - 21/11.

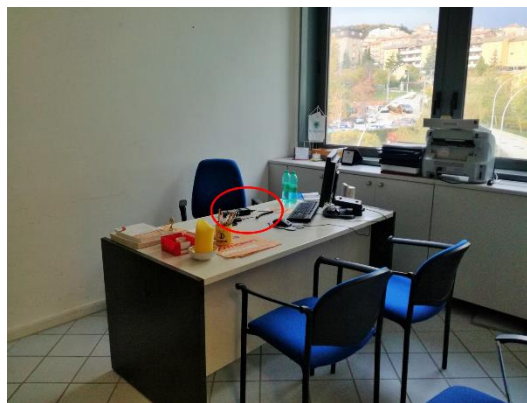
Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 22,3 °C, con un valore massimo intorno a 39,6 °C. La temperatura interna, quindi supera di gran lunga il valore di temperatura di set-point indicato dalla normativa vigenti (20 °C) sul risparmio energetico. Il valore di umidità relativa d'altro canto si mantiene al disotto della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente ad un valore circa pari al 36 %.

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 come quello analizzato; sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (15 novembre) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 31,35 °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 37,4 %, 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 1,2 met. Globalmente tali condizioni del microclima non sono assolutamente contenute nel range di comfort previsto dalla normativa vigente, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 81,1 %, mentre il valore limite previsto dalla normativa vigente per tale indice è pari a 10 %. In questo caso, l'indice PMV risulta invece essere pari a 2,1.

Per quanto riguarda invece il livello di illuminamento all'interno dell'ambiente in oggetto, questo è stato analizzato con riferimento alla posizione dell'occupante seduto alla postazione di lavoro (*Figura 2.28*). 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, 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 parzialmente chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 1 lampade fluorescenti (36W).



		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	15/11/2017 15:56	81	46	70
Desk 2	15/11/2017 16:04	301	278	296

Figura 2. 28: Ufficio 1: misura di illuminamento, posizione occupante.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto dalla UNI EN 12464-1 “*illuminazione nei luoghi di lavoro interni*”, il livello ottimale di illuminamento previsto per ambienti ad uso ufficio è tra 300-500Lux. Si osserva che, per l'ambiente considerato, l'illuminazione artificiale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista per l'occupante.

UFFICIO 2

L'ufficio in oggetto (*Figura 2.29*) è diviso in due ambienti, il primo organizzato per una postazione di lavoro e il secondo adibito a sala riunioni ma entrambi occupati in maniera saltuaria durante il periodo di monitoraggio.



Figura 2. 29: Ufficio 2: a) posizione; b) sensore di temperatura e umidità in opera (08/11-21/11).

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (08/11 – 21/11) è riportato nelle due figure seguenti (*Figura 2.30* e *Figura 2.31*), in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità (rispettivamente in azzurro e in rosa) per assicurare le condizioni di comfort indoor e il valore medio, minimo e massimo.

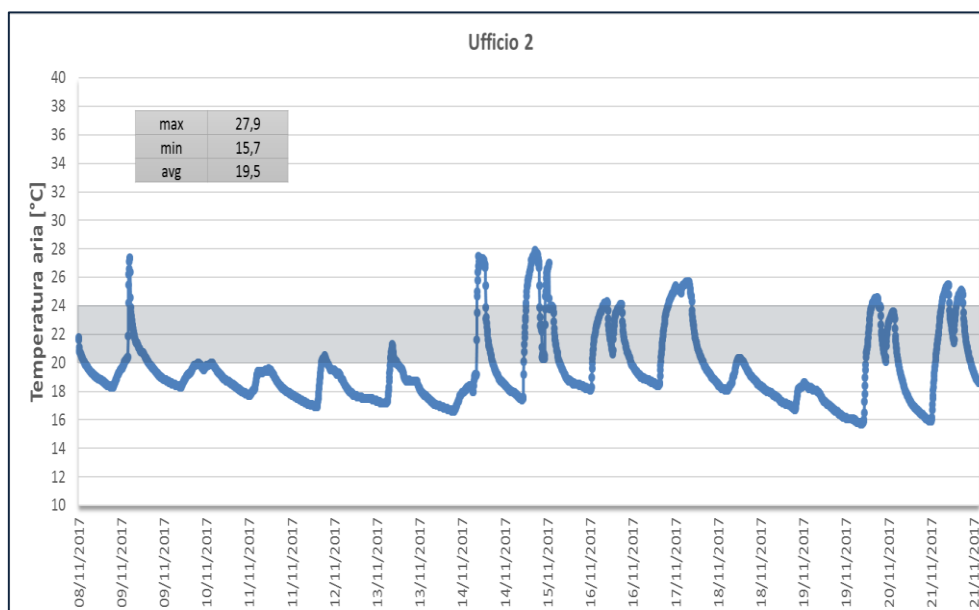


Figura 2. 30: Ufficio 2: andamento della temperatura interna 08/11 - 21/11.

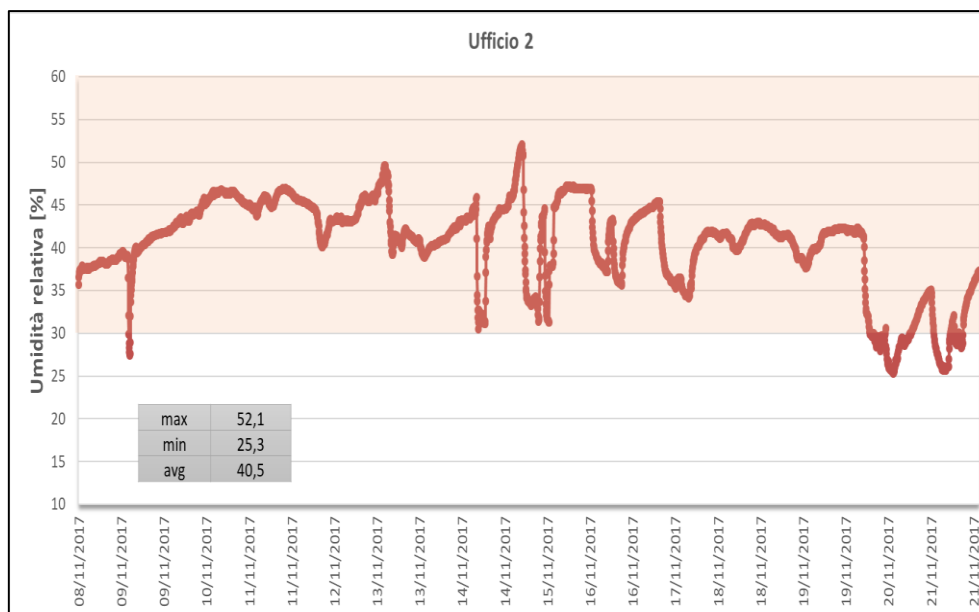


Figura 2. 31: Ufficio 2: andamento dell'umidità interna 08/11 - 21/11.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 19,5 °C, con un valore massimo intorno a 27,9 °C. La temperatura interna, quindi supera anche di 7 °C il valore di temperatura di set-point indicato dalla normativa vigente (20 °C) sul risparmio energetico. Il valore di umidità relativa d'altro canto si mantiene per lo più al disotto della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente ad un valore circa pari al 40,5 %.

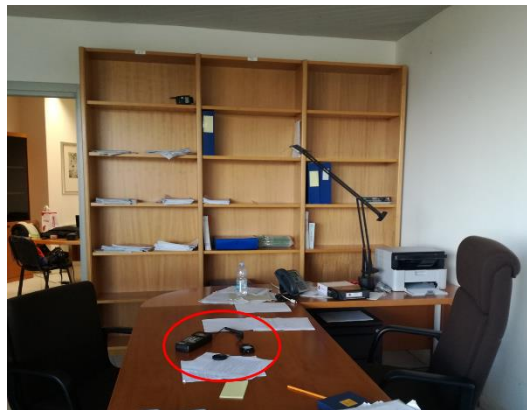
Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante coincidente con la temperatura superficiale monitorata, cosa verosimile in ambiente moderato come quello analizzato; sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (15 novembre) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 25,09 °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 35,86 %, 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 1,2 met. Globalmente tali condizioni del microclima non sono contenute nel range di comfort previsto dalla normativa vigente, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 15,3 %, mentre il valore limite previsto dalla normativa vigente per tale indice è pari a 10 %. In questo caso, l'indice PMV risulta invece essere pari a 0,7.

Per quanto riguarda invece il livello di illuminamento nell'ambiente in oggetto, questo è stato analizzato con riferimento alla posizione dell'occupante seduto alla postazione di lavoro presente. 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, 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 spento il sistema di illuminazione;
- Desk 3: misura nella postazione individuata avendo chiuso le tende e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 6 lampade fluorescenti (36W).



		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	15/11/2017 12:35	618	446	563
Desk 2	15/11/2017 12:44	250	169	235
Desk 3	15/11/2017 14:08	538	502	510

Figura 2. 32: Ufficio 2: misura illuminamento, posizione occupante.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto dalla UNI EN 12464-1 “*illuminazione nei luoghi di lavoro interni*”, il livello ottimale di illuminamento previsto per ambienti ad uso ufficio è tra 300-500Lux. Si osserva che, per l’ambiente considerato, l’illuminazione artificiale è sufficiente a garantire lo svolgimento dell’attività prevista per l’occupante (Figura 2.32).

AULA Q

L’ambiente in considerazione (Figura 2.33), è un’aula che si sviluppa tra il secondo e terzo piano con circa 80 posti a sedere e caratterizzata dall’aver come unico componente finestrato un lucernaio posto in fondo all’aula stessa. 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.

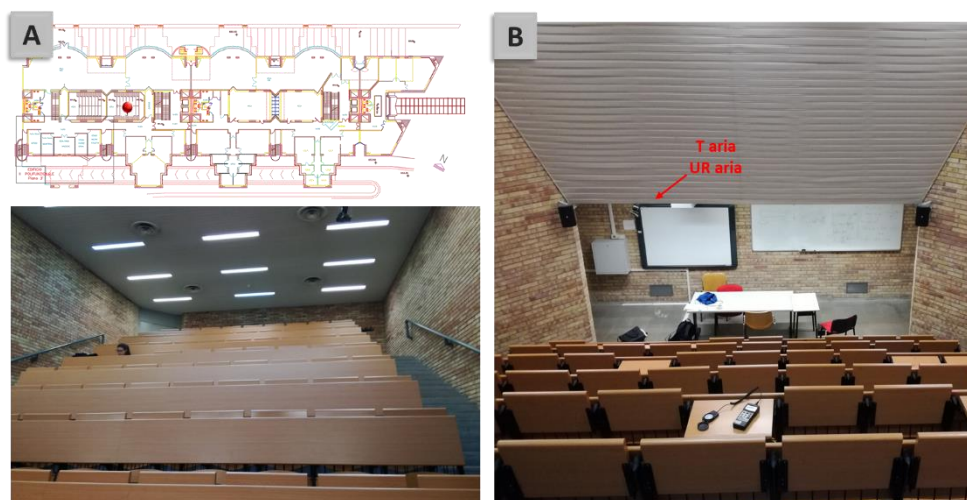


Figura 2. 33: Aula Q: a) posizione; b) sensore di temperatura e umidità in opera (08/11 - 21/11).

