

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 Ramacciati
Ing. Ramona Tucci
Ing. Gianmarco Procaccini
Arch. Basile Fabio

data
Giugno 2020

agg.to
Settembre 2022

revisione
03

allegato

**CALCOLO AUDIT ENERGETICO
EDIFICIO III POLIFUNZIONALE**

tavola

CIIP

rapp.

file

Indice

PREMESSA	1
1. METODOLOGIA DI AUDIT ENERGETICO	3
2. DIAGNOSI ENERGETICA DEL III EDIFICIO POLIFUNZIONALE	6
2.1 CARATTERIZZAZIONE TERMO-FISICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO: AUDIT D'INVOLUCRO	7
2.1.1 Involucro trasparente.....	7
2.1.2 Involucro opaco.....	9
2.2 DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI ASSERVITI ALL'EDIFICIO: AUDIT DEGLI IMPIANTI	13
2.2.1 Impianti termici.....	13
2.2.2 Impianti illuminotecnici.....	19
2.3 DESTINAZIONE D'USO E MISURA DEI PARAMETRI AMBIENTALI INTERNI: AUDIT DELLE ZONE TERMICHE	20
2.3.1 Elaborazione del monitoraggio.....	25
3. COSTRUZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE DINAMICA	37
4. METODOLOGIA DI ANALISI DEGLI SCENARI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA	39
5. ANALISI DEGLI SCENARI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA PER IL III EDIFICIO POLIFUNZIONALE	40
5.1 DEFINIZIONE DEGLI INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA	40
5.1.1 Interventi per la riqualificazione energetica della centrale termica.....	41
5.1.2 Installazione di recuperatori di calore all'interno delle UTA nella sotto-centrale I lotto	43
5.1.3 Adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione	44
5.1.4 Rifacimento dell'impianto di illuminazione interna	47
5.1.5 Sostituzione dei serramenti	49
5.1.6 Installazione di un impianto fotovoltaico	51
5.1.7 Incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco	53
5.2 Misure di efficienza energetica applicate allo stato di fatto	55
CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	60
APPENDICE.....	63
DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	71

Premessa

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

Lo studio si articola in due fasi; la prima consiste in un dettagliato audit energetico del *III edificio Polifunzionale*, sede amministrativa e didattica del *Dipartimento di Agricoltura, Ambiente e Alimenti dell'Università degli Studi del Molise*, finalizzato alla conoscenza degli usi finali di energia, all'individuazione e all'analisi di inefficienze e criticità che saranno propedeutiche alla seconda fase, che consiste invece nella 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 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 III edificio Polifunzionale

Il III edificio Polifunzionale è sede amministrativa e didattica del Dipartimento di Agricoltura, Ambiente e Alimenti dell'Università degli Studi del Molise, sito in Campobasso (come indicato in *Figura 2.1*), e presenta una superficie utile complessiva pari a circa 11069.7 m².

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.

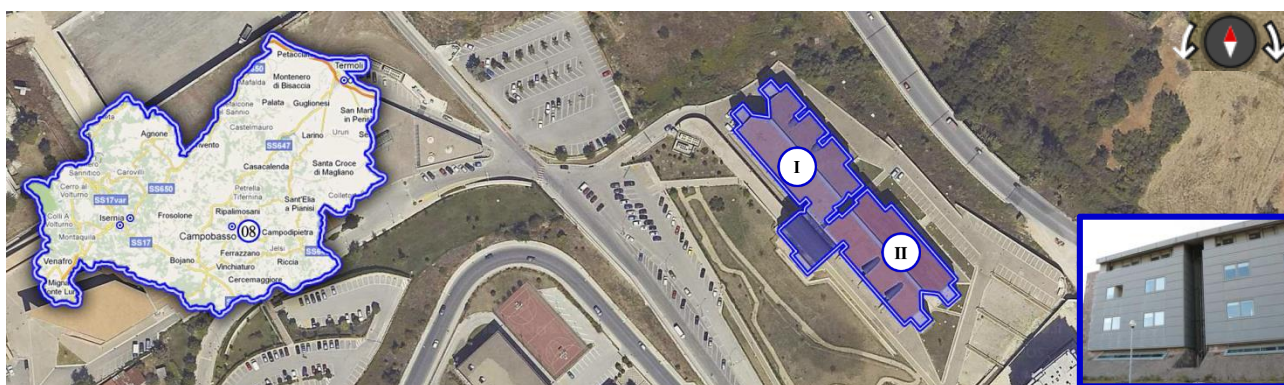


Figura 2.1: Vista satellitare del III edificio Polifunzionale del Dipartimento di Agricoltura, Ambiente e Alimenti dell'Università degli Studi del Molise.

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.

Il complesso edilizio oggetto di diagnosi è caratterizzato da due lotti speculari (lotto I e lotto II, in *Figura 2.1*) comunicanti per mezzo di una struttura esterna con copertura a cupola che funge da atrio. Entrambi i lotti presentano una pianta rettangolare terminando alle estremità con due torri con altezza di circa 15 m. Ciascun lotto si sviluppa su sei livelli; un piano completamente interrato in cui ha sede la centrale idrica e la

sottostazione “UTA-RADIOISOTOPI”; un piano terra, un piano primo, un piano secondo e un piano terzo di uguale estensione; infine, un sottotetto adibito a sotto-centrale, dove trovano posto le unità di trattamento aria, le pompe di alimento, il quadro elettrico di comando delle UTA e degli stessi gruppi di spinta. Al piano terra del complesso edilizio, è presente, in un'appendice funzionale dello stesso, un locale appositamente dimensionato per ubicare la centrale termica nonché i depositi per rifiuti speciali.

In particolare, il complesso edilizio oggetto di calcolo risulta essere costituito dai due lotti e dalla struttura esterna (atrio), a partire dal piano terra fino al piano terzo. I piani interrati e sottotetti dei relativi fabbricati, nonché il locale impianti, risultano non serviti da impianti termotecnici, di conseguenza, non è possibile valutare per essi un fabbisogno di energia. Pertanto, benché sia stato necessario caratterizzarli per ricostruire un modello reale e attendibile dell'edificio, 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 si è fatto riferimento agli elaborati grafici originali (piante sezioni e prospetti) relativi all'edificio, oltre che alla descrizione stratigrafica di pareti e solai.

La superficie utile complessiva dell'edificio è circa pari a 11070 m², di cui quella netta condizionata risulta essere circa 10498 m², mentre il rapporto S/V è di 0,376. 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)	9289,51	2152,86	2576,45	2230,58	2329,61
Superficie opaca fuori terra (m ²)	9283,88	2148,26	2576,45	2230,58	2328,58
Superficie trasparente (m ²)	1244,88	217,20	381,81	273,71	372,17
Rapporto opaco/finestrato (%)	13,40	10,09	14,82	12,27	15,98

Tabella 2.2: Percentuale d'involucro opaco e trasparente.

2.1.1 Involucro trasparente

I componenti finestrati del complesso edilizio oggetto di studio sono di diverse tipologie. La prima tipologia riguarda tutte le finestre e le portefinestre presenti identicamente nei due lotti. Tali serramenti si compongono di un vetrocamera chiaro e telaio e divisori in alluminio. In particolare, lungo il lato nord-est e sud-ovest dell'edificio sono presenti principalmente finestre a doppia anta (piano primo e secondo, *Figura 2.2 A*) e a otto ante (piano terzo, *Figura 2.2 B*) con apertura a vasistas. A livello del piano terra si distribuiscono finestre a otto ante per uffici e laboratori del I lotto (*Figura 2.2 G*), mentre nelle aule del II lotto sono presenti finestre inclinate a sei ante non apribili (*Figura 2.2 C*). Per le esposizioni nord-ovest e sud-est, in corrispondenza delle torri (lato esterno dell'edificio) sono collocate finestre a doppia anta con chiusura a battente (*Figura 2.2 E*), mentre per la sola esposizione sud-est, sono presenti finestre e porte

finestre a singola e doppia anta (*Figura 2.2 D*); verso il lato interno, invece, si dispongono finestre inclinate a otto ante non apribili (primo piano, biblioteca e segreteria studenti rispettivamente nel I e II lotto, *Figura 2.2 H*), seguite da finestre a singola e doppia anta per i piani superiori (*Figura 2.2 F*). Inoltre, lungo l'esposizione nord-est del I lotto si collocano finestre a dieci ante (*Figura 2.2 L*) per la biblioteca (piano terra e piano primo) e per la segreteria di dipartimento (piano secondo e piano terzo). Per quanto riguarda i componenti finestrati nell'atrio, l'esposizione a sud-ovest prevede la presenza di pareti esterne vetrate (*Figura 2.2 M*) con vetro stratificato a U, mentre le finestre si caratterizzano da un sistema a telaio fisso non apribile, ad eccezione delle porte di ingresso/uscita (*Figura 2.2 N*). Tali serramenti si compongono di un vetro chiaro stratificato con telaio e divisori in alluminio, mentre al piano terzo, in corrispondenza della parte congiungente i due lotti, è presente una parete vetrata (*Figura 2.2 P*) e un lucernario (*Figura 2.2 O*) con vetro a U a camera d'aria. Infine, nel II lotto sono presenti al piano terra e piano primo (esposizione nord-est) pareti esterne vetrate con vetro a U a camera d'aria, di cui quella al piano terra si completa con una parete esterna curva realizzata interamente in vetrocemento (*Figura 2.2 I*).



Figura 2.2: Tipologie di componenti finestrati dell'edificio.

La *Tabella 2.3* riporta, per le tipologie di componente finestrato sopra indicate, i valori della trasmittanza 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)
Parete esterna vetrata	3.26
Vetrocemento	2.88
Porta esterna vetrata	3.67
Altri componenti finestrati	2.97 ÷ 3.28

Tabella 2.3: Trasmittanza componenti finestrati.

Inoltre, sono state censite tre tipologie di sistemi di schermatura interni e riportate in *Figura 2.3*. In particolare, per tutte le finestre si tratta di tende alla veneziana o a lamelle verticali in tessuto rigido chiaro, ad esclusione di quelle presenti nell'atrio e nel corridoio per il vetrocemento, di fatto prive di un sistema di schermatura. Un'ulteriore tipologia riguarda le schermature delle finestre inclinate della biblioteca (I lotto) e della segreteria studenti (II lotto), che prevedono tende a scorrimento in tessuto chiaro.

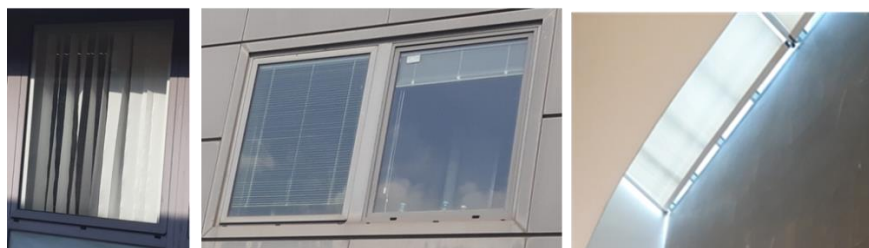


Figura 2.3: Sistemi di schermatura per i componenti finestrati dell'edificio.

2.1.2 Involucro opaco

L'immobile è costituito da diverse tipologie di pareti esterne, di cui quelle predominanti sono riconducibili a due tipologie. La prima (*parete esterna isolata con porfido*) si compone di laterizi alleggeriti, intercapedini d'aria e finitura con porfido; tale parete è presente lungo l'esposizione sud-est e nord-ovest (in parte verso il lato interno e totalmente verso quello esterno-torri), in parte lungo il lato nord-est e al piano terra di ciascun lotto. La seconda tipologia (*parete in alucobond*) riguarda la parete formata principalmente da laterizi alleggeriti, calcestruzzo cellulare autoclavato, materiale isolante in fibre minerali, barriera al vapore e completato da pannelli in alluminio; tale parete è disposta lungo i lati longitudinali (a nord-est e sud-ovest) e parzialmente lungo i lati trasversali interni (a sud-est e nord-ovest) del complesso edilizio.

I solai interpiano e dei sottotetti sono costituiti da elementi tipo predalles di altezza 24 cm con rete elettrosaldata, oltre al massetto e pavimento, per uno spessore complessivo di circa 58 cm. Invece il solaio di copertura dell'atrio, sul quale è poggiato il terrazzo ("soffitto a terrazzo"), si completa da uno strato di

intonaco di calce e gesso, anziché di cartongesso, per uno spessore totale di circa 48 cm. Inoltre, la copertura a cupola dell'atrio è rifinita da lamiere di acciaio.

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

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

Stratigrafia	Spessore totale (m)	Trasmittanza totale (W/m ² K)	Trasmittanza periodica (W/m ² K)
Parete esterna isolata int. syporex (atrio)	0,330	0,692	0,364
Parete esterna isolata con porfido	0,430	0,904	0,423
Parete in alucobond	0,460	0,324	0,097
Parete interna verso locale non riscaldato	0,300	0,964	0,498
Parete esterna. isolata con cortina (elementi esterni dell'atrio)	0,310	1,077	0,528
Pavimento su esterno	0,520	0,481	0,020
Pavimento su vespaio aerato tipo pietra	0,610	0,412	0,010
Soffitto sottotetto	0,580	0,454	0,020
Copertura cupola	0,200	0,407	0,250
Soffitto a terrazzo	0,480	0,524	0,046

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 W/m²K (a partire dal 2015) ovvero a 0,28 W/m²K (a partire dal 2019); mentre per le strutture opache orizzontali tale valore dovrebbe essere inferiore o uguale a 0,26 W/m²K (a partire dal 2015) e 0,24 W/m²K (a partire dal 2019).

Quindi nella condizione attuale l'edificio oggetto di calcolo risulta avere un livello di isolamento relativamente basso (ad eccezione della parete in alucobond in cui è difatti previsto l'isolamento termico), 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) il valore del modulo della trasmittanza termica periodica deve essere inferiore a $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Invece, con riferimento alle pareti opache orizzontali e inclinate, il predetto valore deve essere inferiore a $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$. Analizzando i valori riportati in *Tabella 2.4*, emerge che, in regime estivo, solo la parete in alucobond, predominante nelle esposizioni sud-ovest e nord-est, rispetta il limite previsto per la trasmittanza termica periodica, limitando il surriscaldamento degli ambienti interni durante il suddetto regime. Inoltre, per la succitata parete, l'isolamento termico fornisce una trasmittanza termica poco superiore ai $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$, favorendo, dunque il contenimento delle dispersioni termiche in regime invernale. Diversamente, le prestazioni delle pareti esterne con porfido, come tutti gli altri componenti di involucro, sono da ritenersi non soddisfacenti sia in regime invernale che estivo.

Inoltre, al fine di aumentare le possibilità di interpretazione dei dati, si è ritenuto opportuno prevedere per l'edificio in esame 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 è la FLIR E8 (*Figura 2.4*); le cui caratteristiche tecniche sono le seguenti:

- Risoluzione IR: 320×240 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: $0,5 \text{ m}$;
- Risoluzione spaziale (IFOV): $2,6 \text{ mrad}$;
- Rilevatore: FPA microbolometro non raffreddato;
- Intervallo spettrale: $7,5 - 13 \text{ }\mu\text{m}$;
- Display LCD a colori da $3''$ 320×240 ;



Figura 2.4: Termocamera impiegata.

- Intervallo di temperatura dell'oggetto: da -20°C a +250 °C;
- Accuratezza: $\pm 2\text{ °C}$ o $\pm 2\%$ della lettura, per la temperatura;
- ambiente da 10 a 35°C e temperatura dell'oggetto superiore a 0 °C.

Le analisi termografiche sono state svolte in regime invernale (17/01/2018) e sono state condotte sia sui prospetti che all'interno dell'edificio, nel primo caso al fine di 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 stato 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. I rilievi termografici sono stati effettuati in condizione di cielo coperto intorno alle 17:00.

A scopo esemplificativo, nella *Figura 2.5*, sono riportate alcune immagini all'infrarosso riferite al prospetto nord-est.