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (08/11 – 21/11) è riportato 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 e il valore medio, massimo e minimo.

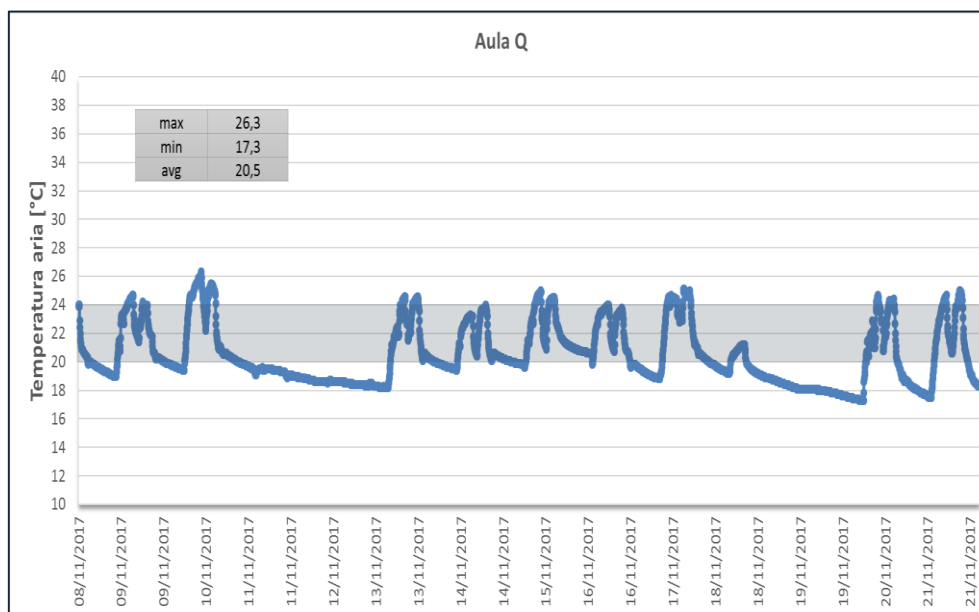


Figura 2. 34: Aula Q: andamento della temperatura interna 08/11 - 21/11.

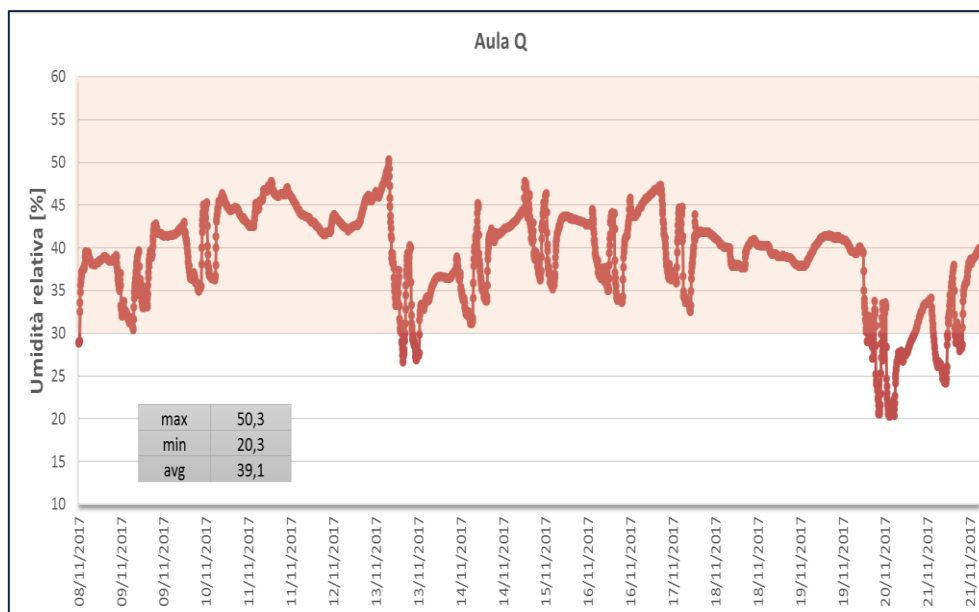


Figura 2. 35: Aula Q: andamento dell'umidità interna 08/11 - 21/11.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 20,5 °C, con un valore massimo intorno a 26,3 °C. La temperatura interna, quindi supera anche di 6 °C il valore di temperatura di set-point indicato dalla normativa vigente (20 °C) sul risparmio energetico. Il valore di umidità relativa d'altro canto si mantiene per lo più al disotto della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente ad un valore circa pari al 39,1 %.

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 come quello analizzato; sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (15 novembre) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 23,24 °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 40,10 %, 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 1,2 met. Globalmente tali condizioni del microclima sono contenute nel range di comfort previsto dalla normativa vigente, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 6,9 %, mentre il valore limite previsto dalla normativa vigente per tale indice è pari a 10 %. In questo caso, l'indice PMV risulta invece essere 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) lo strumento è stato posizionato al centro della cattedra (*Figura 2.36*), all'altezza di circa 73cm.
- 2) si è considerato uno studente seduto al centro della quinta fila, per cui il sensore è stato posizionato sulla ribaltina a circa 65cm di altezza (*Figura 37*);

Per quanto riguarda invece le condizioni in cui vengono effettuate le misure, si ha in questo caso una sola condizione (siccome l'unico componente finestrato presente nell'aula è un lucernaio che non fornisce non considerevole apporto di luce naturale):

- Desk 2: misura sulla postazione individuata avendo acceso il sistema di illuminazione costituito da 18 punti luce (36W).



Posizione 1		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 2	08/11/2017 17:31	291	286	290
Desk 2	22/11/2017 10:49	308	307	304

Figura 2. 36: Aula Q: misura illuminamento posizione 1.



Posizione 2		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 2	08/11/2017 17:37	134	120	131
Desk 2	22/11/2017 10:52	149	144	147

Figura 2. 37: ula Q: misure illuminamento, posizione 2.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto dalla UNI EN 12464-1 “*illuminazione nei luoghi di lavoro interni*”, il livello ottimale di illuminamento previsto per ambienti ad uso aule è tra 300Lux. Si osserva che, per l’ambiente considerato, l’illuminazione artificiale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell’attività prevista per gli occupanti.

AULA S

L’ambiente in oggetto (*Figura 2.38*), è un’aula al terzo piano servita, per la climatizzazione sia invernale che estiva da un impianto a tutt’aria. Al momento in cui sono state effettuate le misure l’aula è stata occupata in modo saltuario per lezioni ed esami.

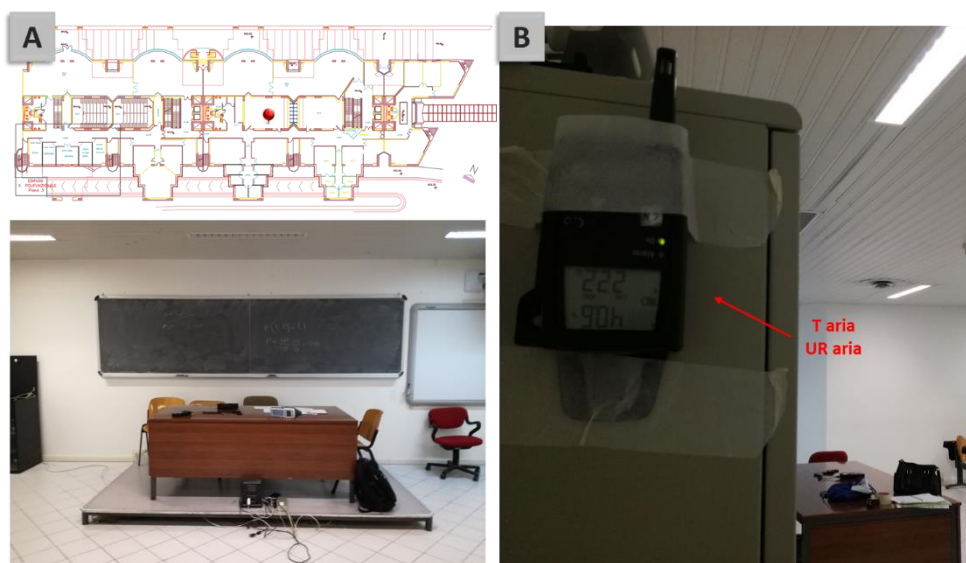


Figura 2. 38: Aula S: a) posizione; b) sensori di temperatura e umidità in opera (08/11 - 21/11).

L’andamento della temperatura dell’aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (08/11 – 21/11) è riportato nelle due figure seguenti (*Figura 2.39, Figura 2.40*) in cui è evidenziato l’intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor.

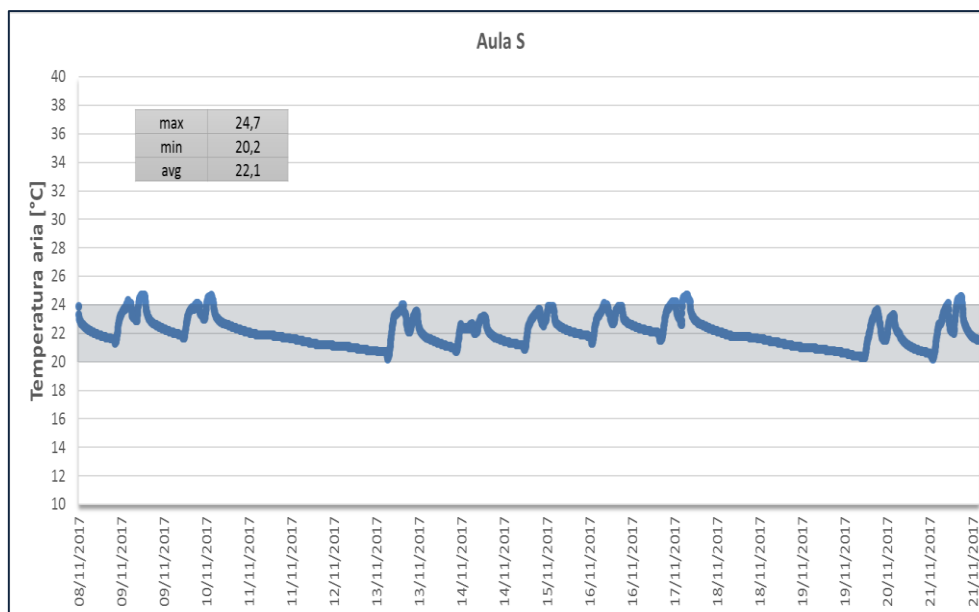


Figura 2. 39: Aula S: andamento della temperatura interna 08/11 - 21/11.

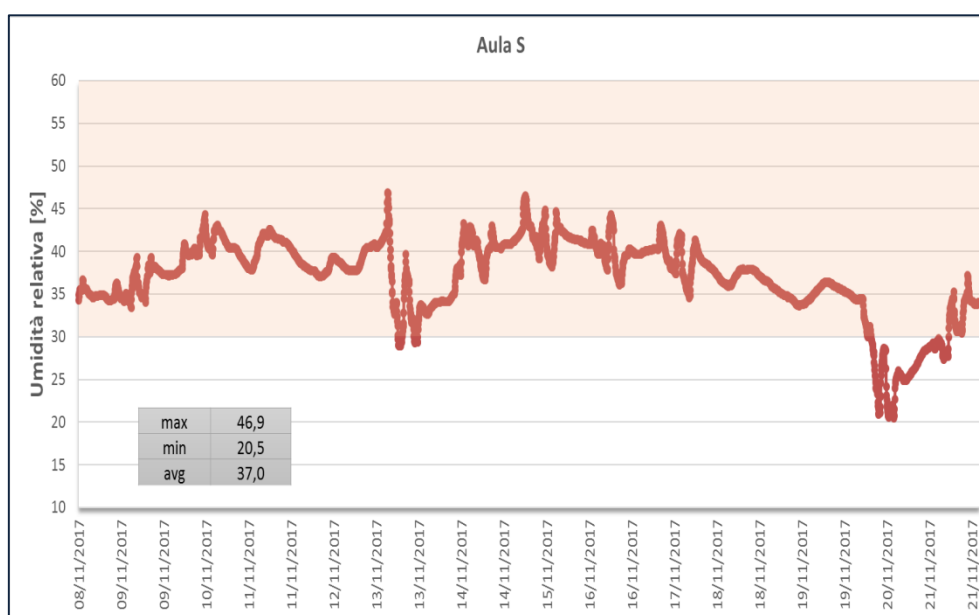


Figura 2. 40: Aula S: andamento dell'umidità relativa interna 08/11 - 21/11.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 22,1 °C, con un valore massimo intorno a 24,7 °C. La temperatura interna, quindi supera anche di quasi 5 °C il valore di temperatura di set-point indicato dalla normativa vigente (20 °C) sul risparmio energetico. Il valore di umidità relativa d'altro canto si mantiene per lo più al disotto della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente ad un valore circa pari al 37,0 %.

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 come quello analizzato; sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (15 novembre) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 23,11 °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 41,52 %, 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 1,2 met. Globalmente tali condizioni del microclima sono contenute nel range di comfort previsto dalla normativa vigente, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 6,9 %, mentre il valore limite previsto dalla normativa vigente per tale indice è pari a 10 %. In questo caso, l'indice PMV risulta invece essere 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) lo strumento è stato posizionato al centro della cattedra (*Figura 2.41*), all'altezza di circa 90 cm;
- 2) si è considerato uno studente seduto al centro della terza fila, per cui il sensore è stato posizionato sulla ribaltina a circa 65cm di altezza (*Figura 2.42*).

Per quanto riguarda invece le condizioni in cui vengono effettuate le misure, si ha in questo caso una sola condizione (siccome l'unico componente finestrato presente nell'aula è un lucernaio che non fornisce non considerevole apporto di luce naturale):

- Desk 2: misura sulla postazione individuata avendo acceso il sistema di illuminazione costituito da 13 punti luce (36W).



Posizione 1		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 2	08/11/2017 18:25	87	81	83
Desk 2	15/11/2017 16:20	81	62	77

Figura 2. 41: Aula S: misura illuminamento, posizione 1.



Posizione 2		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 2	08/11/2017 18:30	182	160	176
Desk 2	15/11/2017 16:13	181	160	176

Figura 2. 42: Aula S: misura di illuminamento, posizione 2.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto dalla UNI EN 12464-1 “*illuminazione nei luoghi di lavoro interni*”, il livello ottimale di illuminamento previsto per ambienti ad uso aule è tra 300Lux. Si osserva che, per l’ambiente considerato e per entrambe le posizioni, l’illuminazione artificiale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell’attività prevista per gli occupanti.

AULA 160 POSTI

L’ambiente in considerazione (Figura 2.43), è un’aula al terzo piano con 160 posti a sedere, la cui climatizzazione sia invernale che estiva è garantita da quattro fan coil e due bocchette di immissione dell’aria. Durante il periodo in cui sono state effettuate le misure l’ambiente è stato occupato in maniera saltuaria per le lezioni.

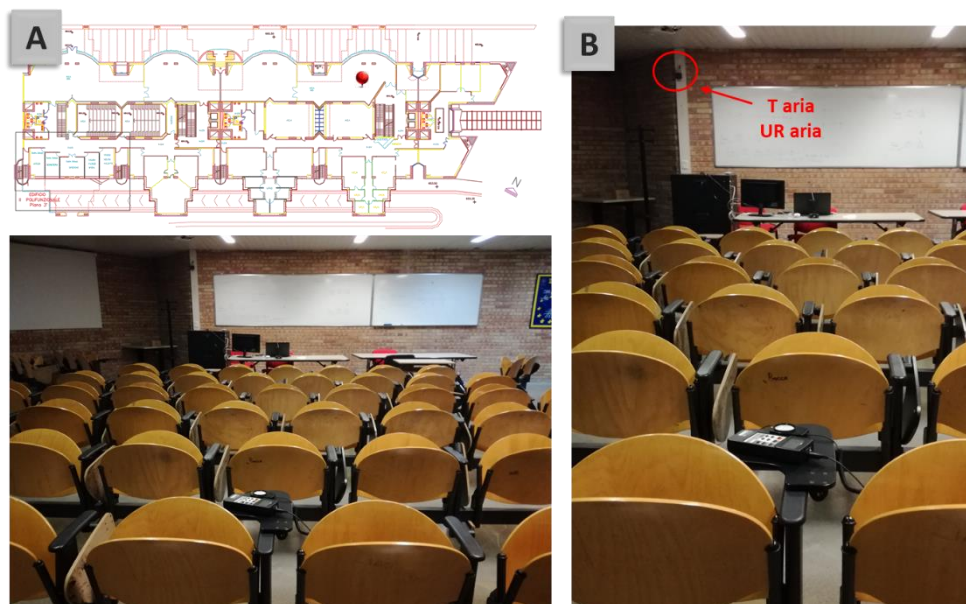


Figura 2. 43: Aula 160 posti: a) posizione, b) sensore di temperatura e umidità (08/11 - 21/11).

L'andamento della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (08/11 4–21/11) sono riportati nelle seguenti figure (*Figura 2.44* e *Figura 2.45*), in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità (rispettivamente in azzurro e in rosa) per assicurare le condizioni di comfort indoor.

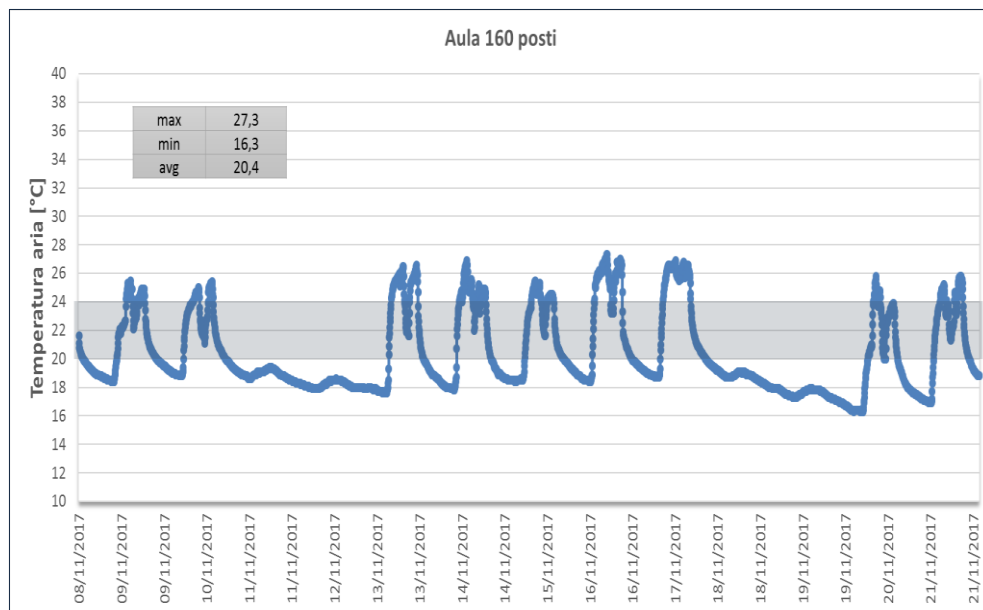


Figura 2. 44: Aula 160 posti: andamento della temperatura interna (08/11 - 21/11).

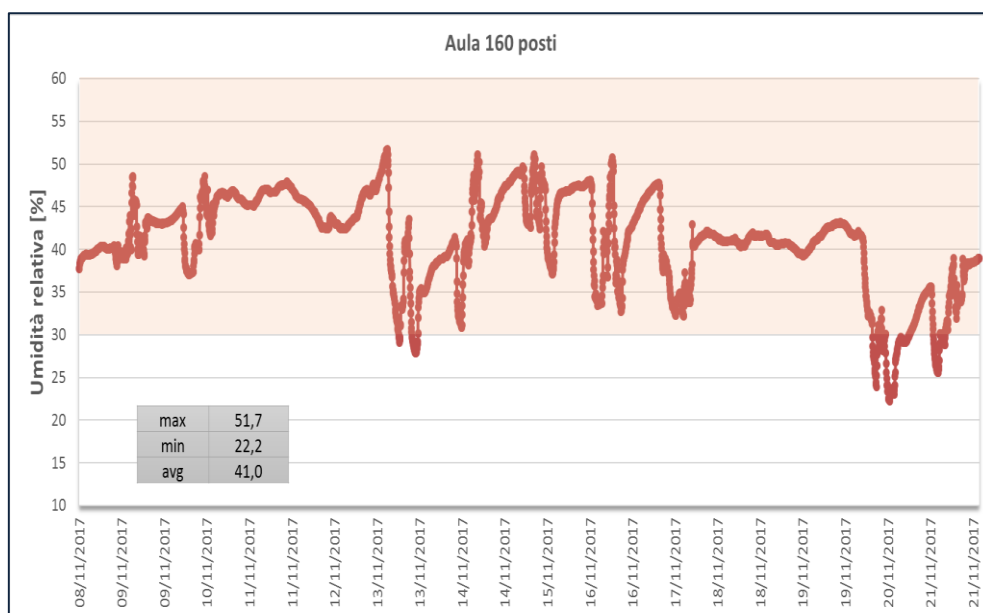


Figura 2. 45: Aula 160 posti: andamento dell'umidità relativa interna (08/11 - 21/11).