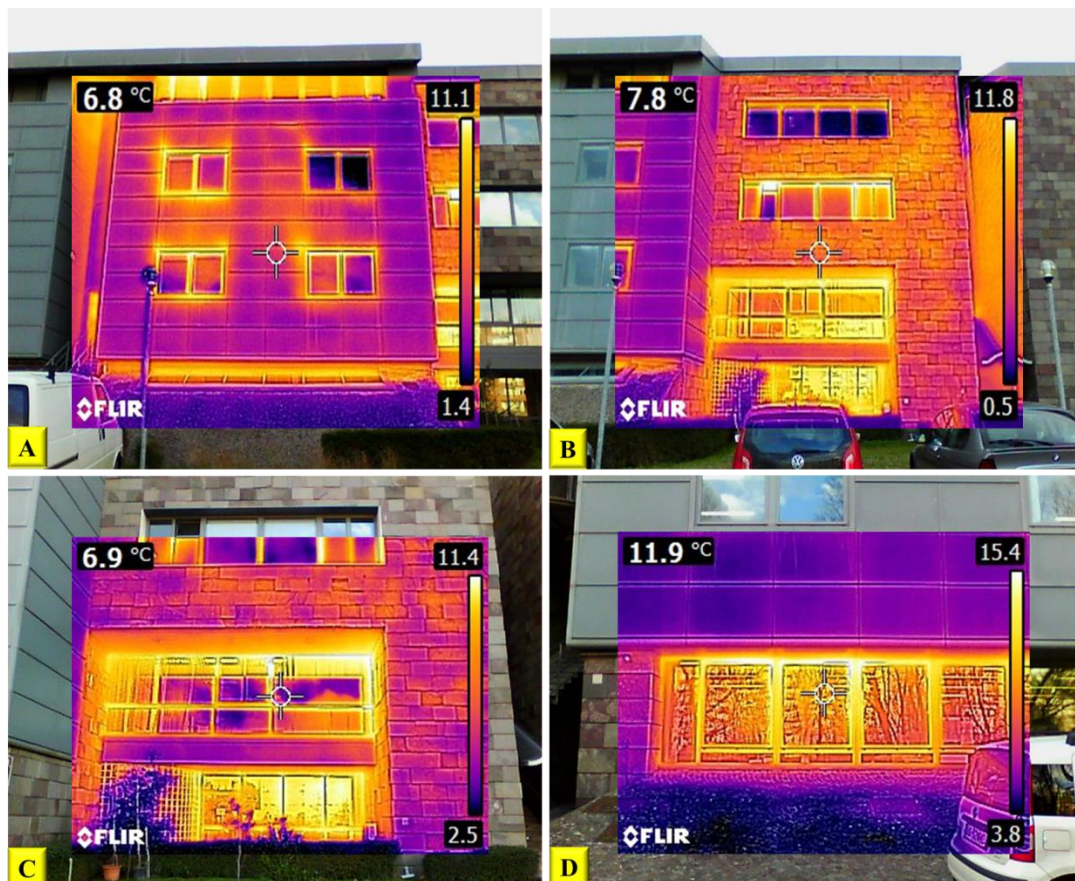


Figura 2.5: Immagini IR e fotografiche dei componenti edilizi esposti a nord-est (17/01/2018).

In particolare, le immagini A e B forniscono una visione completa sul comportamento termico delle due tipologie di pareti predominanti nell'involucro opaco, ovvero la parete in alucobond e la parete esterna isolata con porfido. Nello specifico, è possibile osservare come l'isolamento termico previsto nella parete in

alucobond (*Figura 2.5, A*) fornisce un contenimento dei flussi termici dispersi verso l'ambiente esterno; al contrario, per la parete esterna isolata con porfido (*Figura 2.5, B*) si riscontrano significative dispersioni termiche causate dall'assenza al suo interno di un isolante termico.

Inoltre, dalle immagini C e D in *Figura 2.5* si registrano forti dispersioni termiche in corrispondenza dei componenti finestrati, dovute al fatto che essi presentano una temperatura superficiale superiore rispetto a quella rilevata in corrispondenza del componente opaco in cui sono inseriti.

Per quanto riguarda invece i restanti prospetti, non è stato possibile effettuare per essi analisi termografiche attendibili, a causa delle condizioni meteorologiche non idonee alla misura al momento dei sopralluoghi.

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 degli Studi del Molise e ove possibile sono stati reperiti i libretti delle macchine costituenti gli impianti, cercando di individuare tipologia, potenza termica e caratteristiche di efficienza. Inoltre, sono stati condotti una serie di sopralluoghi con lo scopo di effettuare ispezioni e misure sugli impianti a servizio dell'edificio in esame, nonché individuare il numero e il tipo di terminali presenti, la loro collocazione e la presenza di eventuali sistemi di regolazione. In tal modo è stato quindi possibile caratterizzare gli impianti di riscaldamento, climatizzazione e produzione dell'acqua calda sanitaria, nonché il sistema di illuminazione interno dell'edificio.

2.2.1 Impianti termici

L'impianto termotecnico principale installato nell'edificio in esame è del tipo misto aria-acqua, e soddisfa le esigenze di riscaldamento e qualità dell'aria per l'84% della superficie netta climatizzata. Per la restante porzione di superficie (costituita dalle aule a gradoni, biblioteca e atrio), 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 ubicato al piano terra in un'appendice del complesso edilizio. 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 sono collocate nelle sotto-centrali situate nei sottotetti dei relativi lotti, ad eccezione dell'*UTA-RADIOISOTOPI* situata in una sotto-stazione interrata. In *Figura 2.6* vengono evidenziate le posizioni dei predetti sistemi rispetto ai fabbricati.

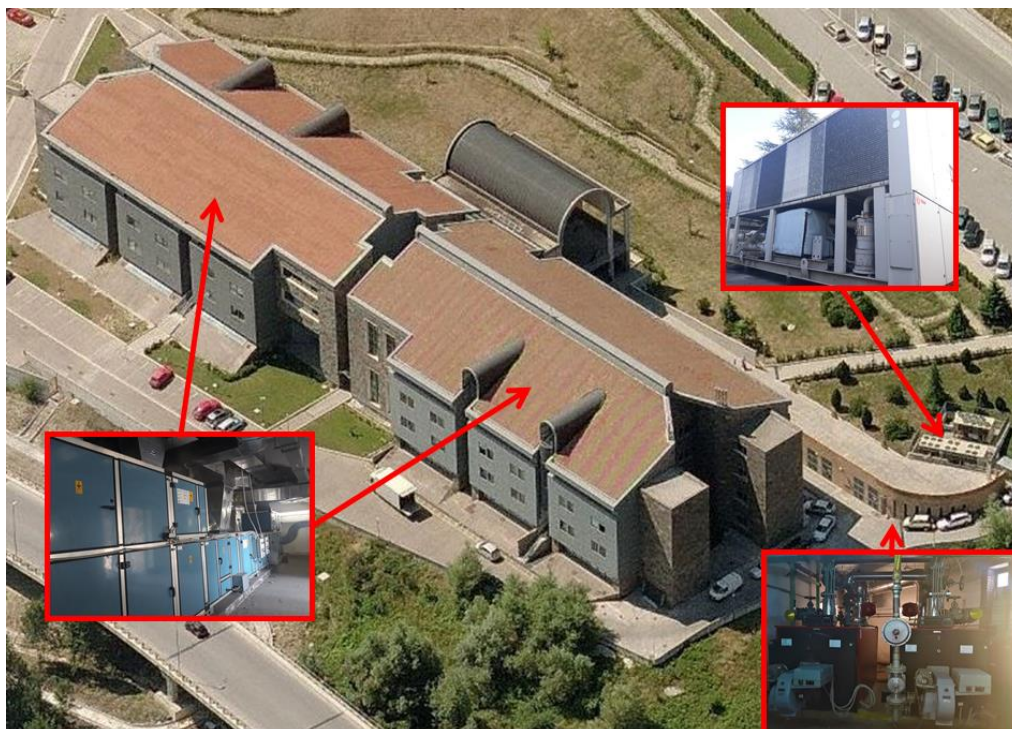


Figura 2.6: Collocazioni rispetto all'immobile delle macchine asservite all'edificio.

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, più funzionamento per antigelo notturno, mentre per i mesi intermedi dalle ore 7:00 alle ore 12:00 e dalle ore 15:00 alle ore 18:00;
- per il **raffrescamento**: dal 15 giugno al 31 agosto dal lunedì al venerdì, dalle ore 07:00 alle ore 18:00 (escludendo il periodo delle vacanze estive);
- per la **climatizzazione dell'aria**: tutto l'anno (salvo pause per vacanze estive o invernali) dal lunedì al venerdì dalle ore 7:00 alle ore 18:00.

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

Sino a marzo 2018 (periodo in cui sono stati effettuati i sopralluoghi) la centrale termica asservita all'edificio era costituita da due generatori di calore GAE 60 - Sant'Andrea in acciaio pressurizzato ad acqua calda, alimentati a gas naturale e collegati in parallelo (Figura 2.7). Nella Tabella 2.5 sono riportate alcune caratteristiche delle caldaie in questione.



Figura 2.7: Caldaie Sant'Andrea asservite all'edificio.

Caldaia Sant'Andrea-modello GAE 60	
Potenza utile nominale (kW)	700
Temperatura di esercizio massima (°C)	90
Rendimento termico utile al carico nominale (%)	90
Pressione massima di esercizio (bar)	5

Tabella 2.5: Caratteristiche tecniche caldaie.

Rispetto al succitato periodo in cui è avvenuto il sopralluogo, all'interno dello stesso locale impianti erano presenti due boiler (*Figura 2.8*) per la produzione e accumulo di acqua calda sanitaria, alimentati direttamente dalle caldaie, dalla capacità di 1500 litri ciascuno, e di cui uno non in funzione.



Figura 2.8: Accumulo per ACS.

Successivamente al periodo dei sopralluoghi, sono stati realizzati interventi di riqualificazione energetica in centrale, provvedendo a sostituire le due caldaie esistenti con due caldaie Sant'Andrea pressurizzate ad alto rendimento da 766 kW ciascuna e i due boiler esistenti con due bollitori ad accumulo verticale da 1500 litri cadauno. Essendo di recente installazione, per tali componenti non si dispongono dettagliate informazioni se

non quelle reperibili da documentazioni tecniche e computo metrico a corredo per la realizzazione dei suddetti interventi. Per maggiori dettagli si rimanda alla sezione dedicata agli interventi di risparmio energetico.

Per quanto riguarda la produzione di acqua refrigerata, l'edificio è dotato di due macchine frigorifere raffreddate ad aria della TRANE, mostrate in *Figura 2.9*.



Figura 2.9: Macchine frigorifere allocate in uno spazio esterno della centrale.

Tali gruppi frigoriferi sono differenti per taglia e modello; in particolare, quello con resa frigorifera maggiore, pari a 735 kW, è il modello ERTAA 324 con R404A come fluido refrigerante ed è a servizio del II lotto e dell'atrio, mentre il I lotto è servito dal gruppo con potenza frigorifera di 484 kW, relativo al modello RTAC 140 avente R134A come fluido refrigerante.

Le macchine della centrale termo-frigorifera, sono poi interfacciate con le nove unità di trattamento aria (*Figura 2.10*) che servono il complesso edilizio, di cui quelle presenti nella sotto-centrale del II lotto non è stato possibile reperire informazioni relative alla portata trattata.



Figura 2.10: Unità di trattamento dell'aria installata nella sotto-centrale dedicata.

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

Per il I lotto:

- “*UTA aria primaria 1*” con una portata d'aria pari a 21000 m³/h, provvede al trattamento dell'aria e alla climatizzazione di uffici, laboratori e zone di circolazione;
- “*UTA aule*” provvede, con una portata d'aria pari a 7450 m³/h, alla climatizzazione delle due aule a gradoni che si sviluppano rispettivamente tra il piano terra e il primo piano e tra il secondo e terzo piano;
- “*UTA biblioteca*” serve con una portata di 21900 m³/h la biblioteca situata tra il piano terra e primo piano;
- “*UTA atrio*” con portata di 7000 m³/h è a servizio dell'atrio (fungendo anche da zona studio) a partire dal piano terra fino al terzo piano.

Per il II lotto:

- “*UTA aula gradoni*” provvede alla climatizzazione dell'aula Mendel che si sviluppa tra il secondo e terzo piano;
- “*UTA segreteria*” dedicata alla segreteria studenti al primo piano;
- “*UTA aria primaria 2*” destinata al trattamento dell'aria di uffici, laboratori, aule (relative ai piani superiori al piano terra) e zone di circolazione;
- “*UTA aule piano terra*” soddisfa le richieste di rinnovo e qualità dell'aria, nonché la climatizzazione delle aule ubicate al piano terra.

Nella sotto-centrale interrata è presente un' “*UTA radioisotopi*”, dalla portata di 2700 m³/h, al servizio di laboratori di tipo chimico.

Tutte le UTA elencate sono dotate di una batteria di pre-riscaldamento e una di post-riscaldamento, mentre quella a servizio della biblioteca prevede solo una batteria di riscaldamento e di raffrescamento. Tali batterie sono alimentate dalla centrale termica e frigorifera. Inoltre, le suddette UTA dispongono di un umidificatore a pacco evaporante, che però risulta non essere in funzione. Infine, solo per le UTA presenti nella sotto-centrale del II lotto è prevista anche la presenza di un recuperatore statico a flussi incrociati per il recupero del contenuto energetico dell'aria espulsa e per esso è stato ipotizzato il solo funzionamento in regime invernale.

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

- per zone quali uffici, laboratori, zone di circolazione (ad eccezione del corridoio al piano terra del II lotto) e aule del II lotto (escluse le aule al piano terra e le aule a gradoni), è presente un sistema di tipo misto con diffusori o bocchette a soffitto, per l'immissione di aria, e terminali ad acqua di tipo fan coil;

- solo nelle aule e corridoio al piano terra del II lotto, oltre alla presenza in ambiente di bocchette a parete, sono presenti terminali quali radiatori in ghisa;
- nelle aule a gradoni (due al I lotto e una al II lotto) e in biblioteca (I lotto) è installato un sistema a tutt'aria con diffusori a soffitto;
- nei servizi igienici, non è stato censito nessun tipo di terminale;
- infine, nell'atrio è prevista l'immissione ed estrazione dell'aria con bocchette installate a parete (lato scale di ciascun piano).

Complessivamente, oltre alle innumerevoli bocchette di immissione dell'aria dislocate in quasi ogni locale dell'edificio, sono stati censiti circa 400 fan-coil e 35 radiatori.

Nel corso dei diversi sopralluoghi effettuati, per i terminali presenti in ambiente, è stata effettuata una misura puntuale dell'aria da essi immessa acquisendo tale informazione tramite rilievo termografico, che ha permesso di mappare la temperatura superficiale dei terminali analizzati. E' emerso che, per le giornate in esame (14/03/18 e 27/03/18), la temperature dell'aria immessa dalle bocchette/diffusori risultano essere superiori a 30 °C. Si sottolinea quindi che, non essendo in alcun modo possibile fare una regolazione della temperatura di mandata, nel caso delle *UTA aria primaria 1*, *UTA segreteria*, *UTA aria primaria 2*, *UTA aule piano terra* e *UTA radioisotopi*, tale temperatura risulta superiore al valore generalmente utilizzato negli impianti misti, laddove cioè la parte ad aria dell'impianto ha il solo compito di bilanciare il carico latente e di soddisfare i requisiti relativi al rinnovo dell'aria. A scopo esemplificativo è mostrata l'immagine termografica di una delle bocchette di immissione presenti nell'aula A.B. Keys dell'edificio (*Figura 2.11*).



Figura 2.11: Immagine termografica di un terminale aeraulico.

Per quanto riguarda i terminali idronici, durante i sopralluoghi, è risultato, a mezzo di indagini termografiche, che la temperatura massima dell'aria da essi immessa va da circa 60 a circa 70 °C, come mostrato nelle immagini termografiche in *Figura 2.12*. Dall'analisi qualitativa sulla temperatura superficiale dei radiatori è stata riscontrata una disuniformità di temperatura causata probabilmente dalla presenza di aria all'interno di essi.