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 20,4 °C, con un valore massimo intorno a 27,3 °C. La temperatura interna, quindi supera anche di 6 °C il valore di temperatura di set-point indicato dalla normativa vigente (20 °C) sul risparmio energetico. Il valore di umidità relativa d'altro canto si mantiene per lo più al di sotto della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente ad un valore circa pari al 41,0 %.

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 come quello analizzato; sono stati calcolati gli indici per una giornata tipo (15 novembre) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

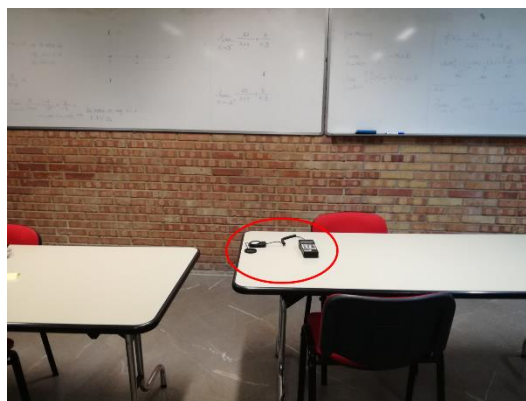
In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 23,08 °C, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore rispetto a quella dell'aria, cosa verosimile in un ambiente moderato. Considerando inoltre il valore medio dell'umidità pari a 43,98 %, 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 1,2 met. Globalmente tali condizioni del microclima sono contenute nel range di comfort previsto dalla normativa vigente, infatti la percentuale prevista di insoddisfatti è pari al 6,9 %, mentre il valore limite previsto dalla normativa vigente per tale indice è pari a 10 %. In questo caso, l'indice PMV risulta invece essere 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) lo strumento è stato posizionato al centro della cattedra (*Figura 2.46*), all'altezza di circa 72 cm;
- 2) si è considerato uno studente seduto al centro della terza fila, per cui il sensore è stato posizionato sulla ribaltina a circa 63 cm di altezza (*Figura 2.47*);

nelle seguenti condizioni di misura:

- Desk 1: misura nella postazione individuata, dopo il tramonto e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 16 lampade fluorescenti (36W);
- Desk 2: misura nella postazione individuata, in condizioni di cielo coperto, avendo aperto le tende e avendo spento il sistema di illuminazione.



Posizione 1		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	08/11/2017 18:41	268	266	166
Desk 2	15/11/2017 15:39	276	261	270

Figura 2. 46: Aula 160 posti: misure di illuminamento, posizione 1.



Posizione 2		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	08/11/2017 18:46	219	178	217
Desk 2	15/11/2017 15:46	168	123	160

Figura 2. 47: Aula 160 posti: misure di illuminamento, posizione 2.

Considerando come riferimento il livello di illuminamento previsto dalla UNI EN 12464-1 “*illuminazione nei luoghi di lavoro interni*”, il livello ottimale di illuminamento previsto per ambienti ad uso aule è tra 300Lux. Si osserva che, per l’ambiente considerato e per entrambe le posizioni, l’illuminazione artificiale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell’attività prevista per gli occupanti.

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 la modellazione del sistema edificio-impianto quanto più prossima alla condizione reale.

3. Costruzione del modello di simulazione dinamica

Con i dati acquisiti è stata realizzata un’accurata modellazione numerica per l’analisi energetica dinamica del sistema edificio-impianti. In particolare, il modello numerico è stato costruito 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.

Le simulazioni hanno fornito i fabbisogni energetici del sistema edificio-impianti che poi sono stati rapportati alle richieste energetiche reali, mediante confronto tra i risultati delle valutazioni numeriche e le distinte dei contratti di fornitura, sia per quanto riguarda il fabbisogno di energia elettrica che di gas naturale. Il confronto con i consumi storici e la conoscenza degli effettivi profili di utilizzo degli impianti e dei sistemi installati hanno consentito la calibrazione del modello numerico attraverso gli indicatori proposti dall’*ASHRAE Guideline 14* e le *M&V Guidelines*, ed ha evidenziato alcune attuali criticità gestionali.

Una volta calibrato il modello, la simulazione del rendimento energetico del sistema edificio-impianto ha fornito risposte precise per la valutazione energetica, tecnica ed economica di possibili interventi di retrofit. Nella *Figura 2.47* sono riportati i rendering del modello numerico dell'edificio in oggetto, mentre nella *Figura 2.48* è riportato il rendering del modello con esposizione est a destra e la corrispondente immagine satellitare a sinistra.

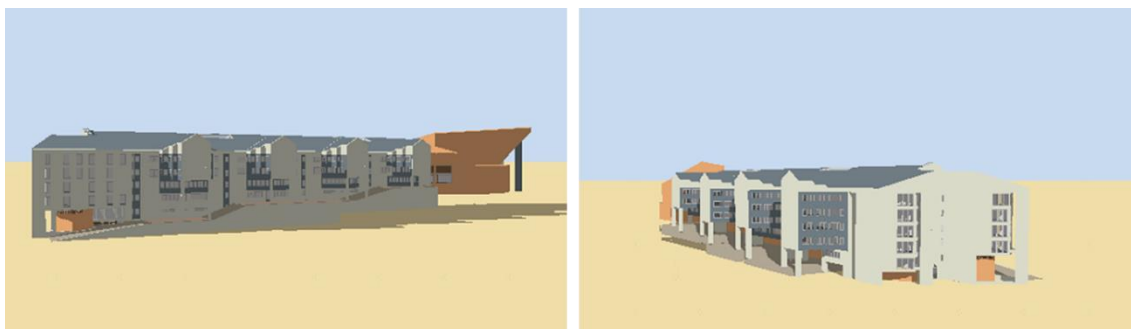


Figura 2. 48: Rendering II Edificio Polifunzionale dell'Università degli Studi del Molise.

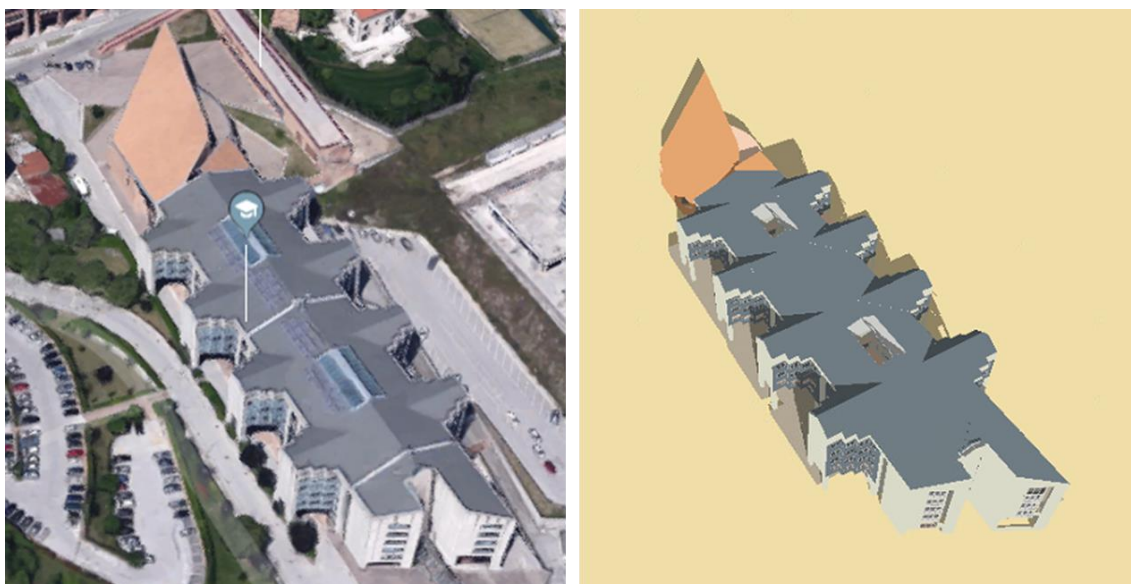


Figura 2. 49: Rendering II Edificio Polifunzionale dell'Università degli Studi del Molise: esposizione est.

4. Metodologia di analisi degli scenari di riqualificazione energetica

Per interventi di riqualificazione energetica dell'edificio (o retrofit energetico dell'edificio) si intendono tutte le operazioni tecnologiche e gestionali atte al conferimento di una nuova e superiore qualità prestazionale alle costruzioni esistenti, dal punto di vista dell'efficienza energetica.

In particolare, per tutti gli interventi tecnicamente ipotizzati, sono state effettuate le opportune simulazioni energetiche al fine di valutare il risparmio conseguibile in termini di energia primaria, è stato stimato un costo di realizzazione indicativo, nonché il tempo di ritorno del capitale investito.

Analisi energetica

Il risparmio di energia primaria sarà valutato semplicemente come rapporto percentuale tra l'energia richiesta dall'edificio nello stato attuale, e quella richiesta dopo aver effettuato l'intervento di riqualificazione proposto. Ciò sarà fatto sia per i fabbisogni di energia termica che per il fabbisogno di energia elettrica, su base annuale in modo da avere un dato globale di confronto.

Per quanto riguarda l'impatto ambientale, si farà riferimento al solo effetto serra, che studia le emissioni di gas climalteranti in termini di anidride carbonica "equivalente", in cui si riporta ciascun gas serra alla CO₂ attraverso un fattore di conversione. Le potenziali emissioni evitate, su base annua, vengono anch'esse valutate come rapporto percentuale tra le emissioni dell'edificio allo stato attuale, e quelle associate all'edificio dopo aver effettuato l'intervento di riqualificazione proposto.

Analisi economica

L'analisi economica dovrà consentire di valutare l'effettiva convenienza dell'intervento proposto, che deve garantire, grazie ai risparmi energetici che permette di conseguire, un rientro economico dell'investimento in tempi accettabili. Un metodo semplice per una valutazione immediata della convenienza economica dell'investimento è quello di valutare il numero di anni necessari affinché i risparmi conseguibili eguaglino il sovra costo d'investimento iniziale, con il parametro del *Simple Pay Back period* (SPB). Tale parametro non è altro che il numero di anni necessari per il ritorno dell'investimento, ed è definito dal rapporto tra il sovra costo iniziale e il risparmio annuo nei costi di esercizio, senza attualizzare i flussi di cassa. Tale metodo può essere usato per effettuare una preselezione delle possibili alternative di intervento, in quanto il numero di anni impiegato a recuperare l'investimento può essere discriminante per l'accettazione di un progetto; tuttavia esso non fornisce alcuna indicazione sulla redditività dell'investimento in quanto non va oltre il tempo di rimborso necessario.

Una valutazione più accurata del tempo di ritorno si ottiene considerando l'attualizzazione dell'investimento utilizzando il Discounted Pay Back (DPB), anche detto Tempo di ritorno attualizzato.