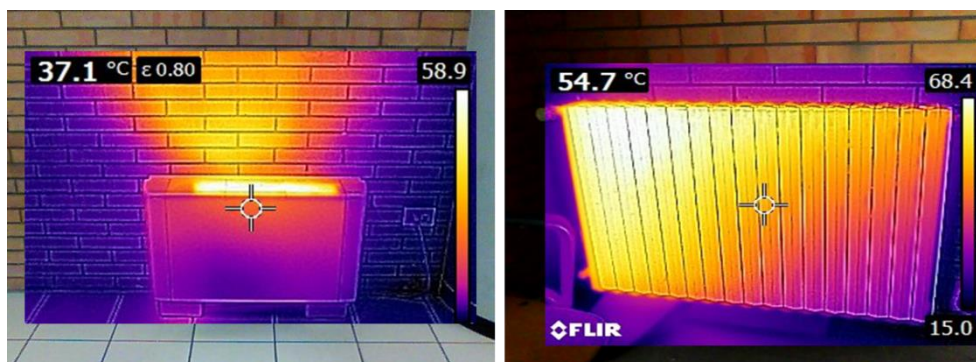


Figura 2.12: Immagini termografiche dei terminali ad acqua di tipo fan coil e radiatori.

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.

2.2.2 Impianti illuminotecnici

I dispositivi di illuminazione presenti nell'immobile, installati quasi interamente in tutti gli spazi dei due fabbricati, sono plafoniere ad incasso per controsoffitti in doghe, dotate di lampade fluorescenti da 36W del tipo OSRAM LUMILUX L 36W/840 (Figura 2.13). Nell'atrio sono presenti anche corpi illuminanti quali faretti a parete o a soffitto, di cui non si dispone di informazioni specifiche. 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. In particolare, per uffici, sale riunioni, biblioteca e zone di transito, è stato ricavato un valore di 5 W/m²; per i laboratori 7 W/m² e, infine, per le aule 11 W/m².



Figura 2.13. Sistema di illuminazione zona aula e atrio. Tipologia di lampade fluorescenti installate.

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 al complesso edilizio. In *Tabella 2.6* e *Tabella 2.7* si riportano le zone termiche per ciascun piano relativo ai due lotti; in particolare, per entrambi, si riscontra una simile distribuzione degli ambienti, con uffici e laboratori sul perimetro esterno dell'edificio, e una zona centrale dedicata ai collegamenti, alle aule a gradoni e alle sale con apparecchiature scientifiche. In corrispondenza delle torri, nel I lotto sono presenti in ogni piano laboratori di tipo chimico (lato nord-ovest), mentre per il II lotto l'ala sud-est è destinata agli uffici. Inoltre, il piano terra del II lotto è occupato interamente dalle aule, di cui quelle distribuite sul perimetro esterno sono provviste di ampie superfici vetrate inclinate. Infine, l'atrio è stato accorpato in un'unica zona termica, dal piano terra fino al terzo piano.

Piano	Zone termiche – I LOTTO
-1	Locale interrato - centrale idrica
0	Biblioteca, Aula gradoni, Servizi, presidio/portineria, Uffici, Laboratori di tipo chimico, fisico e informatico
1	
2	Segreteria di dipartimento, Aula gradoni, Servizi, presidio/portineria, Uffici, Laboratori di tipo chimico, fisico e informatico
3	
4	Sottotetto (sotto-centrale per UTA I lotto)

Tabella 2.6: Tipi di zone termiche nei diversi piani del I lotto.

Piano	Zone termiche – II LOTTO
-1	Locale interrato - centrale idrica, sotto-centrale “UTA radioisotopi”
0	Aule, Servizi, presidio/portineria
1	Segreteria studenti, Servizi, presidio/portineria, Uffici, Laboratorio di medicina applicata
2	Direzione, Aule, Aula Mendel (gradoni), Uffici, Servizi, presidio/portineria
3	Aula Mendel (gradoni), Aula dottorandi, Uffici, Laboratorio di botanica, Presidenza e Segreteria di presidenza
4	Sottotetto (sotto-centrale per UTA II lotto)

Tabella 2.7: Tipi di zone termiche nei diversi piani del II lotto.

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 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 in *Tabella 2.6* e *Tabella 2.7*, sono esclusi il locale impianti, in cui risiede la centrale termica, il piano a quota -1 e i sottotetti difatti non climatizzati. Sono stati scelti i locali più rappresentativi in termini di occupazione, tipologia di attività ed esposizione.

In particolare la *Tabella 2.8* descrive le principali caratteristiche degli ambienti in cui sono state effettuate le misure di umidità, temperatura e illuminamento, ad eccezione del corridoio (secondo piano del II lotto) in è stata effettuata la sola misura di illuminamento.





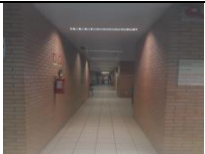
Destinazione	Lotto	Piano	Esposizione	Superficie	Componenti finestrati	Terminali	Immagine
Ufficio docente 1	II	3	sud-ovest	13 m ²	1	Fan coil Bocchette	
Ufficio docente 2	II	2	nord-est	17 m ²	1	Fan coil Bocchette	
Laboratorio di Genetica Microbica	I	0	nord-ovest	30 m ²	1	Fan coil Bocchette	
Aula A.B. Keys	II	0	nord-est	98 m ²	Finestre inclinate Porta-finestra	Fan coil Bocchette Griglie	
Corridoio	II	2	-	329 m ²	Porta-finestra	Fan coil Bocchette Griglie	

Tabella 2.8: 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 2.9*, a seguire riassume le principali grandezze monitorate.

<i>Simbolo</i>	<i>Grandezza</i>	<i>Tempo di campionamento</i>	<i>Tipo di misura</i>
$t_a(^{\circ}\text{C})$	Temperatura dell'aria	5 minuti	Continuata (07/03 – 14/03)
$UR\ (\%)$	Umidità relativa	5 minuti	Continuata (07/03 – 14/03)
$E\ (\text{Lux})$	Illuminamento	5 minuti	Puntuale (07/03)

Tabella 2.9: Grandezze ambientali interne monitorate nei locali di riferimento.

Temperatura e umidità relativa

La temperatura di bulbo secco dell'aria ambiente è uno dei principali parametri ambientali responsabile delle condizioni di benessere indoor, in particolare influenza gli scambi termici convettivi tra il corpo umano e l'ambiente circostante. Per essa non vengono forniti dalla norma i valori limite massimo e minimo affinché venga garantito il comfort. Tuttavia per ambienti moderati, nei quali non vi sono superfici radiative che determinano significative 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 7 al 14 marzo, con un periodo di campionamento scelto pari a 5 minuti. Infatti, considerando che il monitoraggio è fatto in un ambiente moderato, dove non ci sono fonti locali di discomfort, e dunque l'andamento dei parametri indoor è piuttosto uniforme, si è ritenuto ragionevole che tale intervallo consenta anche negli ambienti caratterizzati da un'elevata superficie finestrata di analizzare gli eventuali fenomeni di discomfort locale. La settimana scelta è tipica dei mesi invernali, quando ad impianto acceso, le dispersioni per ventilazione e trasmissione sono bilanciate sia dai carichi endogeni e dai guadagni solari che dall'impianto la cui regolazione non è gestita dagli utenti e non è 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 2.14. In ciascun ambiente il sensore è stato posto in posizione baricentrica e lontano da sorgenti termiche dirette o indirette in modo da evitare che la misura venisse perturbata. Inoltre, laddove possibile, è stato utilizzato, per lo stesso periodo e con lo stesso passo di campionamento della sonda di temperatura e umidità dell'aria, una sonda di temperatura superficiale, connessa al data-logger in questione.

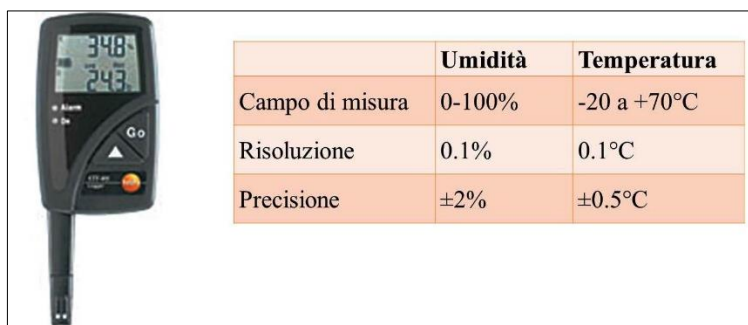


Figura 2.14: Data-logger Testo 177-H1.

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 2.10) 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>Laboratorio</i>	500
<i>Corridoio</i>	100
<i>Ingresso</i>	100

Tabella 2.10: 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 di 5 minuti e per ciascuna misura è stato ricavato il valore medio, massimo e minimo rilevato nell'intervallo di acquisizione.

Gli valori di illuminamento interni sono stati misurati con un luxmetro le cui caratteristiche tecniche sono specificate nel prospetto in *Figura 2.15*.

A digital luxmeter device is shown on a wooden surface. The device has a black casing with a small LCD screen displaying the number '244'. Below the screen are several buttons and a small display area. A black cable connects the device to a circular sensor probe. The probe is also black and has a white circular area in the center. The device is labeled 'TASID' and 'LUXMETER'.

	Range 1	Range 2	Range 3
Campo di misura	2'000 Lux	20'000 Lux	50'000 Lux
Risoluzione	1 Lux	10 Lux	100 Lux
Precisione	$\pm(4\% + 2 \text{ d})$		

Figura 2.15: Caratteristiche luxmetro.

Analisi dei parametri descrittivi delle condizioni indoor

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

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

2.3.1 Elaborazione del monitoraggio

UFFICIO DOCENTE 1

L'ufficio in oggetto, esposto a sud-ovest (*Figura 2.16*), è organizzato per 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. E' inoltre caratterizzato da un'ampia superficie finestrata con apertura a vasistas, dotata di tende a lamelle in tessuto bianco come sistema di schermatura interno.

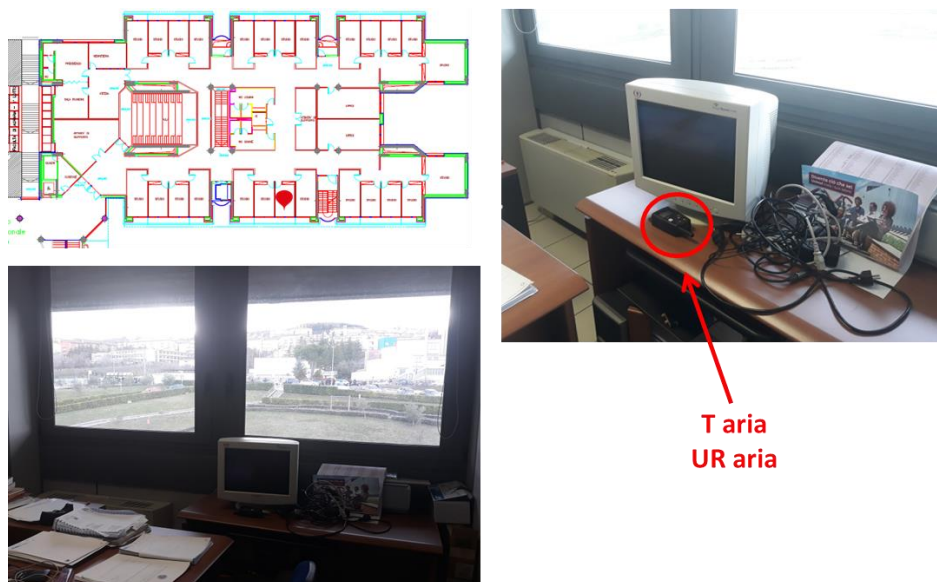


Figura 2.16: Ufficio DOCENTE 1: posizione e sensore di temperatura e umidità in opera..

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (07/03 – 14/03) è riportato nelle due figure seguenti (*Figura 2.17* e *Figura 2.18*), 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.

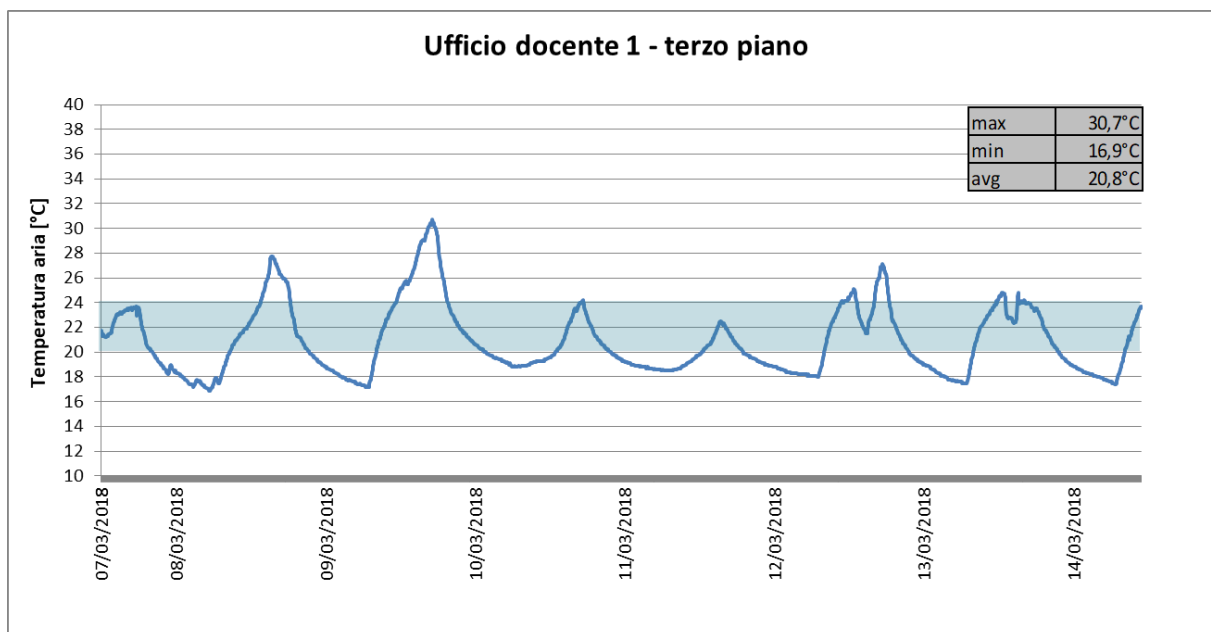


Figura 2.17: Ufficio Docente 1: andamento della temperatura interna 7/03-14/03.

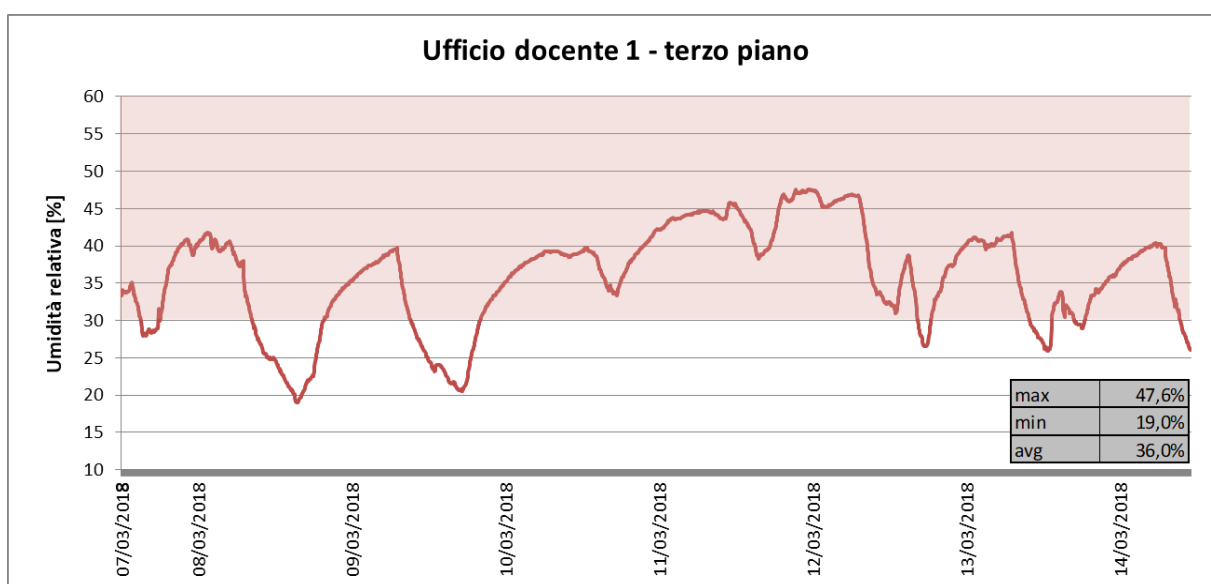


Figura 2.18: Ufficio Docente 1: andamento dell'umidità interna 7/03-14/03.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria mediamente è pari a 20,8 °C. con valore massimo intorno a 30,7°C. La temperatura interna, quindi nei casi limite supera anche di 10 °C il valore di temperatura di set-point indicato dalla normativa vigente (20 °C) sul risparmio energetico. Il valore dell'umidità relativa risulta tendenzialmente più basso della soglia 50% ritenuta ottimale, attestandosi, infatti, ad un valore medio intorno al 36%.

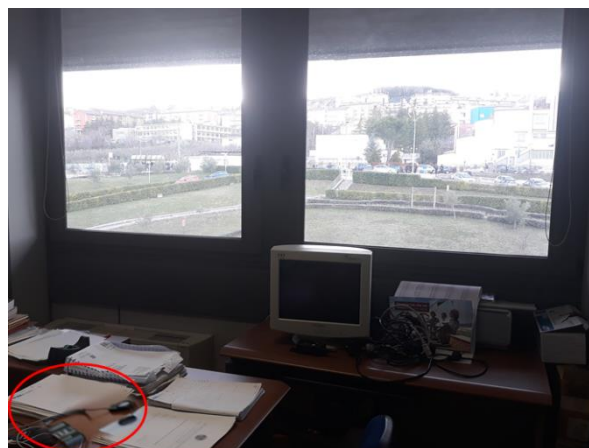
Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante coincidente con la temperatura superficiale monitorata, cosa verosimile in

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

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 23,7 °C, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore rispetto a quella dell'aria, cosa verosimile in un ambiente moderato. Considerando inoltre il valore medio dell'umidità pari a 23,7%, 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 %. Inoltre, l'indice PMV risulta invece essere pari a 0,3.

Per quanto riguarda invece il livello di illuminamento dell'ambiente in oggetto, questo è stato analizzato con riferimento alla posizione dell'occupante seduto alla propria scrivania. Rispetto a tale punto di misura si è rilevato il valore medio (I_{Mn}), massimo (I_M) e minimo (I_m) con un tempo di acquisizione di 5 minuti. La misura è stata effettuata a circa 75 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 consistente in 2 lampade fluorescenti da 36W ciascuna;
- Desk 2: misura nella postazione individuata, in condizioni di cielo coperto e avendo acceso il sistema di illuminazione.



Posizione		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	07/03/2018 13:28	147	113	145
Desk 2	07/03/2018 13:22	556	529	531

Figura 2.19: Ufficio Docente 1: misura di illuminamento scrivania (07/03/2018).

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 compreso tra 300-500 Lux; si osserva che per tale postazione, l’illuminazione naturale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell’attività prevista. Diversamente, per l’illuminazione artificiale, in condizioni di cielo coperto, è stato riscontrato un livello accettabile di illuminamento.

UFFICIO DOCENTE 2

L’ufficio in considerazione, (*Figura 2.20*) si trova al secondo piano del II lotto, la cui climatizzazione invernale è garantita da un fan coil e da bocchette di immissione dell’aria. Tale ambiente è occupato in maniera saltuaria.

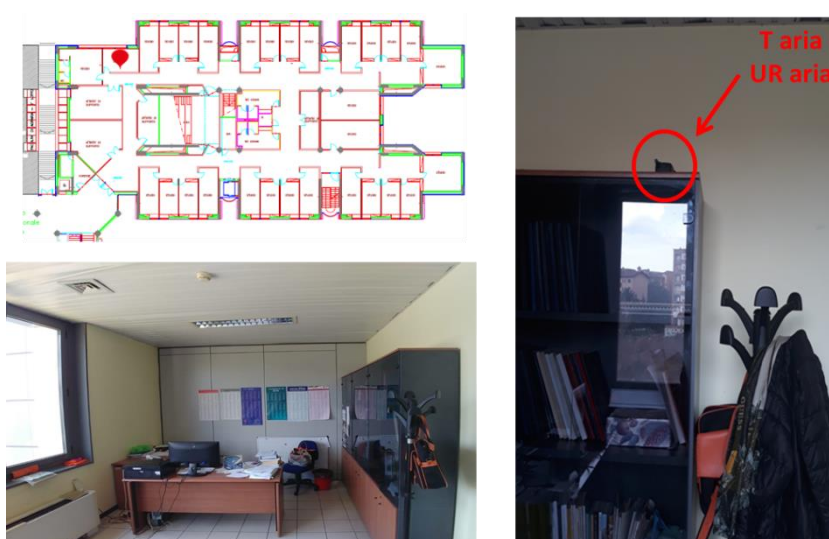


Figura 2.20: Ufficio docente 2: posizione e sensori di temperatura e umidità in opera.

L’ufficio presenta un componente finestrato a due ante, schermato interamente dall’interno, da una tenda a lamelle orizzontali di tessuto rigido chiaro.

L’andamento della temperatura dell’aria e dell’umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (7/03-14/03) sono riportati nelle due figure seguenti (*Figura 2.21* e *Figura 2.22*), in cui è anche evidenziato l’intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare come il valore di temperatura dell’aria mediamente si avvicini a 20°C, e in alcuni giorni superi anche i 28 °C nelle ore di massima irradiazione esterna, mentre il valore dell’umidità relativa si mantiene tendenzialmente più basso della soglia ottimale del 50%, presentando valori minimi pari al 19,6% e registrando un valore medio pari a 35,9%.

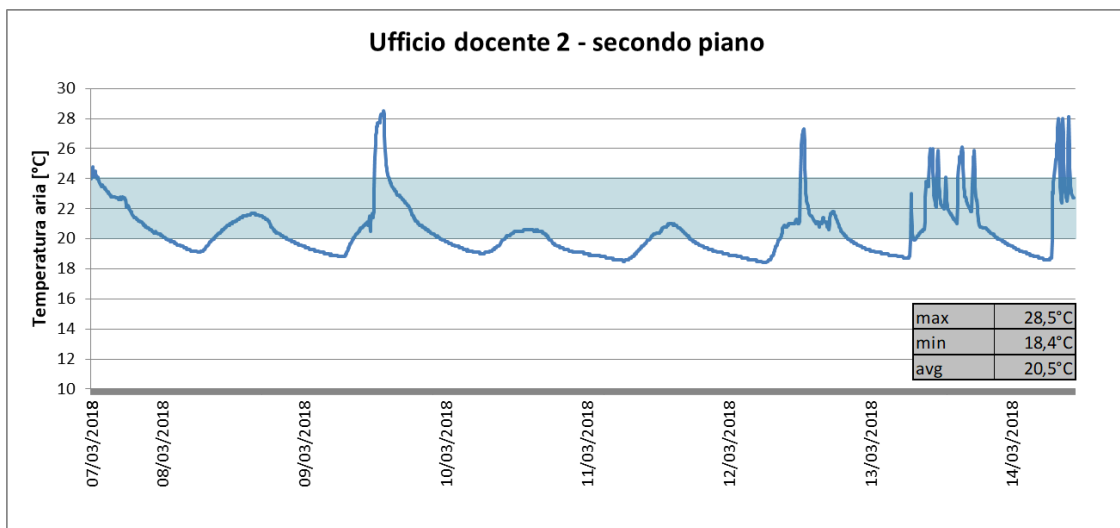


Figura 2.21: Ufficio docente 2: andamento della temperatura interna, 7/03-14/03.

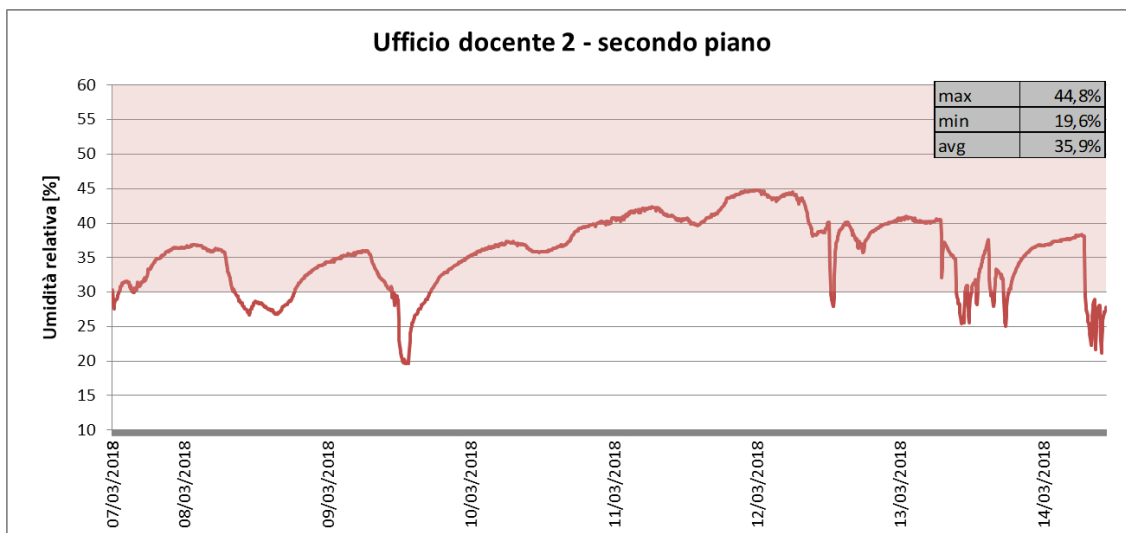


Figura 2.22: Ufficio docente 2: andamento dell'umidità interna, 7/03-14/03.

D'altro canto, risulta necessario il controllo del carico latente, poiché il livello di umidità in ambiente è troppo basso.

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 (8 marzo) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00 18:00.

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 21,0 °C, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante mezzo grado inferiore rispetto a quella dell'aria, cosa verosimile in un ambiente moderato. Considerando inoltre il valore medio dell'umidità pari a 28,1%, 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 di 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 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 5 minuti. La misura è stata effettuata a circa 75 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 consistente in 2 lampade fluorescenti da 36W ciascuna;
- Desk 2: misura nella postazione individuata, dopo il tramonto, avendo acceso il sistema di illuminazione.



		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	07/03/2018 12:35	145	112	143
Desk 2	07/03/2018 18:02	378	372	373

Figura 2. 23: Ufficio docente 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. 23).

LABORATORIO GENETICA MICROBICA

L'ambiente in considerazione (Figura 2.24), è un laboratorio ubicato al piano terra del I lotto lato torri, in cui è presente un componente finestrato con sistema di chiusura a battente a doppia anta. L'ambiente è servito da un impianto di tipo misto con fan coil e bocchette, e al momento in cui sono state effettuate le misure è stato

occupato in modo frequente per esercitare le attività da laboratorio (ad eccezione del 10/03 e 11/03 essendo festivi).



Figura 2.24: Laboratorio Genetica Microbica: posizione e sensori di temperatura e umidità in opera.

L'andamento della temperatura dell'aria e del valore di umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (07/03 – 14/03) è riportato nelle due figure seguenti, *Figura 2.25* e *Figura 2.26*, in cui è evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità per assicurare le condizioni di comfort indoor.

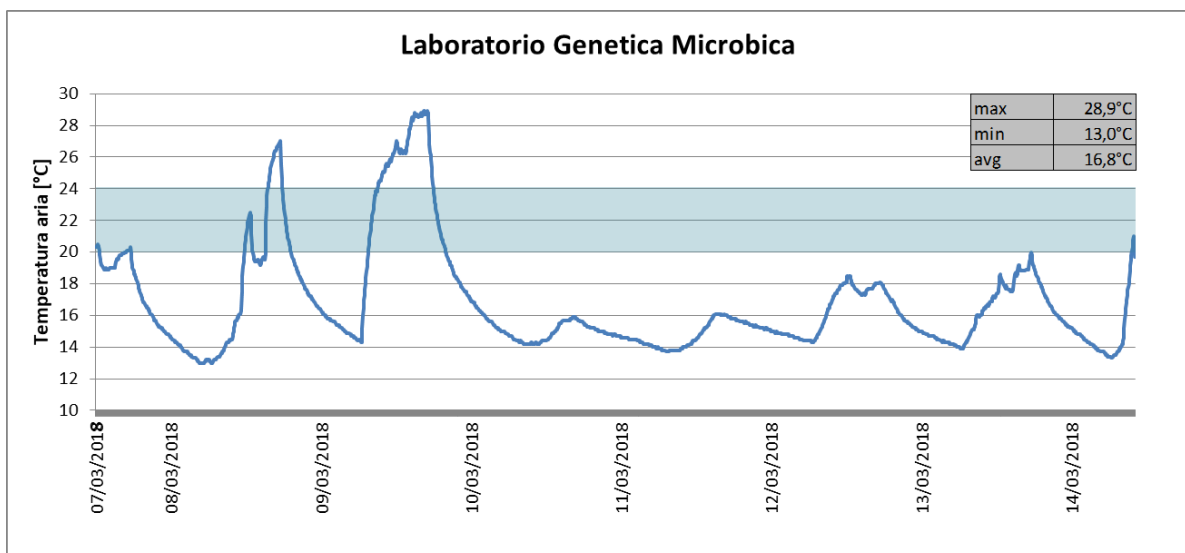


Figura 2.25: Laboratorio Genetica Microbica: andamento della temperatura interna, 7/03-14/03.

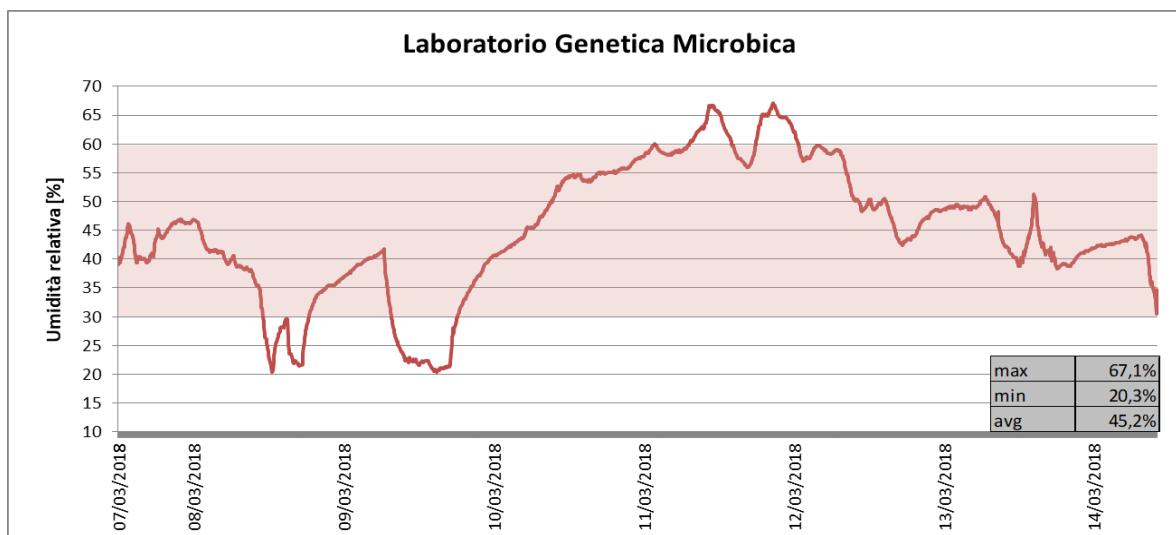


Figura 2.26: Laboratorio Genetica Microbica: andamento dell'umidità interna, 7/03-14/03.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 16,8 °C, con un valore massimo intorno a 28,9 °C. Nel complesso, la temperatura interna, salvo eccezioni nei giorni 8/03 e 9/03, tende a valori inferiori rispetto a quelli compresi nella fascia di comfort indoor. Ciò può essere riconducibile al fatto che l'ambiente sia caratterizzato da pareti esterne in porfido, non dotate di isolante termico al suo interno. Il valore di umidità relativa d'altro canto si mantiene in buona parte al di sotto della soglia del 50% (ad eccezione dei giorni festivi 10/03 e 11/03) ritenuta ottimale, mentre si assesta mediamente ad un valore circa pari a 45,2 %.