Per tener conto invece della redditività dell'investimento, è stato utilizzato l'indice economico NPV, *Net Present Value* (Valore attuale netto). In tale metodo i flussi di cassa (cioè il confronto tra esborsi e disponibilità), di diverso ammontare e distribuzione nel tempo, sono riportati ad uno stesso istante di tempo assunto come riferimento; per tale operazione si opera in regime deterministico, fissando i tassi relativi agli N anni di vita stimata così che la serie di flussi di cassa, previsti nel periodo considerato, siano riportati al loro valore attuale. A tale valore viene poi sottratto l'esborso iniziale e si ottiene il VAN. Evidentemente secondo tale metodo, un intervento risulta accettabile solo se il VAN risulta positivo.

5. Analisi degli scenari di riqualificazione energetica per il II edificio Polifunzionale

Sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello energetico dell'edificio, e tenendo conto delle indicazioni e criticità rilevate durante i sopralluoghi effettuati, sono stati individuati una serie di possibili

interventi di riqualificazione per il sistema edificio-impianti, considerando le tecnologie più diffuse sul mercato nonché i vincoli dati dalle caratteristiche stesse dell'edificio.

Come accennato, per tutti gli interventi tecnicamente ipotizzati, sono state effettuate le opportune simulazioni energetiche al fine di valutare il risparmio conseguibile in termini di energia primaria e le emissioni evitate ed è stato stimato un costo di realizzazione indicativo, nonché il tempo di ritorno del capitale investito. I risultati di tali analisi, effettuate per tutti gli interventi e combinazioni di interventi ipotizzati per l'edificio oggetto di studio, sono riportati nella tabella riepilogativa posta nell'ultima parte del presente capitolo.

Inoltre, in riferimento alle valutazioni di natura economica, in appendice è riportata un'ulteriore tabella in cui sono indicate, per ogni tipologia di intervento, le voci di costo considerate per la valutazione dei costi di investimento di ciascun intervento e le rispettive fonti. Infatti, a seconda dei casi, tali voci sono state desunte dal prezzario della regione Molise o da indagini in mercato, sempre allo scopo di avere quantomeno una stima del reale costo associato a ciascun intervento. In particolare, in alcuni casi è stato fatto riferimento a costi indicati in listini prezzo di prodotti scelti per gli interventi a puro scopo esemplificativo; oppure è stato fatto riferimento a voci di costo indicate in computi metrici reperiti in rete, riferiti ad interventi il più possibile simili a quelli effettivamente considerati per l'edificio in oggetto e riguardati sempre interventi di riqualificazione/ristrutturazione di edifici del settore terziario.

5.1 Definizione degli interventi di riqualificazione energetica

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 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 installato presenti anche la possibilità di agire sullo stesso. Pertanto, una prima misura che imprescindibilmente è da mettere in atto prevede la riattivazione del sistema di umidificazione presente all'interno delle unità di trattamento dell'aria.

Oltre all'intervento preventivo che prevede la messa in funzione dei sistemi di umidificazione presenti, per il II edificio Polifunzionale, sono stati ipotizzati ed analizzati i seguenti interventi:

- sostituzione dei serramenti con altri caratterizzati da una maggiore resistenza termica;
- installazione di un sistema di schermatura esterno per i componenti finestrati;
- sostituzione/rifacimento dell'impianto di illuminazione interna;
- sostituzione della caldaia tradizionale con una a condensazione;
- sostituzione del chiller presente con uno caratterizzato da una maggiore efficienza;
- sostituzione delle UTA
- adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione;
- installazione di un impianto fotovoltaico in aggiunta a quello esistente.

Tra tutti gli interventi individuati saranno indicati come consigliati i soli interventi che si ritengono realizzabili sulla base del relativo beneficio in termini di risparmio energetico/economico.

Tali misure sono state poi combinate in pacchetti per un totale di 20 tipologie di interventi. Come accennato, e riportato nel prosieguo della presente, per ciascuna delle misure definite è stato valutato il risparmio di energia primaria conseguibile (dato dalla somma dell'energia primaria per il riscaldamento, la produzione di acqua calda sanitaria e dell'energia elettrica primaria per tutti gli usi inclusa l'illuminazione), le emissioni evitate, ed è stato stimato il costo indicativo di investimento corrispondente nonché il tempo di ritorno del capitale investito.

5.1.1 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. Tuttavia 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, anche i valori limite previsti dal decreto per l'involucro trasparente, risultano delle valide linee guida da considerare per la scelta degli interventi prescelti, ma non necessariamente da rispettare nel caso si volessero mettere in atto.

Nella *Tabella 5.1*, 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 chiusure tecniche trasparenti e opache dei cassonetti, comprensivi infissi verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati, 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 componenti finestrati 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 5. 1: Valori dei parametri caratteristici degli elementi 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 sono costituiti da vetrocamera con lastre chiare non rivestite, intercapedine d'aria e telaio in alluminio; la trasmittanza termica complessiva

risulta circa pari a 2,8 W/m²K. Per quanto riguarda invece i sistemi di schermatura, allo stato attuale, ove presenti, sono installati sistemi interni di tipo mobili, ovvero tende a lamelle.

L'intervento ipotizzato (codice TvBe) propone la sostituzione di tali serramenti con altra tipologia di forma conforme a quelli esistenti, con una doppia guarnizione per tenuta termica ed elastica. In particolare, si è previsto l'impiego di un telaio in alluminio con taglio termico e un triplo vetro con trattamento basso-emissivo e riempimento in argon (44)-12A-4T-12A-(44)mm. La tipologia di serramento deve inoltre garantire buoni valori di isolamento acustico, resistenza antieffrazione e antinfortunistica in accordo alla normativa UNI7697. Ai fini della modellazione numerica e quindi delle valutazioni di carattere energetico, è stato considerato un serramento con telaio in alluminio a taglio termico e un triplo vetro basso emissivo con una trasmittanza termica della componente vetrata pari a 1,061 W/m²K e fattore solare pari a 0,533.

Per quanto riguarda invece i sistemi di schermatura, oltre alla possibilità di conservare i sistemi interni attualmente presenti, si è considerata la possibilità di installare sistemi esterni di tipo frangisole (codice FF) in alluminio. Anche in tale caso, ai fini della modellazione numerica dell'intervento e quindi la valutazione della convenienza dello stesso dal punto di vista energetico, sono state considerate doghe fisse in alluminio di 13 cm di profondità, interspazio verticale di 12,5cm e distanza dal serramento di 30cm. Rimandando poi a persone competenti le opportune valutazioni circa la fattibilità strutturale dell'intervento stesso, data la particolarità della struttura. Tuttavia, data la particolarità dell'edificio in oggetto, si rimanda a personale qualificato, sotto tale punto di vista, la valutazione della fattibilità strutturale di tale intervento.

Dall'analisi del fabbisogno energetico si evince che il risparmio conseguibile attraverso la sola sostituzione dei componenti finestrati è pari al 4,08%; mentre considerando anche l'installazione di frangisole orizzontali, oltre la sostituzione dei serramenti, il risparmio di energia primaria raggiunge il 5,79%, come mostrato nella *Tabella 5.2*.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
CB - Stato di fatto	1000	1010	2010	
TvBe - Sostituzione componenti finestrati	996	932	1995	4,08%
TvBe+FF - Sostituzione componenti finestrati e installazione frangisole	986	911	1864	5,79%

Tabella 5. 2: Risultati dell'analisi energetica (sostituzione componenti finestrati e schermature).

Il costo di investimento stimato, associato alla sostituzione dei componenti finestrati, è stato determinato sulla base di indagini di mercato; ovvero, le seguenti voci di costo sono state reperite da computi metrici reperiti in rete:

- fornitura di serramenti esterni realizzati in lega di alluminio verniciato conforme alle norme UNI EN 515 con telaio in lega di alluminio a taglio termico con superficie finestrata conforme alle prescrizioni contenute nella normativa UNI 7697 del tipo a triplo vetro mm (4+4)-12A-4T-12A-(4+4) accoppiato antiscasso classe P dotato di triplo vetro con trattamento basso emissivo con gas

Argon. Ad una o più ante, compreso ogni ulteriore onere utile a dare l'opera realizzata e finita secondo la regola dell'arte. Compreso taglio e sfridi, ponteggi, opere murarie, controtelaio, maniglie, riprese di intonacature e tinteggiature". Un prezzo medio per finestre e portefinestre: 480 €/m²;

- rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombrò dei detriti, il trasporto degli stessi alle discariche, compreso la rimozione e l'accatastamento dei vetri nel caso di serramenti, computando le superfici prima della demolizione: 12,58 €/m².

Quindi considerando che la superficie vetrata complessiva oggetto di intervento è pari a circa 1500 m², il costo complessivo associato alla sostituzione dei componenti finestrati è pari a circa 738'870 €.

Invece, per l'intervento che prevede sia la sostituzione dei serramenti esistenti che l'installazione di sistemi di schermatura esterni, oltre alle voci soprariportate sono state considerate le seguenti voci di costo:

- fornitura di frangisole in alluminio fisso con doghe in alluminio 50mmx15mm: 430 €/m²;
- posa in opera qualificata compreso attrezzatura e materiali di consumo: 73 €/m².

Quindi, considerando una superficie d'intervento di circa 1400 m² (si escludono infatti gli ingressi all'edificio e i serramenti collocati al piano terra e primo con esposizione sud perché ampiamente ombreggiati nello stato di fatto) il costo di investimento complessivo per l'installazione del frangisole fissi è pari a 704'200 €. Quindi, il costo associato all'intervento, che prevede sia la sostituzione dei serramenti che l'installazione di sistemi frangisole, risulta pari a 1'443'070 €.

5.1.2 Rifacimento dell'impianto di illuminazione interna

I corpi illuminanti presenti nell'edificio oggetto del presente lavoro, sono per lo più lampade fluorescenti della tipologia a neon. Come riportato nella fase di diagnosi, 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'illuminazione interna, che per garantire adeguati livelli di illuminamento negli ambienti stessi, si è ipotizzata la 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 ad 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.

Per la sostituzione degli apparati illuminanti si sono prese in considerazione le lampade a elettroluminescenza – LED (*light emitting diode*), in particolare, come riferimento per indicazioni circa prezzo e caratteristiche tecniche, sono state considerate le lampade Disano minicomfort LED da 25W con

efficienza pari a 156 lm/W, flusso luminoso iniziale pari a 3900 lm e temperatura di colore pari a 4000K e vita utile di 80'000h (codice intervento LED).

Sempre in riferimento all'impianto illuminotecnico, è stata ipotizzata anche un'altra misura di retrofit, che prevede, oltre all'installazione delle suddette lampade, l'integrazione di queste con un sistema di regolazione, ovvero l'installazione di un rilevatore di presenza e luminosità in ogni ambiente (codice C).