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 (8 marzo) nell'intervallo tipico lavorativo 8:00-18:00.

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 19,3 °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 29,9 %, 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 al 10 %. In questo caso, l'indice PMV risulta invece essere pari a -0,6.

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 5 minuti. L'illuminamento

dell'ambiente in oggetto è stato analizzato con riferimento al piano di lavoro su cui tipicamente si svolgono le attività, come mostrato in *Figura 2.27*. La misura è stata effettuata a circa 90 cm di altezza, nelle seguenti condizioni di misura:

- Desk 1: misura nella postazione individuata, e avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 6 lampade fluorescenti da 36W ciascuna;
- Desk 2: misura nella postazione individuata, in condizioni di cielo coperto, avendo spento il sistema di illuminazione.



Posizione		I _M [Lux]	I _m [Lux]	I _{Mn} [Lux]
Desk 1	07/03/2018 12:30	365	301	347
Desk 2	07/03/2018 12:49	7	4	5

Figura 2.27: Laboratorio Genetica Microbica: misura illuminamento e posizione.

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 tipo laboratori è di 500Lux. Si osserva che, per l'ambiente considerato, l'illuminazione artificiale non è sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista per gli occupanti. Inoltre, i valori risultati insufficienti per l'illuminazione naturale sono riconducibili alla presenza di schermi oscuranti quali le apparecchiature scientifiche che occupano l'ambiente stesso, nonché all'esposizione e alla posizione del componente finestrato che ne limita l'apporto di luce naturale.

AULA ANCEL BENJAMIN KEYS

L'ambiente in considerazione (*Figura 2.28*), è un'aula di grandi dimensioni situata al piano terra del II lotto, la cui climatizzazione sia invernale che estiva è garantita da quattro radiatori mentre per il trattamento dell'aria sono presenti 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. Il carattere peculiare di questa aula, che contraddistingue tutte le zone (aule) del piano poste lungo il perimetro esterno, è la presenza di ampie finestre inclinate a sei ante non apribili, con sistemi di schermatura quali tende a lamelle verticali di tessuto

rigido chiaro. L'aula selezionata, inoltre, confina verso il lato torri, con un ripostiglio esterno non climatizzato e da un porticato esterno attraverso una porta finestrata.



Figura 2.28: Aula A.B. Keys: posizione e sensore di temperatura e umidità in opera, particolare dei componenti finestrati.

L'andamento della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa durante il periodo di monitoraggio (07/03 – 14/03) sono riportati nelle seguenti figure (Figura 2.29 e Figura 2.30), in cui è anche evidenziato l'intervallo consigliato di variabilità (rispettivamente in azzurro e in rosa) per assicurare le condizioni di comfort indoor.

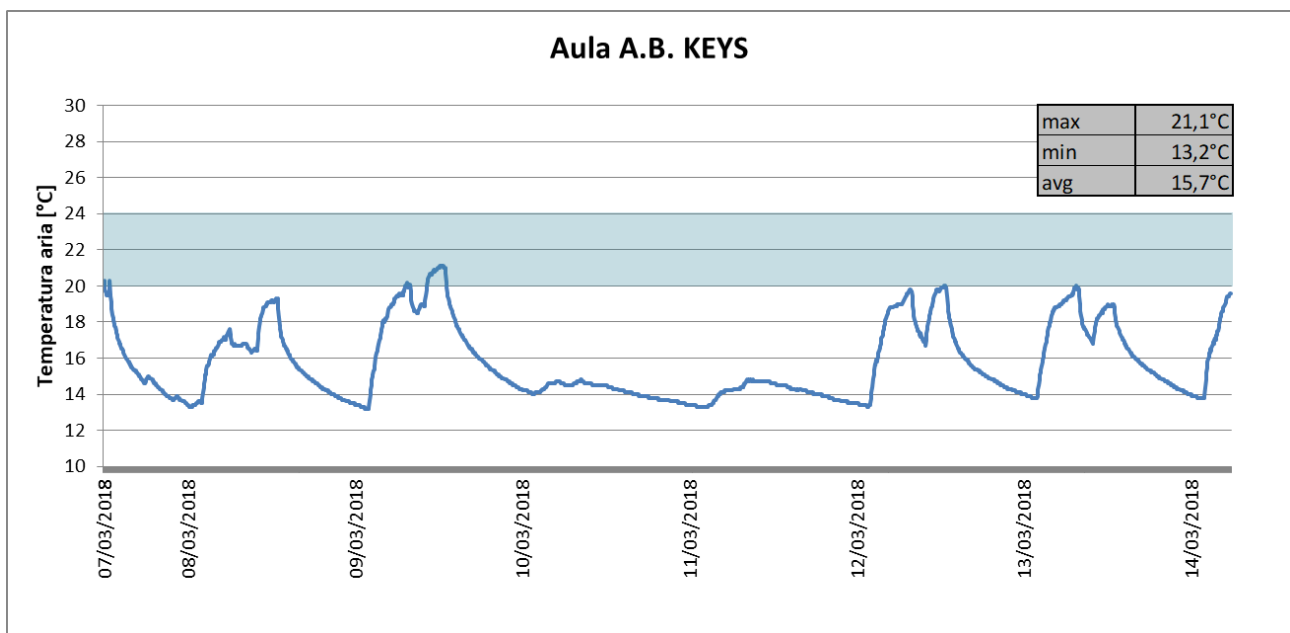


Figura 2.29: Aula A.B. Keys: andamento della temperatura interna, 7/03-14/03.

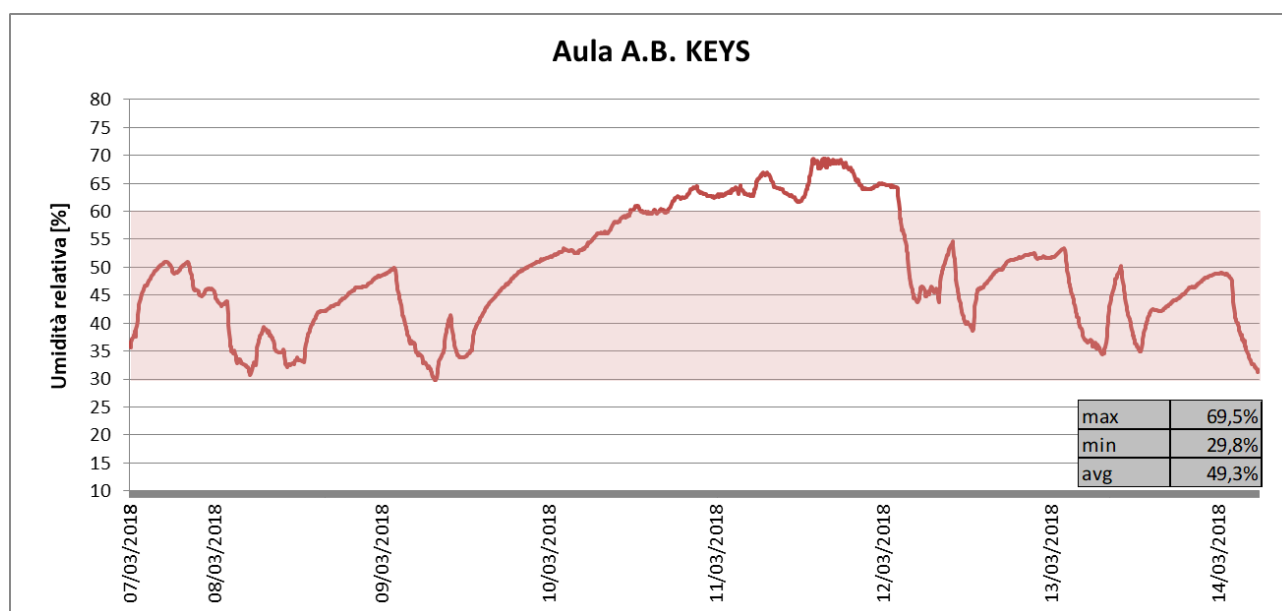


Figura 2.30: Aula A.B. Keys: andamento dell'umidità interna, 7/03-14/03.

Il monitoraggio ha consentito di evidenziare che il valore di temperatura dell'aria, durante il periodo di campionamento, è mediamente pari a 15,7 °C, con un valore massimo intorno a 21,1 °C. Rispetto a tutti gli ambienti monitorati, è stata registrata una temperatura dell'aria più bassa di tutte, mantenendosi, difatti, per tutto il periodo di campionamento, al di sotto delle condizioni di comfort indoor. Ciò può verificarsi data la presenza di ampi elementi finestrati che contribuiscono a disperdere verso l'esterno il flusso termico. Inoltre, come per tutti gli ambienti disposti al piano terra di entrambi i lotti e lungo i lati sud-est e nord-ovest delle torri, l'ambiente è confinato da pareti esterne in porfido che non garantisce un livello di isolamento termico adeguato, in misura maggiore per l'aula in questione data l'esposizione a nord-est. Il valore di umidità relativa si mantiene, per i giorni feriali, quasi al limite della soglia del 50% ritenuta ottimale e si assesta mediamente ad un valore circa pari al 49,3 %.

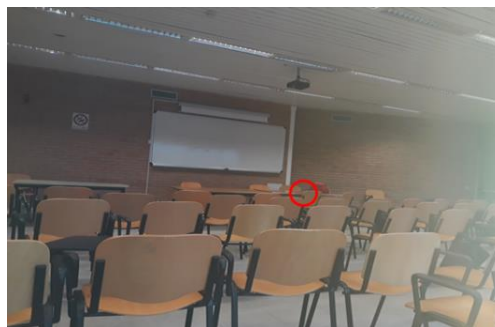
Per avere indicativamente una valutazione delle condizioni di comfort, nell'approssimazione di considerare la temperatura media radiante coincidente con la temperatura superficiale monitorata, cosa verosimile in ambiente moderato come quello analizzato; sono stati calcolati gli indici per una giornata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

In questa giornata il valore medio misurato per la temperatura dell'aria è pari a 17,3 °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 34,4%, 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 26,1 %,

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 -1,0.

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 5 minuti. L'illuminamento dell'ambiente in oggetto è stato analizzato posizionando lo strumento al centro della cattedra (Figura 2.31), all'altezza di circa 75 cm nelle seguenti condizioni di misura:

- Desk 1: misura nella postazione individuata avendo acceso il sistema di illuminazione consistente in 32 lampade fluorescenti (da 36W ciascuna);
- Desk 2: misura nella postazione individuata, dopo il tramonto, avendo aperto le tende e avendo spento il sistema di illuminazione.



Posizione		I_M [Lux]	I_m [Lux]	I_{Mn} [Lux]
Desk 1	07/03/2018 17:24	309	299	307
Desk 2	07/03/2018 17:38	4	2	3

Figura 2.31: Aula A.B. Keys: misure di illuminamento e posizione.

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 è sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista per gli occupanti. Diversamente, i valori di illuminamento registrati per l'illuminazione naturale risultano insufficienti a causa dell'esposizione dell'aula (nord-est) e della presenza di finestre inclinate che limitano l'apporto di luce naturale. Tuttavia, considerando che i sopralluoghi si sovrapponevano alle attività didattiche in corso, anche l'orario di acquisizione della misura potrebbe aver inficiato la valutazione del livello di illuminamento per l'illuminazione naturale.

CORRIDOIO

Per tale ambiente è stato previsto il solo controllo del livello di illuminamento. In particolare il corridoio in questione si trova al secondo piano del II lotto, inoltre, considerando la quasi assoluta assenza di componenti finestrati (ad eccezione di una porta finestra a sud-ovest) è stata considerata una sola condizione di misura:

Desk 2: misura sulla postazione individuata avendo acceso il sistema di illuminazione costituito da 20 punti luce (da 36W) per il solo lato in cui è stata condotta la misura (in totale sono presenti circa 47 punti luce per l'intero ambiente).

Posizione		I _M [Lux]	I _m [Lux]	I _{Mn} [Lux]
Desk 2	07/03/2018 18:18	192	190	191

Tabella 2.11: Corridoio: misure di illuminamento e posizione.

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 zone di transito, quali appunto corridoi, è tra i 100 Lux. Si osserva che, per l'ambiente considerato, l'illuminazione artificiale è sufficiente a garantire lo svolgimento dell'attività prevista per gli occupanti in tale ambiente.

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'*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 3.1* sono riportati a sinistra il rendering del modello numerico dell'edificio in esame e a destra la corrispondente vista satellitare, mentre in *Figura 3.2* sono riportati i rendering del modello per tutte le esposizioni.

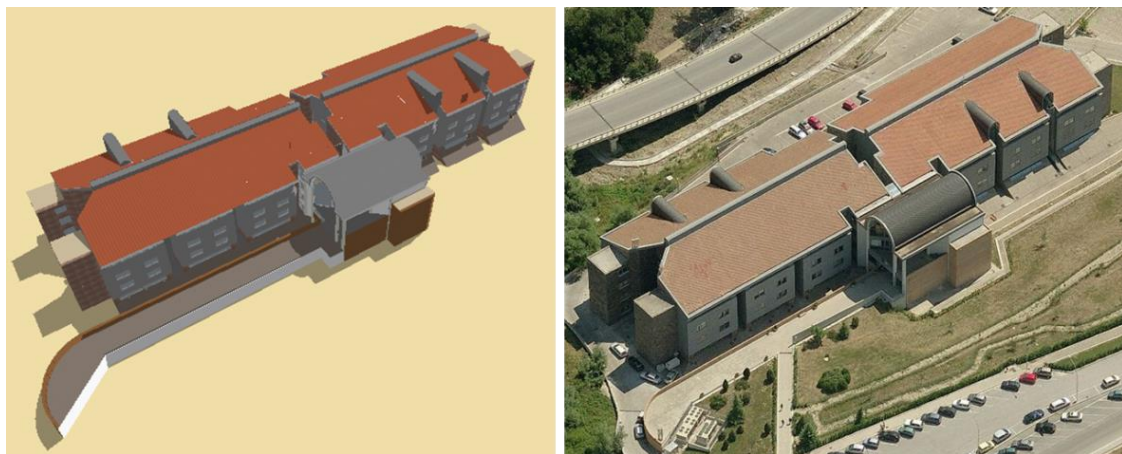


Figura 3.1: Rendering ed immagine satellitare III Edificio Polifunzionale dell'Università degli Studi del Molise.

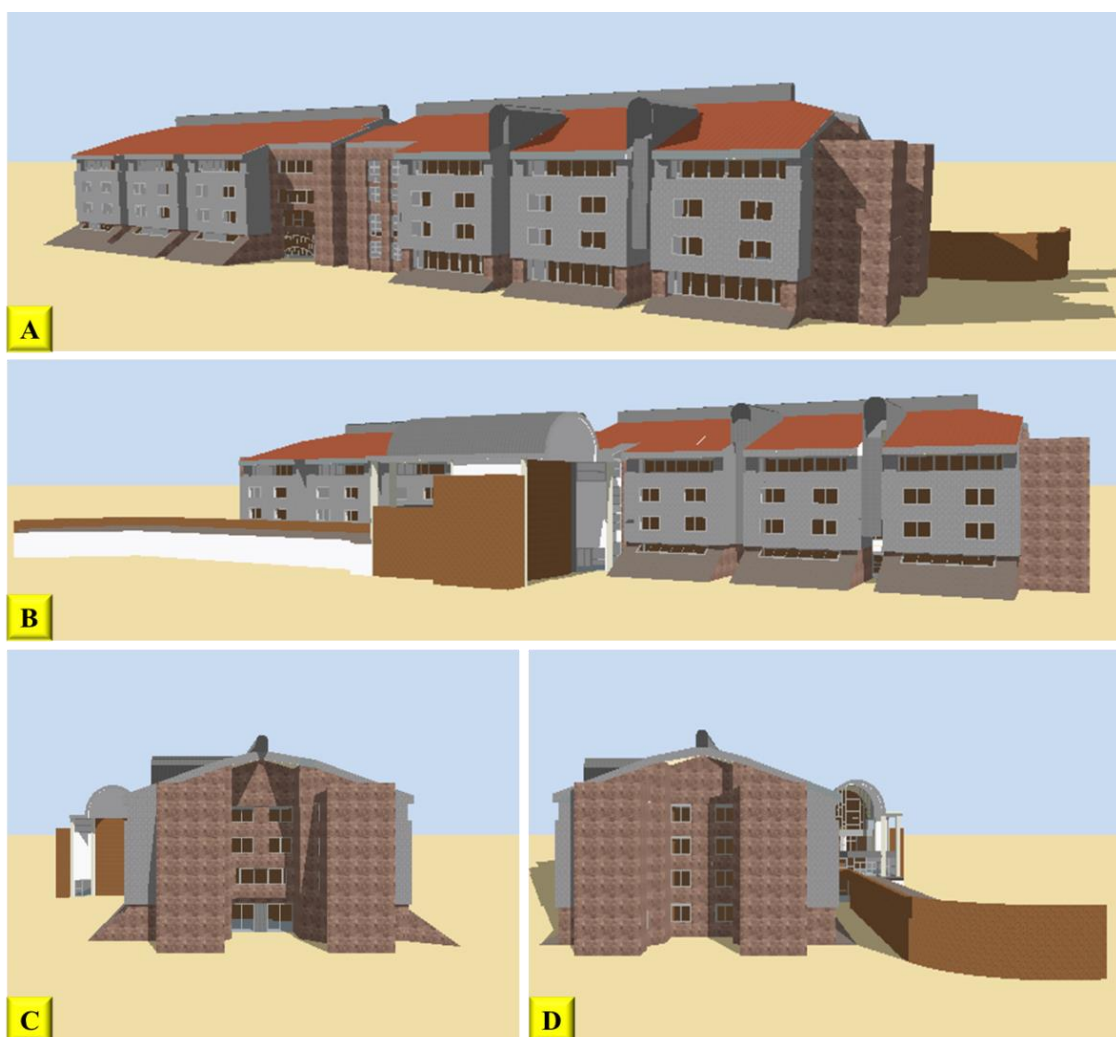


Figura 3.2: Rendering III Edificio Polifunzionale dell'Università degli Studi del Molise: A- esposizione nord-est; B- esposizione sud-ovest; C- esposizione sud-est; D- esposizione nord-ovest.

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 sovraccosto 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, son 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 III 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, è stato stimato un costo di realizzazione indicativo, nonché il tempo di ritorno del capitale investito. I risultati di tali analisi sono riportati nella tabella riepilogativa finale, che fa riferimento a tutte le combinazioni di interventi, valutati per il complesso edilizio oggetto di studio. Inoltre, tutte le voci di costo considerate per stimare i costi totali di investimento degli interventi sono riportate al termine della presente, in cui sono specificati modelli, quantità, costi unitari e le relative fonti.

5.1 Definizione degli interventi di riqualificazione energetica

In primo luogo, dal reperimento e successiva analisi di documenti e informazioni fornite dall'ufficio tecnico, si è venuti a conoscenza della pianificazione e successiva realizzazione (avvenuta nella primavera 2018) degli interventi di riqualificazione energetica e di miglioramento dell'efficienza energetica dell'impianto termico dell'edificio III Polifunzionale, che ha coinvolto principalmente l'installazione di nuove caldaie e boiler in centrale termica. Per ulteriori dettagli in merito a tali interventi si rimanda al paragrafo seguente.

Dalla fase di audit del sistema edificio-impianti, negli ambienti interni oggetto di monitoraggio delle grandezze microclimatiche è stato rilevato, soprattutto per le zone ubicate ai piani superiori al piano terra, un livello di umidità relativa molto più basso rispetto al livello ritenuto ottimale dalle normative vigenti in materia di comfort ambientale. Infatti, il carico latente non risulta bilanciato, nonostante l'impianto installato presenti anche la possibilità di agire sullo stesso. Pertanto, una prima misura raccomandabile da mettere in atto prevede la riattivazione del sistema di umidificazione presente all'interno delle unità di trattamento dell'aria. Nello specifico, l'intervento di messa in funzione dei sistemi di umidificazione presenti, dovrà essere già accorpato negli oneri previsti per la manutenzione e conduzione degli impianti termotecnici da parte dell'impresa appaltatrice.

Oltre agli interventi già realizzati per il complesso edilizio in esame, sono stati ipotizzati ed analizzati i seguenti interventi:

- installazione di recuperatori di calore all'interno delle unità di trattamento aria presenti nella sotto-centrale del I lotto;
- adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione;
- sostituzione/rifacimento dell'impianto di illuminazione interna;
- sostituzione dei serramenti con altri caratterizzati da una maggiore resistenza termica;
- installazione di un impianto fotovoltaico;
- incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco.

Tra tutti gli interventi che tecnicamente sono stati individuati saranno indicati come consigliati i soli interventi che si ritengono realizzabili sulla base del relativo beneficio in termini di risparmio energetico/economico. Come accennato precedentemente, gli interventi che coinvolgono la centrale termica sono stati oggetto di recente realizzazione (primavera 2018), pertanto, al fine di tener conto del nuovo stato di fatto del sistema edificio-impianto del III Polifunzionale e, non avendo, inoltre, a disposizione delle distinte dei contratti di fornitura necessarie per la calibrazione del modello, è stata affrontata l'analisi delle misure in termini di risparmio energetico ed economico considerando due casi base: il primo, individuato dallo stato di fatto prima dell'avvenuta realizzazione degli interventi in centrale termica (codice $CB_{PRE}^{Cald+Boil}$ - *Stato di fatto pre-interventi centrale termica*), mentre il secondo caso base è riferito allo stato di fatto post-realizzazione degli stessi (codice $CB_{POST}^{Cald+Boil}$ - *Stato di fatto post-interventi centrale termica*).

Pertanto, le misure proposte sono state poi combinate in pacchetti per un totale di 17 tipologie di interventi (compresa la sostituzione di caldaie e boiler) applicate allo stato di fatto antecedente agli interventi realizzati in centrale, e 8 tipologie di interventi applicate, invece, allo stato di fatto in cui siano state implementate le nuove caldaie e boiler. Come riportato nel prosieguo della presente, per ciascun intervento e rispetto ai due succitati casi base, 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. Inoltre, i costi di investimento attribuiti alle misure e pacchetti di misura applicati allo stato di fatto successivo alla sostituzione di caldaie e boiler in centrale, sono da intendersi al netto del relativo costo di investimento già sostenuto per la realizzazione di tale intervento.

5.1.1 Interventi per la riqualificazione energetica della centrale termica

Come già precedentemente anticipato, date le condizioni di inefficienza in cui versavano i componenti presenti nella centrale termica a servizio del complesso edilizio in esame, sono stati realizzati nella primavera 2018 i seguenti interventi:

- sostituzione dei generatori termici con nuovi generatori a basamento ad alto rendimento, alimentati a gas naturale, del tipo Sant'Andrea con potenza termica nominale di 766 kW;

- smantellamento dei due generatori a gas esistenti;
- pulizia dei circuiti di distribuzione calore con prodotto discrostante;
- rifacimento tubazioni in centrale termica e coibentazione delle stesse;
- adeguamento impianto di distribuzione gas internamente alla centrale termica;
- adeguamento quadro elettrico di alimentazione ed impianto interno della centrale termica;
- sostituzione dei bollitori verticali in acciaio inossidabile AISI 316 per produzione di acqua calda sanitaria della capacità di 1500 lt cadauno.

Sulla base delle specifiche tecniche e della tipologia di caldaia selezionata dal rispettivo computo metrico è stato stimato il risparmio di energia primaria conseguibile dall'installazione di caldaie pressurizzate in acciaio del tipo *Sant'Andrea*, caratterizzate da rendimenti superiori al 94%. L'accoppiamento di tale tipologia di caldaia con l'adozione di bollitori ad accumulo verticale in acciaio inossidabile, dotati di scambiatore a grande superficie di scambio, nonché la coibentazione delle tubazioni in centrale, consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria di circa l'8,60% rispetto al fabbisogno richiesto dall'edificio senza i suddetti interventi, come mostrato in *Tabella 5.1*.

Come già anticipato, per aggiornare lo stato di fatto del sistema edificio/impianti alla luce della recente realizzazione di tali interventi (non potendo procedere alla calibrazione del modello in assenza di distinte dei contratti di fornitura), è stato scelto di trattare l'implementazione di questi ultimi nell'impianto termo-tecnico come ulteriore caso base, denominato *CB_{POST} Cald+Boil - Stato di fatto post-interventi centrale termica*, rispetto al quale confrontare le misure e i pacchetti di misure più significativi dal punto di vista energetico.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
<i>CB_{PRE} Cald+Boil - Stato di fatto pre-interventi centrale termica</i>	1032	1014	2046	-
<i>CB_{POST} Cald+Boil - Stato di fatto post-interventi centrale termica - Sostituzione caldaie con gruppi termici ad alto rendimento e bollitori verticali coibentati con scambiatore a grande superficie di scambio</i>	1032	838	1870	8,60%

Tabella 5.1: Risultati analisi energetica (installazione caldaie ad alto rendimento e bollitori verticali coibentati e con scambiatore a grande superficie di scambio, intervento eseguito in primavera 2018).

Il costo di investimento affrontato per tale intervento è stato desunto dal computo metrico richiesto dall'Università degli Studi del Molise (risalente al 05/07/2017), di cui si riportano 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 en oneri di discarica: 2'000 €;
- opere murarie a seguito della sostituzione dei generatori per la demolizione e rifacimento dei basamenti di appoggio: 2'000 €;
- quadro comando caldaia per temperature di esercizio fino a 90°C, montaggio sopra caldaia, funzioni di termoregolazione per circuito di riscaldamento miscelato e diretto, carica bollitore

comprendente sonda esterna, sonda mandata e sonda bollitore, possibilità di ampliamento delle funzioni: 2'000 €;

- caldaie pressurizzate in acciaio ad alto rendimento con bruciatore ad aria soffiata con pannellatura d'acciaio verniciata a fuoco, con quadro porta-strumenti comprendente termoidrometro, interruttore di linea, termostato di regolazione, collegamenti elettrici ed equipotenziali, piastra frontale per attacco bruciatore, compreso di bruciatori a gas bistadio: 29'003,32 €;
- bollitori ad accumulo verticale, in acciaio zincato a bagno caldo, per produzione di acqua calda sanitaria, con scambiatore in rame estraibile a grande superficie di scambio, funzionante con acqua a $T < 100^{\circ}\text{C}$, corredati di termostato e termometro, completamente coibentati, completi di valvola per lo scarico del serbatoio, valvole d'intercettazione circuiti, valvola di sfiato, gruppo di riempimento automatico $\frac{1}{2}$ ", pressione 6 bar, della capacità cadauno di 1500 litri: 6'354,46 €;
- modifica alle 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: 3'600 €.

In conclusione, il costo complessivo sostenuto per l'intervento è pari a 44'957,78 €.

5.1.2 Installazione di recuperatori di calore all'interno delle UTA nella sotto-centrale I lotto

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

Durante la fase di audit per l'edificio III Polifunzionale, è emerso che le UTA presenti nella sotto-centrale del I lotto sono sprovviste di recuperatori di calore; diversamente, nella sotto-centrale del II lotto sono presenti e funzionanti recuperatori a flussi incrociati all'interno delle rispettive UTA. Pertanto, verificato che il flusso di aria esterna di rinnovo e quella interna di espulsione si incontrano proprio all'interno delle unità di trattamento aria è stato previsto l'inserimento di recuperatori anche nelle UTA della sotto-centrale del I lotto, finalizzato al conseguimento di un'ulteriore riduzione del fabbisogno energetico per la climatizzazione degli ambienti e una conseguente riduzione dei costi di esercizio degli impianti di climatizzazione stessi.

In particolare, per l'intervento in questione è stato previsto l'impiego di recuperatori ad aria a flussi incrociati con rendimento del 70% sul calore sensibile, differenziati in base alla portata trattata dalle diverse UTA, funzionanti tutto l'anno e con chiusura della serranda di bypass in caso di rischio di brina nel periodo invernale.

Con riferimento a tale intervento (indicato con codice *REC*), in *Tabella 5.2* è riportato il fabbisogno di energia primaria derivante dall'adozione di tale misura e lo scostamento rispetto allo stato di fatto antecedente alla sostituzione delle caldaie e boiler, raggiungendo un risparmio di energia primaria pari al 9,62%.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
CB_{PRE} Cald+Boil - Stato di fatto pre-interventi centrale termica	1032	1014	2046	-
REC - Installazione recuperatori di calore nelle UTA I lotto	1037	813	1849	9,62%

Tabella 5.2: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto antecedente agli interventi in centrale (installazione recuperatori di calore nelle UTA I lotto).

Tenendo conto, inoltre, dell'implementazione di nuove caldaie e boiler, e coibentazione delle tubazioni in centrale termica, l'installazione di recuperatori di calore nelle UTA della sotto-centrale I lotto permette di ottenere un risparmio di energia primaria pari al 9,22%, come mostrato in *Tabella 5.3*.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
CB_{POST} Cald+Boil - Stato di fatto post-interventi centrale termica	1032	838	1870	-
REC - Installazione recuperatori di calore nelle UTA I lotto	1037	661	1698	9,22%

Tabella 5.3: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto con l'implementazione di nuove caldaie e boiler in centrale (installazione recuperatori di calore nelle UTA I lotto).

Relativamente al costo dell'intervento, la stima è stata fatta sulla base di indagini di mercato, considerando, in particolare, la provvista e posa in opera di recuperatori di calore, del tipo aria-aria, con passaggio dei fluidi a correnti incrociate, provvisti di pacco scambiatore in lamiera di alluminio a larga spaziatura, involucro esterno in lamiera di acciaio zincato, rendimento del 60-70% per portata d'aria:

- oltre 6'500 m³/h fino a 8'000 m³/h per *UTA aule* con portata 7'450 m³/h e per *UTA atrio* con portata 7'000 m³/h: 2'499,52 € cadauno;
- oltre 18'000 m³/h fino a 25'000 m³/h per *UTA aria primaria I* con portata pari a 21'000 m³/h e per *UTA biblioteca* con portata di 21900 m³/h : 7'204,64 € cadauno.

Il costo complessivo considerato per l'installazione dei quattro recuperatori considerati è pari a circa 19'408,32 €.

5.1.3 Adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione

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

Infatti, negli ambienti situati ai piani superiori al piano terra, sottoposti nella fase di diagnosi al monitoraggio delle grandezze microclimatiche, è stata registrata 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°C±2°C di tolleranza). D'altro canto, negli ambienti oggetto di monitoraggio che risiedono al piano terra, è stata riscontrata una temperatura interna inferiore, in alcuni casi limite, anche di 7 gradi rispetto al suddetto valore di temperatura di set-point previsto dalla normativa.

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.

Inoltre, rispetto all'intervento proposto bisogna fare due considerazioni, una relativa alla percezione delle condizioni di comfort da parte degli occupanti, l'altra di 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 rispettati negli ambienti al piano terra del complesso edilizio in questione, contrariamente a quanto constatato per le zone ai piani superiori. 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. Pertanto, il valore di set-point al quale deve essere impostato l'impianto per il funzionamento in regime invernale, a rigore, è di 20°C. Tuttavia, nell'edificio in questione 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 e di una valvola e comando termostatico in corrispondenza di ogni radiatore presente negli ambienti serviti da un sistema di climatizzazione misto o ad acqua.