In particolare, il controllo dell'illuminazione con rilevatore di presenza di basa da una parte sulla registrazione di movimenti e dall'altra sulla misurazione del livello di illuminamento all'interno dell'ambiente. I rilevatori di presenza misurando costantemente la luminosità dell'ambiente, sono in grado non solo di accendere ma anche di spegnere la luce artificiale quanto la luce naturale è rispettivamente insufficiente o sufficiente.

Dall'analisi del fabbisogno energetico si evince, come mostrato nella *Tabella 5.3*, che il risparmio energetico derivante dall'adozione di tali misure è pari al 2,33% nel caso di sola sostituzione dei corpi illuminanti ed è pari al 5,17% nel caso in cui oltre all'installazione di lampade a LED di preveda anche l'integrazione con un sistema di controllo, ovvero l'installazione di rilevatori di presenza negli ambienti.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
CB - Stato di fatto	1000	1010	2010	
LED - Installazione lampade LED	923	1040	1963	2,33%
LED+C - Installazione di lampade LED e rilevatori di presenza	846	1060	1906	5,17%

Tabella 5. 3: Risultati analisi energetica (sostituzione lampade e installazione sistema controllo).

Sotto il profilo economico, sono state considerate le seguenti voci di costo, ricavate rispettivamente da indagini di mercato, prezzario della regione Molise e computi metrici reperiti in rete:

- fornitura plafoniere ad incasso Disano 841 Minicomfort LED da 25W, lampade incluse, cablate con reattore elettronico dimmerabile: 180,57 €/cad;
- costo di installazione, compreso quanto occorre per dare il lavoro finito (esclusi gli oneri per eventuale adattamento/modifica della controsoffittatura esistente); considerando n. 2 installatori di 5° categoria e un tempo di installazione di 1,5 h/cad: 81 €/cad.;
- considerando un costo di rimozione di strutture metalliche di qualunque natura, di tubazioni metalliche, di componenti d'impianti tecnologici e relativi elementi provvisori metallici di fissaggio, compreso lo sgombero dei detriti con carico e trasporto alle pubbliche discariche, pari a 2,07 €/kg; e un peso stimato delle plafoniere esistenti pari a 3,40 kg; il costo complessivo di rimozione delle lampade esistenti è: 7,038 €/cad.

Pertanto, considerando la sostituzione di circa 1000 corpi illuminanti, il costo complessivo associato all'intervento è pari a circa 268'608 €.

Invece, per l'intervento che prevede sia la sostituzione delle lampade esistenti che l'installazione di sensori di presenza e luminosità per il controllo del sistema di illuminazione, oltre alle voci soprariportate sono state considerate le seguenti voci di costo:

- fornitura di rilevatori Busch-Jaeger ABB: 212 €/cad;
- considerando n. 1 installatore di 5° e n. 1 installatore di 2° categoria per modifica linee elettrica di alimentazione rilevatori, per un totale di 48,63 €/h, e supponendo un tempo di installazione di 30 min/cad; il costo di manodopera per l'installazione e settaggio dei rilevatori indicati è: 24,32 €/cad;

Quindi considerando l'installazione di 400 rilevatori all'interno della struttura, il costo complessivo associato all'installazione dei rilevatori è pari a 94'526 €. Mentre il costo complessivo di intervento, che prevede l'installazione di lampade LED e relativo controllo automatico risulta pari a 363'124 €.

5.1.3 Sostituzione della caldaia tradizionale con una a condensazione

Per le soluzioni impiantistiche va considerato che l'efficienza energetica di un impianto termico è legata ai singoli componenti e quindi al sistema di generazione, distribuzione, emissione e al sistema di regolazione e controllo.

Allo stato attuale, le richieste di energia termica e per riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria sono soddisfatte da due caldaie tradizionali. Pertanto, un intervento proponibile per il sistema impianto è la sostituzione degli attuali generatori termici con due caldaie, di taglia analoga, a condensazione il cui rendimento raggiunge normalmente valori superiori al 100%, variabili in genere tra il 97% e 105% a seconda della temperatura dell'acqua di ritorno dell'impianto.

Tale intervento (codice CALD) consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria di circa il 17% rispetto al fabbisogno attualmente richiesto dall'edificio, come mostrato nella *Tabella 5.4*.

	Energia primaria (MWh)			ΔE%
	Elettrico	Termico	Totale	
CB - Stato di fatto	1000	1010	2010	
CALD - Sostituzione caldaia con una a condensazione	1004	650	1655	17,68%

Tabella 5. 4: Risultati anali energetica (installazione caldaia a condensazione).

Il costo di investimento per tale misura è stato determinato sulla base di indagini di mercato, in particolare sono state considerate le seguenti voci di costo:

- smontaggio delle due caldaie esistenti ed annesse apparecchiature taglio e chiusura delle tubazioni di adduzione e scarico, trasporto a rifiuto ed oneri di discarica: 2000 €;
- caldaia a condensazione da 1000 kW: 48'193,7 €/cad;
- opere murarie a seguito della sostituzione dei generatori per la demolizione e rifacimento dei basamenti di appoggio: 2000 €;

- quadro comando caldaia per temperature di esercizio fino a 90°C, montaggio sopra caldaia, funzioni di termoregolazione per circuito di riscaldamento miscelato diretto. Possibilità di ampliamenti delle funzioni: 2000 €;
- modifica tubazioni per adeguamento alle nuove caldaie, comprendente lo smontaggio delle tubazioni fluidi e scarico fumi esistenti, posa in opera di nuove tubazioni con ripristino delle coibentazioni e condotti fumari: 3600 €.

In conclusione, il costo complessivo per l'intervento considerato, che prevede la sostituzione delle caldaie attualmente presenti con caldaie a condensazione ad alta efficienza, è circa pari a 105'988 €.

5.1.4 Sostituzione del chiller presente con uno caratterizzato da una maggiore efficienza

Insieme alla sostituzione delle due caldaie attualmente presenti, si è ipotizzata la sostituzione anche dei due generatori di acqua refrigerata. Allo stato attuale, le richieste di energia termica frigorifera e quelle per il raffrescamento degli ambienti, sono soddisfatte da due refrigeratori di tipo aria-acqua installati all'esterno della struttura. Pertanto, si è pensato alla sostituzione degli attuali chiller con due di taglia analoga, ma che presentino migliori caratteristiche prestazionali così da ridurre la richiesta e di energia elettrica per il raffrescamento degli ambienti interni.

Tale intervento (codice CHIL) consente una riduzione del fabbisogno di energia primaria inferiore all'1% rispetto a quello attuale, come mostrato nella *Tabella 5.5*.

	Energia primaria (MWh)			ΔE%
	Elettrico	Termico	Totale	
CB - Stato di fatto	1000	1010	2010	
CHIL - Sostituzione refrigeratore	984,61	1010	1995	0,77%

Tabella 5. 5: Risultati analisi energetica (sostituzione refrigeratore).

Il costo di investimento per tale misura è stato determinato sulla base di indagini di mercato, in particolare, sempre a scopo esemplificativo, si è fatto riferimento ad un refrigeratore RHV Ferroli da 800kW. Il costo di tale refrigeratore risulta essere pari a 196344 €/cad, a cui bisogna aggiungere i costi di installazione nonché di rimozione e dismissione degli attuali refrigeratori. In particolare, si è considerato:

- costo per la rimozione dei componenti accessori dell'impianto esistente: 874,94 €;
- trasporto a discarica di tutti i componenti dei materiali rimossi dall'impianto esistente: 188,01 €;
- conferimento a discarica autorizzata dei materiali rimossi: 1044,91 €;
- collegamento all'impianto di distribuzione esistente: 2300,58 €;
- trasporto e posizionamento dove previsto, scarico con idonei mezzi, e posa in opera di opportuni sistemi e supporti: 6400 €;

per cui il costo di investimento complessivo stimato è pari a circa 409'896 €.

5.1.5 Sostituzione delle UTA con apparecchiature caratterizzate da una maggiore efficienza

In ragione del grado di obsolescenza e di efficienza delle esistenti unità di trattamento aria presenti nel complesso edilizio, si è ipotizzata la loro sostituzione con macchine delle stesse caratteristiche tecniche, ma con più elevati standard prestazioni e di efficienza energetica.

Il costo complessivo stimato è pari a € 216.717,70

5.1.6 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, in alcuni casi limite, anche di 10 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.

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 il 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 mediante l'installazione di termostati per il controllo della temperatura nell'aria in ambiente in ogni locale servito da un impianto misto o a tutt'aria.

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 quanto opportuno, comportando, in tal modo, un sensibile risparmio di energia primaria e un miglioramento delle condizioni di comfort per gli occupanti.

L'intervento di installazione e corretto settaggio dei sistemi di regolazione degli impianti a livello di singolo ambiente climatizzato (codice REG), consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria rispetto al fabbisogno attualmente richiesto, ottenendo un risparmio di energia primaria pari al 12,2%, come mostrato nella *Tabella 5.6*.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
CB - Stato di fatto	1000	1010	2010	12,22%
REG - Sistema regolazione a livello ambiente	995	769	1764	

Tabella 5. 6: Risultati dell'analisi energetica (installazione sistemi di regolazione a livello ambiente).

Il costo di investimento per tale misura è stato determinato sulla base di indagini di mercato, in particolare, a scopo esemplificativo è stato fatto riferimento ad un termostato Fantini Cosmi, per cui sono state considerate le seguenti voci di costo:

- kit composto da termostato e attuatore relè remoto: 120 €/cad;
- considerando n. 2 installatori di 5° categoria e un tempo di installazione pari a 30min/cad, il costo di installazione termostati per fan coil è: 27 €/cad.;
- fornitura e posa in opera di termostati per il controllo della temperatura all'interno dei canali ad aria pari a 400 €/cad;

Non essendo noto in maniera sufficientemente dettagliata la configurazione impiantistica, il costo di investimento è stato valutato escludendo gli eventuali oneri per l'adeguamento della rete di distribuzione, nonché trasposto e dismissione dei materiali di risulta. Inoltre si è supposto di installare 1 termostato per fan coil.

Considerando quindi, 315 termostati per i fan coil e circa 6 termostati per canali ad aria, il costo complessivo associato all'intervento è stato considerato pari a circa 48'732 €.

5.1.7 Installazione di un impianto fotovoltaico

Come riportato nella fase di audit, il II edificio Polifunzionale risulta servito da un impianto fotovoltaico da 19,4 kWp. Tuttavia, date le dimensioni della struttura e i relativi fabbisogni energetici, la taglia di tale impianto non risulta essere quella ottimale. Infatti, la producibilità di tale impianto, stimata attraverso l'ausilio di un software per la progettazione degli impianti fotovoltaici, è circa pari a 65 MWh/anno mentre il fabbisogno di energia elettrica della struttura è pari a circa 568 MWh/anno. Dato tale contesto, è stato ipotizzato e valutato un intervento che prevede l'installazione di un nuovo impianto fotovoltaico, in aggiunta a quello già presente.