Tali componenti permettono di regolare la temperatura in modo differenziato e soprattutto in base alle reali condizioni all'interno dell'ambiente che va a controllare, andando ad attivare i terminali solo quanto opportuno. L'effetto desiderato, dunque, si tradurrebbe in un sensibile risparmio di energia primaria e un miglioramento delle condizioni di comfort per gli occupanti; tuttavia, impostare una valore della temperatura di set-point a 20 °C nelle zone al piano terra (soggette a maggiori dispersioni termiche per lo scarso livello di isolamento offerto dalle pareti esterne con porfido e per la presenza di ampie superfici finestrate) favorirebbe migliori condizioni di comfort indoor da parte degli occupanti seppur a spese dell'incremento dei consumi relativi al gas naturale per il raggiungimento di tale valore.

Da quanto appena detto emerge, dunque, che l'intervento di installazione con il corretto settaggio dei sistemi di regolazione degli impianti a livello di singolo ambiente climatizzato (codice *REG*), consente un risparmio di energia primaria pari al 2,63% rispetto al fabbisogno previsto prima degli interventi realizzati in centrale termica, come mostrato in *Tabella 5.4*.

	Energia primaria (MWh)			ΔE%
	Elettrico	Termico	Totale	
<i>CB_{PRE} Cald+Boil - Stato di fatto pre-interventi centrale termica</i>	1032	1014	2046	-
<i>REG - Sistema regolazione a livello ambiente</i>	1021	971	1992	2,63%

Tabella 5.4: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto antecedente agli interventi in centrale (installazione sistemi di regolazione a livello ambiente).

Lo stesso intervento, se rapportato allo stato di fatto con l'implementazione delle nuove caldaie e boiler in centrale, permette di raggiungere un risparmio di energia primaria pari al 2,71%, come riportato in *Tabella 5.5*.

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
CB_{POST} Cald+Boil - Stato di fatto post-interventi centrale termica	1032	838	1870	-
REG - Sistema regolazione a livello ambiente	1021	798	1819	2,71%

Tabella 5.5: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto con l'implementazione di nuove caldaie e boiler in centrale (installazione sistemi di regolazione a livello ambiente).

In entrambi i casi, il risparmio associato all'intervento in esame risulterebbe più significativo se fosse accoppiato a misure di miglioramento delle prestazioni energetiche relative all'isolamento termico dell'involucro opaco e trasparente del complesso edilizio. A tal proposito, si confronta, ad esempio, il risparmio ottenuto dall'applicazione del solo adeguamento del sistema di regolazione rispetto allo stato di fatto antecedente agli interventi in centrale (2,63%) con quello derivante, in aggiunta al suddetto intervento di misure, dall'adozione di componenti finestrati dotati di triplo vetro e trattamento basso-emissivo e all'isolamento in intercapedine delle pareti esterne con porfido (*TvBe+REG+INS*), in *Tabella 5.16*, raggiungendo il 6,82%.

Il costo di investimento per tale misura è stato stimato considerando le seguenti voci di costo:

- Per il controllo dei terminali fan-coil:
 - fornitura del kit Fantini Cosmi, composto da termostato e attuatore relè remoto, in grado di pilotare due valvole e comandare un motore per fan coil a 3 velocità, unità di attivazione separata con collegamento bifilare, montaggio a parete, scala di regolazione della temperatura 2÷40 °C: 120,00 €/cad, secondo il listino 2018 Fantini Cosmi;
 - manodopera per l'installazione dei termostati, impiegando due operai qualificati come installatore 5^a categoria: 27,00 €/cad, secondo il prezzo della regione Molise 2017.
- Per il controllo dei terminali radiatori:
 - fornitura di valvola termostattizzabile FAR, cromata, con attacco tubo ferro a squadra: 26,99 €/cad, secondo il listino 2018 FAR;
 - fornitura di comando termostatico FAR con sensore a liquido incorporato in abbinamento a valvole termostattizzabili FAR, campo di temperatura da 0°C a 28°C con possibilità di bloccaggio e limitazione del campo di regolazione: 17,50 €/cad, secondo il listino 2018 FAR;
 - manodopera per l'installazione di valvola e comando termostatico: 22,00 €/cad, secondo il prezzo della regione Molise 2017.
- Per il controllo della temperatura nei canali ad aria:

- fornitura e installazione di termostato per il controllo della temperatura all'interno dei canali ad aria: 400,00 €/cad, secondo indicazioni dell'ufficio tecnico.

Considerando che circa il 90% degli ambienti serviti da impianti di tipo misto con terminali fan-coil presentano un ventilconvettore per ogni zona, è stato ipotizzato un termostato e attuatore per ogni fan-coil, per un totale di 400 termostati e attuatori; inoltre, per ogni coppia termostato/attuatore è stato previsto un tempo di installazione pari a 30 minuti. Si rimanda a verifiche puntuali per individuare gli ambienti con più di un fan-coil installato, per i quali prevedere l'impiego di un unico termostato in grado di pilotare più di un attuatore predisposto per ciascun terminale. Infine, aggiungendo 5 termostati per le zone servite da un impianto ad aria e 35 valvole e comandi termostatici per i radiatori, il costo complessivo associato all'intervento risulta pari a circa 63'127,15 €.

Inoltre, considerando le condizioni di inefficienza in cui versano i radiatori, riscontrate dai rilievi termografici, è raccomandabile un intervento di manutenzione per tale tipologia di terminale.

5.1.4 Rifacimento dell'impianto di illuminazione interna

I corpi illuminanti presenti nell'edificio oggetto del presente lavoro, sono principalmente lampade fluorescenti dall'efficienza luminosa di 93 lm/W. Attraverso il monitoraggio del livello di illuminamento all'interno dell'edificio, si è osservato che tali lampade non sempre soddisfano l'illuminazione necessaria, indicata dalla norma UNI EN 12464, allo svolgimento dell'attività prevista in base alla destinazione d'uso dell'ambiente.

Pertanto, sia al fine di ridurre il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminamento interno, che per garantire adeguati livelli di illuminamento negli ambienti stessi, si è ipotizzata una sostituzione dei sistemi di illuminazione all'interno dell'edificio. L'intervento proposto, quindi, mira sia a soddisfare le richieste di maggiore comfort da parte degli occupanti, sia 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 dei corpi illuminanti sono state considerate le lampade a elettroluminescenza – LED (*Light Emitting Diode*); in particolare, solo come riferimento per le indicazioni circa prezzo e caratteristiche tecniche sono state selezionate le 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 80.000 ore (codice intervento *LED*). A tale intervento, è stata inclusa anche la sostituzione di apparecchi circolari ad incasso (presenti nell'atrio) con faretto LED da incasso da 20 W, temperatura di colore 3000 K, classe di isolamento 1, grado di protezione IP 23, classe energetica A e apertura del fascio 95°.

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 si 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 rispetto allo stato di fatto antecedente alla realizzazione degli interventi di retrofit in centrale termica si evince, come mostrato in *Tabella 5.6*, che il risparmio energetico derivante dall'adozione di tali misure è pari al 3,70% nel caso della sola sostituzione dei corpi illuminanti ed è pari al 5,74% nel caso in cui oltre all'installazione di lampade LED si preveda anche l'integrazione con un sistema di controllo, ovvero l'installazione di rilevatori di presenza in ogni ambiente.

	Energia primaria (MWh)			
	Elettrico	Termico	Totale	$\Delta E\%$
<i>CB_{PRE} Cald+Boil - Stato di fatto pre-interventi centrale termica</i>	1032	1014	2046	-
<i>LED - Installazione lampade LED</i>	945	1025	1970	3,70%
<i>LED+C - Installazione di lampade LED e rilevatori di presenza</i>	899	1030	1928	5,74%

Tabella 5.6: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto antecedente agli interventi in centrale (sostituzione lampade e installazione sistema controllo).

La sostituzione dei corpi illuminanti esistenti con lampade LED e l'installazione di rilevatori di presenza fornisce un risparmio di energia primaria del 6,36% rispetto allo stato di fatto in cui siano state implementate le nuove caldaie e boiler in centrale, come riportato in *Tabella 5.7*.

	Energia primaria (MWh)			
	Elettrico	Termico	Totale	$\Delta E\%$
<i>CB_{POST} Cald+Boil - Stato di fatto post-interventi centrale termica</i>	1032	838	1870	-
<i>LED+C - Installazione di lampade LED e rilevatori di presenza</i>	899	853	1751	6,36%

Tabella 5.7: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto con l'implementazione di nuove caldaie e boiler in centrale (sostituzione lampade e installazione sistema controllo).

Sotto il profilo economico, sono state assunte le seguenti voci di costo:

- costo per i materiali (plafoniera e lampada) pari a 180,57 €/cad, a cui aggiungere un costo di installazione delle nuove lampade, compreso quanto occorre per dare il lavoro finito (esclusi gli oneri per eventuale adattamento/modifica della controsoffittatura esistente), impiegando due installatori di 5^a categoria e un tempo di installazione di 1,5 ore per ogni dispositivo, pari a 81,00 €/cad, secondo il prezzario della regione Molise;
- costo di fornitura e installazione di corpi illuminanti circolari ad incasso dal diametro di 190 mm pari a 98,19 €/cad, secondo il prezzario della regione Molise;
- un costo di manodopera associato alla rimozione e dismissione delle lampade esistenti, incluso l'onere di carico, trasporto e scarico a discarica, pari a 2,07 €/kg.

Considerando la sostituzione di 1840 lampade da 3,4 kg ognuna all'interno della struttura e di circa 60 faretti da 1,58 kg ciascuno presenti nell'atrio, il costo finale associato al rifacimento del sistema di illuminazione attraverso la sola sostituzione dei corpi illuminanti risulta pari a 500'326,36 €.

Invece, per la seconda tipologia di intervento, al costo associato alla sostituzione delle sole lampade, va aggiunto il costo di installazione dei rilevatori di presenza e luminosità. In particolare, è stato previsto a titolo esemplificativo l'impiego dei rilevatori Busch-Jaeger ABB dal costo di 212 €/cad, a cui va aggiunto il costo di manodopera per l'installazione e il settaggio dei dispositivi, che secondo il prezzo della regione Molise, risulta pari a 27 €/ora per un installatore di 5^a categoria e 21,63 €/ora per un installatore di 2^a categoria. Quindi considerando l'installazione di 415 rilevatori all'interno della struttura e un tempo di installazione di circa 30 minuti per dispositivo, il costo complessivo dell'intervento, che prevede l'installazione di lampade LED e relativo controllo automatico risulta pari a 598'397,08 €.

5.1.5 Sostituzione dei serramenti

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. Ma come nel caso delle strutture opache, 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. In *Tabella 5.8* sono riportati, nello specifico, i valori limite della trasmittanza e del fattore solare totale previsti dal decreto.

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

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

Tabella 5.8: 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 mediamente pari a 3,21 W/m²K. L'intervento previsto 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 a giunto aperto e un vetrocamera con trattamento basso-emissivo e riempimento in argon (4-16-33.1) avente un indice di abbattimento acustico pari a 37 dB, (codice intervento *VcBe*), permeabilità all'aria classe 4 secondo la norma UNI EN 12207, tenuta all'acqua 9A secondo la norma UNI 12208 e resistenza al vento C3 secondo la norma UNI 12210. Ai fini della modellazione numerica e quindi delle valutazioni di carattere energetico, è stato considerato un serramento caratterizzato da telaio in alluminio a taglio termico, una trasmittanza termica della componente vetrata (doppio vetro basso emissivo sopraindicato) pari a 1,54 W/m²K e fattore solare pari a 0,632. In alternativa a tale tipologia di serramento, è stato considerato un telaio in alluminio a taglio termico dotato di un triplo vetro con trattamento basso-emissivo e riempimento delle intercapedini in argon (4-12-3-12-33.1). Tale 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 è stato considerato un serramento caratterizzato da telaio in alluminio a taglio termico, una trasmittanza termica della componente vetrata (triplo vetro basso emissivo sopraindicato) pari a 0,799 W/m²K e fattore solare pari a 0,455 (codice intervento *TvBe*).

Dall'analisi del fabbisogno energetico rispetto allo stato di fatto antecedente alla realizzazione degli interventi di retrofit in centrale termica, mostrato in *Tabella 5.9*, si evince che il risparmio conseguibile attraverso la sostituzione dei componenti finestrati con vetrocamera in argon e trattamento basso-emissivo è pari al 2,08%, mentre con l'adozione di serramenti in triplo vetro si raggiunge un risparmio del 4,37%.

	Energia primaria (MWh)			
	Elettrico	Termico	Totale	$\Delta E\%$
<i>CBPRE Cald+Boil - Stato di fatto pre-interventi centrale termica</i>	1032	1014	2046	-
<i>VcBe - Sostituzione componenti finestrati</i>	1027	977	2003	2,08%
<i>TvBe - Sostituzione componenti finestrati</i>	1004	952	1957	4,37%

Tabella 5.9: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto antecedente agli interventi in centrale (sostituzione componenti finestrati).

Per la determinazione dei costi di investimento è stato stimato un costo medio dei serramenti in relazione alla tipologia e alla dimensione di questi ultimi. In particolare, per la sostituzione dei componenti finestrati con vetrocamera e trattamento basso-emissivo si è fatto riferimento al prezzo della regione Molise assumendo un costo di investimento per la fornitura e posa in opera, compreso di meccanismi e tutti gli accessori per il corretto funzionamento, pari a 311,19 €/m². Inoltre, da indagini di mercato è stato considerato un costo di 12,58 €/m² relativo alla rimozione dei serramenti, in qualunque piano del fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombero 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.

Quindi, avendo escluso dall'intervento la parete esterna vetrata dell'atrio, la parete in vetrocemento e le porte finestrate dei sottotetti, la superficie vetrata oggetto di intervento è pari a circa 1137,49 m², da cui risulta un costo complessivo associato alla sostituzione dei componenti finestrati con vetrocamera basso-emissivo e riempimento in argon pari a circa 368'285,14 €.

Per quanto riguarda i serramenti con triplo vetro, è stato assunto da indagini di mercato un costo per la fornitura e posa in opera di tali serramenti, ad una o più ante, con sistema di apertura anta/ribalta, compreso di taglio e sfridi, ponteggi, opere murarie, controtelaio, maniglie, riprese di intonacature, tinteggiature e ogni ulteriore onere utile a dare l'opera realizzata e finita secondo la regola dell'arte, pari a 480 €/m². In definitiva, aggiungendo un costo per la rimozione e dismissione dei serramenti esistenti precedentemente specificato e tenendo conto sempre della superficie vetrata oggetto dell'intervento di 1137,49 m², il costo complessivo dell'investimento per la sostituzione dei componenti finestrati con triplo vetro ammonta a circa 560'304,82 €. Data la particolarità dell'edificio in oggetto, si rimanda a personale qualificato, sotto tale punto di vista, le verifiche strutturali per valutare l'implementazione di tale intervento.

5.1.6 Installazione di un impianto fotovoltaico

Durante la fase di audit, è emerso che il III edificio Polifunzionale non è dotato di un impianto fotovoltaico. Pertanto, date le dimensioni della struttura e i relativi fabbisogni energetici, è stato previsto l'installazione di un impianto fotovoltaico (codice intervento PV). sulla copertura del I lotto con esposizione sud-ovest (libero da aggetti ombreggianti).

Inoltre, la potenza da installare per tale impianto è stata scelta affinché rispettasse l'obbligo di integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici di nuova costruzione e negli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, come sancito dal D.Lgs. n.28/2011. In particolare, l'articolo 11, comma 1 (allegato 3) del suddetto decreto, stabilisce che *“nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, la potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili che devono essere obbligatoriamente installati sopra o all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze, misurata in kW, è calcolata secondo la seguente formula:*

$$P = \frac{1}{K} \cdot S \quad "$$

dove S è la superficie in pianta dell'edificio al livello del terreno, misurata in m², e K è un coefficiente (m²/kW) che nel caso in esame è assunto pari a 50. Tale vincolo, inoltre, è incrementato del 10% per gli edifici pubblici. Pertanto, considerando una superficie in pianta del complesso edilizio oggetto dell'intervento pari a 3483,17 m², la potenza minima da installare per un impianto fotovoltaico che rispetti il vincolo legislativo suddetto risulta pari a 76,63 kW. Al fine di modellare numericamente la realizzazione dell'intervento è stata considerata l'installazione di moduli fotovoltaici JINKO SOLAR Eagle-72 e inverter di stringa ABB, di cui si riportano in *Tabella 5.10* le principali caratteristiche.