In particolare, in base allo spazio con esposizione sud-est, ancora disponibile sulla copertura dell'edificio, si è valutata la possibilità di installare nei nuovi moduli fotovoltaici per una potenza complessiva pari a 31,7 kWp. Inoltre, si è valutata la possibilità di installare dei vetri fotovoltaici trasparenti in sostituzione ai lucernai presenti sul tetto, che di fatto hanno la funzione di illuminare i due cortili interni coperti della struttura. In tal caso, considerando la superficie degli attuali lucernai avente esposizione sud-est, risulterebbe possibile, installare ulteriori 15,5 kWp circa. Considerando insieme entrambe le strategie, è quindi possibile ottenere un impianto fotovoltaico, aggiuntivo rispetto a quello esistente, di circa 47,2 kWp, con una producibilità annua stimata di circa 56 kWh (codice intervento PV).

Al fine di modellare numericamente la realizzazione dell'intervento e stimare quindi la producibilità dell'impianto, è stata considerata l'installazione di:

- 96 moduli Sunprime Inc, Maxima GxB 330W per una superficie complessiva pari a 182 m²;
- vetri fotovoltaico Azimut daylight 205W su una superficie complessiva pari a circa 155 m².

Dall'analisi del fabbisogno energetico si evince che il risparmio conseguibile per tali misure è pari al 4,65%, come mostrato nella *Tabella 5.7*.

	Energia primaria (MWh)			ΔE%
	Elettrico	Termico	Totale	
CB - Stato di fatto	1000	1010	2010	
PV - Installazione impianto fotovoltaico 906	906,46	1010	1916	4,65%

Tabella 5. 7: Risultati dell'analisi energetica (installazione impianto fotovoltaico).

Relativamente al costo, sulla base di analisi di mercato, si è assunto un costo totale per la realizzazione di un impianto fotovoltaico di circa 2000 €/kWp. Pertanto, l'intervento di realizzazione di un nuovo impianto fotovoltaico aggiuntivo da 47,2 kWp presenta un costo complessivo di circa 94'400 €.

5.2 Misure di efficienza energetica applicate allo stato di fatto

L'ultima analisi da fare è quella di valutare l'effetto che potrebbero avere gli interventi cumulati, al fine di individuare la combinazione ottimale degli interventi dal punto di vista sia energetico che economico.

Tutte le misure di retrofit proposte e valutate per la riqualificazione energetica dell'edificio, sono riportate nella *Tabella 5.8*, insieme ai rispettivi fabbisogni energetici (energia primaria), emissioni di CO₂ equivalente, nonché le rispettive riduzioni rispetto allo stato di fatto (ΔE_p e ΔCO₂); i costi di investimento (CI), tempo di ritorno del capitale investito (SPB e DPB), e il valore attuale netto (VAN) associato a ciascun intervento.

Dall'analisi della *Tabella 5.8*, si evince che l'edificio nell'attuale stato di fatto è caratterizzato dal più alto fabbisogno energetico, pari a 148 kWh/m². Inoltre, si nota come le misure che prevedono interventi sull'involucro trasparente, consentono risparmi energetici contenuti al fronte di costi di investimento elevati, ottenendo così tempi di ritorno del capitale non proponibili e un VAN a 20 anni negativo. Infatti, la sostituzione degli attuali serramenti con tripli vetri basso emissivi con argon e telaio a taglio termico e l'installazione di schermature frangisole esterne (corrispondente alla sigla "TvBe+FF") consente un risparmio di energia primaria circa pari al 5,8%, al fronte di un costo di investimento di circa 1'443'070 €, un tempo di ritorno del capitale di oltre 100 anni e un VAN negativo (-1'331'315 €).

Anche la soluzione "TvBe+FF+LED+C+CALD+CHIL+REG+PV", che risulta essere la migliore dal punto di vista strettamente energetico, non risulta conveniente dal punto di vista economico. Essa, oltre agli interventi sui serramenti, prevede anche il rifacimento dell'impianto illuminotecnico, sostituzione della caldaia e del refrigeratore, adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione e l'installazione di un impianto fotovoltaico in aggiunta a quello già presente. A tale misura è associato un

risparmio di energia primaria rispetto all'attuale stato di fatto pari al 34%, ma presenta un periodo di ritorno del capitale investito di oltre 45 anni e un VAN a 20 anni negativo (-1'125'098 €).

Le misure più promettenti sia dal punto di vista energetico che economico risultano le misure che prevedono interventi sugli impianti. Infatti, le combinazioni di misure che risultano essere il miglior compromesso tra risparmio di energia primaria e redditività dell'investimento sono quelle corrispondenti alle sigle "CALD+PV" e "LED+C+REG+CALD+PV"; che prevedono, il primo la sostituzione dell'attuale caldaia tradizionale con una caldaia a condensazione e l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura del tetto in aggiunta a quello esistente (CALD+PV); il secondo, rispetto alla prima combinazione, prevede anche il rifacimento del sistema di illuminazione interno attraverso l'installazione di lampade LED e rilevatori di presenza in ogni ambiente e l'adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione e l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura del tetto in aggiunta a quello esistente (LED+C+CALD+REG+PV).

In dettaglio, la prima combinazione di interventi (CALD+PV), predilige l'aspetto economico associato alla riqualificazione stessa. Prevede infatti, al fronte di un costo di investimento complessivo pari a 200'388 €, un SPB pari a 6 anni, un Discount Pay Back pari a 8 anni e un VAN al ventesimo anno positivo pari a 267'015 €. Mentre il fabbisogno complessivo di energia primaria risulta circa pari a 115 kWh/m² con una riduzione complessiva del fabbisogno energetico rispetto allo stato di fatto di circa il 22%.

La seconda combinazione di interventi (LED+C+CALD+REG+PV) invece, predilige di fatto i vantaggi dal punto di vista energetico, prevedendo infatti un fabbisogno complessivo di energia primaria di circa 105 kWh/m², comportando quindi una riduzione complessiva del fabbisogno energetico di circa il 29% rispetto all'attuale stato di fatto; al fronte di un costo di investimento complessivo pari a circa 612'254 €, si ha un SPB pari a 13 anni e un Discount Pay Back pari a 17 anni; inoltre al ventesimo anno il VAN risulta sempre positivo e pari a 76759,8 €.

Codice intervento	Energia primaria				ΔE_p [%]	CO ₂ [10 ³ kg]	ΔCO_2 [%]	CI [€]	SPB [anni]	DPB [anni]	VAN [a 20 anni]
	Elettrico	Gas	Totale	Totale/m ²							
	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[kWh]							
CB	1000	1010	2010	148,24		584,31					
TvBe	996	932	1928	142,59	4,08%	567,24	2,92%	738'870	142	oltre 20 anni	-661'561
TvBe+FF	982	911	1894	139,65	5,79%	557,88	4,52%	1'443'070	192	oltre 20 anni	-1'331'315
REG	995	769	1764	130,13	12,22%	536,27	8,22%	48'732	3	4	179'202
LED	923	1040	1963	144,78	2,33%	556,44	4,77%	268'608	43	oltre 20 anni	-177'067
LED+C	846	1060	1906	140,58	5,17%	536,07	8,26%	363'134	28	oltre 20 anni	-170'902
CALD	1005	650	1655	122,03	17,68%	516,21	11,65%	105'988	5	6	216'690
CHIL	985	1010	1995	147,11	0,77%	574,56	1,67%	409'896	256	oltre 20 anni	-386'092
PV	906	1010	1916	141,34	4,65%	557,61	4,57%	94'400	10	12	50'328
REG+LED+C	849	822	1671	123,27	16,85%	488,66	16,37%	411'866	15	oltre 20 anni	-6'332
CALD+CHIL	980	650	1630	120,21	18,91%	507,93	13,07%	515'884	21	oltre 20 anni	-155'076
LED+C+CALD+CHIL	834	682	1516	111,83	24,56%	456,48	21,88%	879'018	23	oltre 20 anni	-321'931
LED+C+CALD+REG	849	671	1520	112,11	24,37%	460,34	21,22%	517'854	14	19	260'99
TvBe+FF+LED+C +CALD+CHIL+REG	820	591	1411	104,06	29,81%	433,58	25,75%	2'370'820	53	oltre 20 anni	-1'708'419
CALD+PV	911	650	1561	115,13	22,33%	489,51	16,22%	200'388	6	8	267'015
REG+LED+C+PV	756	822	1578	116,37	21,50%	461,96	20,94%	506'266	14	18	43'996
CALD+CHIL+PV	887	650	1536	113,31	23,57%	481,23	17,64%	610'284	18	oltre 20 anni	-104'736
LED+C+CALD+CHIL+PV	741	682	1423	104,93	29,22%	429,78	26,45%	973'418	21	oltre 20 anni	-271'596
LED+C+CALD+REG+PV	741	682	1423	104,93	29,22%	433,30	25,84%	612'254	13	17	76'760
TvBe+FF+LED+C+ CALD+CHILE+REG+PV	727	591	1317	97,16	34,46%	406,83	30,37%	2'465'220	45	oltre 20 anni	-1'125'098

Tabella 5. 8: Risultati dell'analisi energetica ed economica delle misure di retrofit applicate al caso studio

Conclusioni e raccomandazioni

La presente relazione descrive i risultati dell'audit energetico *del II 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 termici, illuminotecnici e a fonti rinnovabili;
- 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, ove possibile 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:

- incremento dell'isolamento dell'involucro opaco;
- sostituzione dei serramenti con altri caratterizzati da una maggiore resistenza termica;
- installazione di sistemi di schermatura esterni per i componenti finestrati;
- adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione;
- sostituzione/rifacimento dell'impianto di illuminazione interna;
- sostituzione/rifacimento dell'impianto di illuminazione esterna;
- sostituzione della caldaia tradizionale con una a condensazione;
- sostituzione del refrigeratore presente con uno caratterizzato da una maggiore efficienza;
- sostituzione delle UTA esistenti con macchine caratterizzate da una maggiore efficienza;
- installazione di un impianto fotovoltaico in aggiunta a quello esistente.

Tali misure sono state poi combinate in diversi pacchetti per tipologie di interventi. Per ciascuna delle misure definite 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), le emissioni evitate in termini di anidride carbonica equivalente e la variazione dei costi di esercizio rispetto all'edificio nello stato di fatto. Successivamente è stato stimato il costo indicativo di investimento, nonché il tempo di ritorno del capitale investito e il valore attuale netto dell'investimento stesso.

Analizzando i risultati dell'analisi energetica, è stato riscontrato che l'edificio nell'attuale stato di fatto è caratterizzato dal più alto fabbisogno, pari a 148 kWh/m².

Le misure più promettenti sia dal punto di vista energetico che economico risultano le misure che prevedono interventi sugli impianti. Infatti, le combinazioni di misure che risultano essere il miglior compromesso tra risparmio di energia primaria e redditività dell'investimento sono quelle corrispondenti alle sigle "CALD+PV" e "LED+C+REG+CALD+PV"; che prevedono, il primo la sostituzione dell'attuale caldaia tradizionale con una caldaia a condensazione e l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura del tetto in aggiunta a quello esistente (CALD+PV); il secondo, rispetto alla prima combinazione, prevede anche il rifacimento del sistema di illuminazione interno attraverso l'installazione di lampade LED e rilevatori di presenza in ogni ambiente e l'adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione e

l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura del tetto in aggiunta a quello esistente (LED+C+CALD+REG+PV).

In dettaglio, la prima combinazione di interventi (CALD+PV), predilige l'aspetto economico associato alla riqualificazione stessa. Prevede infatti, al fronte di un costo di investimento complessivo pari a 200'388 €, un SPB pari a 6 anni, un Discount Pay Back pari a 8 anni e un VAN al ventesimo anno positivo pari a 267'015 €. Mentre il fabbisogno complessivo di energia primaria risulta circa pari a 115 kWh/m² con una riduzione complessiva del fabbisogno energetico rispetto allo stato di fatto di circa il 22%.

La seconda combinazione di interventi (LED+C+CALD+REG+PV) invece, predilige di fatto i vantaggi dal punto di vista energetico, prevedendo infatti un fabbisogno complessivo di energia primaria di circa 105 kWh/m², comportando quindi una riduzione complessiva del fabbisogno energetico di circa il 29% rispetto all'attuale stato di fatto; al fronte di un costo di investimento complessivo pari a circa 612'254 €, un SPB pari a 13 anni e un Discount Pay Back pari a 17 anni; inoltre al ventesimo anno il VAN risulta sempre positivo e pari a 76759,8 €.

Appendice

Fonti voci di costo considerate per la stima dei costi di investimento associati agli interventi di riqualificazione energetica valutati per il II Edificio Polifunzionale

1. Sostituzione serramenti

	m ²	€/m ²	€	Fonte
Fornitura e posa in opera serramenti esterni con telaio in lega di alluminio verniciato a taglio termico, con triplo vetro mm (4+4)-12A-4T-12A-(4+4) accoppiato antiscasso Classe P con trattamento basso emissivo con gas Argon, per un valore finale del serramento U _w pari a 1,2 W/m ² K. La tipologia di vetro garantisce inoltre valori molto buoni di isolamento acustico (42dB), di resistenza antieffrazione e antinfortunistica in accordo con la normativa UNI7697. Ad una o più ante, compreso ogni ulteriore onere utile a dare l'opera realizzata e finita secondo la regola dell'arte. Compreso taglio e sfridi, ponteggi, opere murarie, controtelaio, maniglie, riprese di intonacature e tinteggiature, coprifili. Prezzo medio per finestre e portefinestre	1'500 (sono escluse pareti in vetrocement o e lucernai sul tetto)	480	720'000	Computo metrico in rete: http://www.comune.turriaco.go.it/portale/export/sites/turriaco/allegati/archivio_file/Tecnico/ScuolaPrimaria/COMPUTO.pdf
Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombrò dei detriti, il trasporto degli stessi alle discariche, compreso la rimozione e l'accatastamento dei vetri nel caso di serramenti, computando le superfici prima della demolizione. Con una superficie di almeno m ² 0,50		12,58	18'870	Computo metrico in rete: https://www.guarene.it/wp-content/uploads/2017/06/ALLEGATO-5-3.pdf

Costo complessivo stimato per sostituzione dei componenti finestrati: 738'870 €.

2. Installazione schermature solari

	m ²	€/m ²	€	Fonte
Fornitura e posa in opera di frangisole in alluminio fisso con doghe in alluminio 50mmx15mm.	1'400 (escluso ingressi, porte, e serramenti piano terra e primo esposizione sud)	430	602'000	https://www.modaedile.com/p/preventivo-frangisole-in-fisso-e-scorrevole
Posa in opera qualificata compreso attrezzatura e materiali di consumo		73	102'200	

Costo complessivo stimato per sostituzione serramenti e installazione di sistemi frangisole: 1'443'070 €.

3. Sostituzione lampade con LED

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Fornitura - plafoniere ad incasso Disano 841 Minicomfort LED x3 da 25W con efficienza pari a 156 lm/W, UGR < 16, flusso luminoso iniziale pari a 3900 lm, temperatura di colore pari a 4000K, cablati con reattore elettronico dimmerabile e vita utile di 80.000h	1000	180,57	180'570	Catalogo Disano- Prezzi in rete: https://www.domuswire.com/search/scheda_prodotto.jsp?cprodotto=Disano+15353407&t=153534-07%A0+++++CLD+CEE%A0++++++3%2C21+%A0+++++LED+w+hite+25W++++++-+++++3900lm-4000K-CRI%3E80+++++BIANCO%A0+++++%A0++++++5Bfalse%5D++++++%A0++++++&ccategoria=40159
Costo di installazione, compreso quanto occorre per dare il lavoro finito - n.2 installatore 5a categoria - tempo di installazione 0,5 h/cad	1000	81,0	81'000	Preziario Regione Molise; https://www.inps.it/doc/Allegati/InpsSettings/Lists/AllegatiGare/Gara_b584/SCM-C.1.01.pdf

	Quantità (peso)	€/kg	€	Fonte
Demolizione e rimozione di strutture metalliche di qualsiasi natura, di tubazioni metalliche, di componenti d'impianti tecnologici e relativi elementi provvisori metallici di fissaggio, di quadri elettrici e schermature di protezione alle apparecchiature elettriche, compreso lo sgombero dei detriti con carico e trasporto alle pubbliche discariche	3'400	2,07	7'038	https://www.guarene.it/wp-content/uploads/2017/06/ALLEGATO-5-3.pdf

	Peso	Quantità	Peso tot	Fonte
Si è scelta una lampada analoga a quella esistente per avere una stima per peso CODICE 151301-08 CEL-F FL 1x36 3350lm-4000K-Ra 1b G13 37 W TOT BIANCO	3,40	1000	3'400	http://catalogo.disano.it/it/classic/disano-apparecchi-da-incasso/disano-comfort-serie-8/874-comfort-t8-ottica-speculare-99-99-bordo-largo#

Costo totale di intervento stimato per sostituzione lampade con LED: 268'608 €

4. Installazione sensori di presenza e illuminazione per il controllo apparecchi illuminanti

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Fornitura rilevatori Busch-Jaeger ABB	400	212	84'800	Da listino ABB 2018 in rete: https://library.e.abb.com/

	Quantità	€/h	€	Fonte
Costo di manodopera per l'installazione e il settaggio dei dispositivi - n.1 installatore 5a categoria (27 €/h) - n. 1 installatore di 2° categoria (21,63 €/h) - tempo di installazione: 30 min/cad	200 h	48,63	9'726	Preziario Regione Molise

Costo totale di intervento stimato per sostituzione lampade con LED e sensori di controllo: 363'134 €

5. Adeguamento del sistema di regolazione degli impianti

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Termostato per fan coil art. CH130ARR -KIT: termostato CH130AR e attuatore CH172D, per montaggio a parete, in grado di pilotare due valvole e comandare un motore per fan coil a 3 velocità.	315	120,00	37'800	Listino FANTINI COSMI (2018): http://www.idroft.net/FLIPBOOK/ROSSI/ELERSA/FCS/FANTINICOSMI%20-%20LISTINO%202018/index.html
CANALI ARIA Fornitura e installazione termostato per il controllo della temperatura all'interno dei canali ad aria	6	400,00	2'400	Ufficio tecnico

	Quantità	€/h	€	Fonte
INSTALLAZIONE Termostati per fan coil - n.2 installatori di 5a categoria - tempo di installazione: 30 min/cad	158 h	54,00	8'532	Prezziario Molise - conferma Ufficio tecnico

Costo totale di adeguamento del sistema di regolazione a livello di singolo ambiente: 48'732 €

6. Sostituzione caldaie esistenti con caldaie a condensazione

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Fornitura caldaia a basamento a condensazione con potenza al focolare di 1000 kW	2	48'193,7	96'387	Computo metrico in rete
Costi di installazione incluso -l'onere di smontaggio due caldaie esistenti ed annesse apparecchiature taglio e chiusura delle tubazioni di adduzione e scarico, trasporto a rifiuto ed oneri di discarica: 2'000 € -opere murarie a seguito della sostituzione dei	1	9'600	9'600	computo metrico per il III Polifunzionale del 05/07/2017

<p>generatori per la demolizione e rifacimento dei basamenti di appoggio: 2'000 €</p> <p>-quadro di comando caldaia per temperature di esercizio fino a 90°C, montaggio sopra caldaia, funzioni di termoregolazione per circuito di riscaldamento diretto, carica bollitore comprendente sonda esterna, sonda interna mandata e sonda bollitore; possibilità di ampliamento delle funzioni: 2'000 €</p> <p>-modifica tubazioni per adeguamento alle nuove caldaie, comprendente lo smontaggio delle tubazioni fluidi e scarico esistenti, posa in opera di nuove tubazioni con ripristino delle coibentazioni e condotti fumari:3'600 €</p>				
---	--	--	--	--

Costo totale di sostituzione caldaie: 105'988 €

7. Sostituzione refrigeratorii esistenti con nuovi caratterizzati da maggiore efficienza

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Fornitura chiller 800kW	2	196'344	392'688	Listino prezzi 2016 ferroli
<p>Costi di installazione incluso</p> <p>-rimozione di tutti i componenti ed accessori dell'impianto esistente: 874,9 €</p> <p>-trasporto a discarica di tutti i componenti ed accessori rimossi dall'impianto esistente: 188,01 €</p> <p>-conferimento a discarica autorizzata dei materiali rimossi: 1044,91 €</p> <p>-collegamento all'impianto di distribuzione esistente: 2300,58 €</p>	1	4'408,4	4'408	Computi metrici in rete
- trasporto e posizionamento dove previsto, scarico con idonei mezzi, posa in opera in opportuni sistemi e supporti: 6400 €/cad	2	6400	12'800	Computi metrici in rete

Costo totale di sostituzione chieller: 409'896 €

8. Installazione impianto fotovoltaico

Fornitura e posa in opera di impianto fotovoltaico, mediante moduli fotovoltaici di provenienza europea, dispositivi inverter e tutte le apparecchiature elettriche ed elettroniche per convertire la corrente da continua ad alternata ad adeguato voltaggio, stabilizzare, contabilizzare l'energia prodotta, auto consumata o immessa in rete, strutture di supporto e installazione adeguatamente posate in opera, con manodopera qualificata, utilizzo di materiali idonei (cavi, centraline, sistemi di sicurezza) - 2000 €/kWp

Costo totale di intervento stimato: 94'400 €.

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".