	Codice intervento PV
Modulo fotovoltaico¹	JKM330PP-72- JINKO SOLAR Eagle
Tipo di cella	Policristallino 156x156 mm
Numero di celle	72
Dimensioni	1956×992×40 mm
Potenza massima (P_{max})	330 W _p
Tensione circuito aperto (Voc)	46.9 V
Efficienza del modulo (%)	17.01%
Tensione massima del sistema	1000 V _{DC}
Inverter di stringa	ABB
Massima tensione assoluta DC in ingresso	1100 V _{DC}
Efficienza massima (η_{max})	98.3%

Tabella 5.10: Specifiche tecniche del modulo fotovoltaico e dell'inverter di stringa selezionati per l'installazione di un impianto fotovoltaico per l'edificio III Polifunzionale.

Il rispetto del vincolo precedentemente enunciato è stato assicurato dalla copertura su tetto di 233 pannelli fotovoltaici, occupando una superficie di circa 452 m² e per una potenza di picco complessiva pari a 76,89 kWp. Va, inoltre, sottolineato che il tipo di prestazione fornita dal modello per implementare l'impianto fotovoltaico restituisce delle valutazioni di prima analisi utili in fase di progetto per stimare i livelli di producibilità annua dell'impianto stesso. Pertanto, i risultati forniti dal modello, basandosi inoltre su un file climatico non aggiornato, sono da ritenersi indicativi della produzione energetica dell'impianto fotovoltaico; tale assunzione è in linea con le finalità proposte da questo elaborato, volte, infatti, a condurre analisi di fattibilità delle misure di retrofit attraverso la valutazione del risparmio energetico e della redditività associate al loro investimento.

In base alle condizioni descritte per l'installazione di un impianto fotovoltaico è stata stimata una producibilità annua di 95,41 MWh/a corrispondente a un risparmio di energia primaria pari al 7,23% rispetto al caso base antecedente alla sostituzione delle caldaie e boiler, come riportato in *Tabella 5.11*.

	Energia primaria (MWh)			
	Elettrico	Termico	Totale	$\Delta E\%$
CBPRE Cald+Boil - Stato di fatto pre-interventi centrale termica	1032	1014	2046	-
PV - Installazione impianto fotovoltaico	884	1014	1898	7,23%

Tabella 5.11: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto antecedente agli interventi in centrale (installazione impianto fotovoltaico).

Lo stesso intervento, se rapportato allo stato di fatto con l'implementazione delle nuove caldaie e boiler in centrale, conduce a un risparmio di energia primaria pari al 7,91%, come riportato in *Tabella 5. 12*.

¹ Specifiche del modulo fotovoltaico rispetto alle condizioni STC (Standard Test Condition):

- Irraggiamento: 1000 W/m²

- Temperatura di cella: 25°C

- AM: 1.5

	Energia primaria (MWh)			$\Delta E\%$
	Elettrico	Termico	Totale	
CB_{POST} Cald+Boil - Stato di fatto post-interventi centrale termica	1032	838	1870	-
PV - Installazione impianto fotovoltaico	884	838	1722	7,91%

Tabella 5. 12: Risultati dell'analisi energetica rispetto allo stato di fatto con l'implementazione di nuove caldaie e boiler in centrale (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 1500 €/kWp. Pertanto, l'intervento di realizzazione di un impianto fotovoltaico da 76,89 kWp presenta un costo complessivo di circa 115'335,00 €.

5.1.7 Incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco

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

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

Durante la fase di audit dell'edificio in esame è emerso che delle due strutture opache verticali predominanti nell'involucro edilizio, ovvero la parete esterna in alucobond e parete esterna con porfido, solo la prima tipologia prevede al suo interno l'isolamento termico, costituito da 7 cm di feltro trapuntato in fibre minerali basaltiche. Diversamente, nella parete esterna con porfido non è presente alcun tipo di isolante, motivo per il quale è stato considerato un intervento (codice *INS*), che prevede di incrementarne il livello di isolamento termico attraverso l'insufflaggio di materiali isolanti termoacustici all'interno dell'intercapedine stessa con uno spessore di 5 cm. In particolare, è stato ipotizzato l'impiego di fiocchi di cellulosa ISOFLC[®] LM ottenuti da fogli di carta di giornale riciclati (92%) e impregnati con borace e acido borico (8%), le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 5.13. Strutturalmente la parete oggetto dell'intervento presenta l'intercapedine d'aria non ventilata verso il lato interno e, dunque, separata in ogni piano dai solai interpiano; pertanto, è stato ipotizzato che l'intervento di insufflaggio venisse eseguito all'interno dell'edificio, ovvero in tutti gli ambienti delimitati verso l'esterno dalla parete con porfido.

Fiocchi di cellulosa - ISOFLC® LM	
Conducibilità (W/mK)	0,038
Calore specifico (J/kgK)	2150
Densità (kg/m ³)	50
Resistenza alla diffusione di vapore acqueo	1-2
Prezzo (€/sacco) ²	19,50

Tabella 5.13: Caratteristiche dei fiocchi di cellulosa ISOFLC® LM impiegati per l'insufflaggio in intercapedine della parete con porfido.

Nella pratica l'applicazione del materiale isolante comporta una riduzione del valore della trasmittanza del pacchetto murario d'interesse e, in particolare in Tabella 5.14 sono riportate le principali caratteristiche prima e dopo l'intervento, per entrambe le configurazioni previste.

	Pre-intervento		Post-intervento	
	U (W/m ² K)	Spessore tot (m)	U (W/m ² K)	Spessore tot (m)
	INSUFFLAGGIO			
Parete esterna isolata con porfido	0,904	0,430	0,446	0,430

Tabella 5.14: Intervento previsto per le pareti esterne verticali con porfido

Dall'analisi del fabbisogno energetico si evince che il risparmio conseguibile per tale misura è pari all'1,40% rispetto al caso base antecedente alla sostituzione delle caldaie e boiler, come mostrato in Tabella 5.15.

	Energia primaria (MWh)			
	Elettrico	Termico	Totale	ΔE%
CB _{PRE} Cald+Boil - Stato di fatto pre-interventi centrale termica	1032	1014	2046	-
INS - Insufflaggio materiale isolante in intercapedine da 5 cm	1026	991	2017	1,40%

Tabella 5.15: Risultati dell'analisi energetica antecedente agli interventi in centrale (Incremento isolamento pareti verticali esterne con porfido).

Relativamente all'aspetto economico, considerando che il costo per la sola fornitura del materiale è rapportato alla quantità di sacchi di materiale acquistabili, è stato individuato, da indagini di mercato, il consumo previsto per ogni m³ (nel caso di applicazione in cavità), corrispondente a 4 sacchi per ogni m³. Pertanto, tenendo conto di una superficie verticale complessiva oggetto dell'intervento pari a 3765,52 m² e quindi di un volume totale di 188,28 m³, il costo associato alla fornitura di 754 sacchi di cellulosa necessari per il riempimento di tale volume è pari a 14'703,00 €. A tale costo è stato aggiunto, sempre attraverso analisi di mercato, la voce di costo per la sola posa in opera di materiali termoisolanti in fiocchi per insufflaggio a secco a bassa pressione in intercapedini murarie, che ammonta a 67,80 €/m³ comprensivo di:

- trasporto;
- carico/scarico;
- deposito a qualsiasi piano del fabbricato;
- nolo del macchinario per l'insufflaggio e tutta la strumentazione necessaria;

² Un sacco contiene 12,5 kg di prodotto

- formazione dei fori necessari per la messa in opera dall'interno o dall'esterno dell'edificio e la video ispezione mediante endoscopio;
- chiusura dei fori con malta premiscelata a rustico o equivalente;

esclusa la rasatura, stuccatura ed ogni opera da decoratore per il rappezzo della tinteggiatura.

Inoltre, durante i sopralluoghi è stata riscontrata la presenza di pannelli di rivestimento come finitura interna delle pareti per quasi tutti gli ambienti dell'edificio oggetto di analisi. Pertanto, l'esecuzione dell'intervento di insufflaggio richiede dapprima lo smontaggio di tali pannelli; a tal proposito, è stato previsto un costo per lo smontaggio e rimontaggio dei pannelli pari a 50,00 € per ogni parete, avendo considerato due operai qualificati come comune edile e impiegando due ore per ogni parete. Quindi, è stato stimato per gli ambienti delimitati verso l'esterno da parete con porfido un totale di circa 90 pareti rifinite con pannelli di rivestimento interni, per le quali è da computare anche il suddetto costo. Diversamente, per le aule al piano terra del II lotto, essendo rifinite all'interno da muratura in laterizio faccia a vista, non è stato possibile stimare un costo per la corretta esecuzione dell'operazione di insufflaggio, motivo per il quale per tutti gli aspetti legati all'intervento in esame si rimanda a tecnici qualificati le verifiche strutturali al fine di valutarne l'implementazione stessa.

In definitiva, il costo totale dell'investimento è pari a circa 31'968,38 €.

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 rapportate a due condizioni indicative dello stato di fatto antecedente e successivo alla realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica dell'impianto termo-tecnico in centrale termica (primavera 2018), che coinvolgono principalmente l'installazione di nuove caldaie ad alto rendimento dalla potenza di 766 kW ognuna e di nuovi boiler verticali per la produzione e accumulo di acqua calda sanitaria da 1500 litri ciascuno. I corrispondenti fabbisogni energetici (energia primaria) sono riportati rispettivamente in *Tabella 5.16* e in

Tabella 5.17, insieme alle relative emissioni di CO₂ equivalente, nonché le rispettive riduzioni rispetto allo stato di fatto al quale si fa riferimento (ΔE_p e ΔCO_2); i costi di investimento (CI), il tempo di ritorno del capitale investito (SPB e DPB), e il valore attuale netto (VAN) associato a ciascun intervento.

È necessario sottolineare che in *Tabella 5.16* sono riportati i risultati energetici ed economici dell'intervento già realizzato in centrale termica, indicato con il codice CB_{POST} Cald+Boil, per fornire delle indicazioni sul risparmio energetico nonché sulla redditività dell'investimento sostenuto per l'intervento stesso. A tal proposito, è possibile osservare come la sostituzione delle caldaie e boiler conduce a un risparmio notevole sul fabbisogno energetico dell'edificio, pari all'8,60%, stimando, inoltre, un tempo di recupero del capitale investito (che ammonta a circa 44'958 €) di circa 4 anni e un VAN positivo pari a 116'210 €.

Dall'analisi della *Tabella 5.16*, si evince che l'edificio nello stato di fatto precedente alla realizzazione degli interventi in centrale, è caratterizzato dal più alto fabbisogno energetico, pari a 195 kWh/m². Relativamente agli interventi proposti, è emerso che le misure più promettenti sia dal punto di vista energetico che economico risultano essere quelle che prevedono interventi sugli impianti. È, inoltre, interessante notare che le misure relative all'installazione di recuperatori nella sotto-centrale del I lotto (codice intervento REC) e di un impianto fotovoltaico (codice intervento PV) da 76,89 kW offrono ottimi vantaggi sia dal punto di vista energetico che economico. Tra gli interventi proposti sull'impianto, l'unica misura a risultare sconveniente in termini economici a fronte di risparmi energetici più contenuti rispetto ai precedenti interventi è quella relativa al rifacimento degli impianti illuminotecnici, ottenendo difatti un VAN negativo.

Con riferimento agli interventi sull'involucro opaco e trasparente, le misure proposte consentono risparmi energetici contenuti rispetto a elevati costi di investimento, soprattutto per le misure che interessano i componenti trasparenti. A tal proposito, nel caso della sostituzione dei serramenti le soluzioni che prevedono l'impiego di triplo vetro basso-emissivo o vetrocamera basso-emissivo, con riempimento in argon e telaio a taglio termico conducono a tempi di ritorno del capitale non proponibili e un VAN a 20 anni negativo.

Infatti, alla combinazione di misure per il solo involucro (codice TvBe+INS), che prevede l'insufflaggio di materiale isolante nell'intercapedine della parete esterna con porfido e l'applicazione di serramenti in triplo vetro basso-emissivo con argon e telaio a taglio termico, è associato un risparmio di energia primaria circa pari al 6,13%, a fronte di un costo di investimento di circa 592'273,21 €, un tempo di ritorno del capitale di oltre 64 anni e un VAN negativo (-456'470 €).

In virtù del fatto che le misure più vantaggiose dal punto di vista energetico ed economico sono gli interventi proposti sull'impianto, per essi sono riportati in

Tabella 5.17 i rispettivi risultati ottenuti dal confronto con lo stato di fatto in cui siano state implementate nuove caldaie e boiler in centrale, di cui si stima un fabbisogno di energia primaria totale pari a 178 kWh/m². In particolare, coerentemente con quanto già espresso in precedenza, le misure migliori risultano sempre essere quelle associate all'installazione di recuperatori di calore nella sotto-centrale del I lotto e dell'impianto fotovoltaico. Diversamente, la soluzione che prevede l'applicazione di tutti gli interventi proposti, REC+PV+LED+C+REG+TvBe+INS, risulta essere la migliore dal punto di vista strettamente energetico, ma tuttavia non conveniente dal punto di vista economico. Nello specifico, tale soluzione accorpa alla migliore misura per l'involucro tutte le misure previste sull'impianto, ovvero l'installazione di recuperatori di calore nelle UTA della sotto-centrale del I lotto, l'installazione di un impianto fotovoltaico, il rifacimento dell'impianto illuminotecnico e l'adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione. A tale pacchetto di misure è associato un risparmio di energia primaria pari al 31,32% rispetto allo stato di fatto in cui è prevista l'implementazione di nuove caldaie e boiler in centrale; tuttavia, per esso è stato stimato un periodo di ritorno del capitale investito di circa 28 anni e un VAN a 20 anni negativo (-653'808 €).

Come già precedentemente commentato, per entrambi i casi base la combinazione di misure che risulta essere il miglior compromesso tra risparmio di energia primaria e redditività dell'investimento è quella corrispondente al codice REC+PV, che prevede l'installazione di ulteriori recuperatori di calore nelle UTA, ubicate nella sotto-centrale del I lotto, non provviste attualmente di questi ultimi e l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura del tetto. Per tale combinazione di interventi è stato previsto un fabbisogno complessivo di energia primaria di circa 148 kWh/m² in relazione allo stato di fatto in cui siano state implementate nuove caldaie e boiler in centrale, comportando una riduzione complessiva del fabbisogno energetico di circa il 17% e di circa il 16% sulle emissioni di CO₂ evitate, derivanti, difatti, dalla diminuzione del fabbisogno stesso richiesto dall'edificio. Inoltre, per questi ultimi, ipotizzando un costo complessivo di investimento pari a circa 134'743 €, è stato stimato un Simple Pay Back di circa 5 anni e un Discount Pay Back pari a circa 6 anni; infine, al ventesimo anno il VAN risulta positivo e pari a 248'443 €.

Codice intervento	Energia primaria				ΔEp [%]	CO ₂ [10 ³ kg]	ΔCO_2 [%]	CI [€]	SPB [anni]	DPB [anni]	VAN [a 20 anni]
	Elettrico	Gas	Totale	Totale/m ²							
	[MWh/a]	[MWh/a]	[MWh/a]	[kWh/m ²]							
CB _{PRE} Cald+Boil	1032	1014	2046	194,89		596,61					
CB _{POST} Cald+Boil	1032	838	1870	178,13	8,60%	563,61	5,53%	44'958	4	circa 5	116'210
REC	1037	813	1849	176,13	9,62%	560,70	6,02%	19'408	2	circa 2	157'837
REG	1021	971	1992	189,76	2,63%	584,35	2,05%	63'127	17	oltre 20	-7'211
LED	945	1025	1970	187,68	3,70%	564,58	5,37%	500'326	60	oltre 20	-376'464
LED+C	899	1030	1928	183,69	5,74%	547,11	8,30%	598'397	46	oltre 20	-406'780
VcBe	1027	977	2003	190,83	2,08%	587,60	1,51%	368'285	130	circa 21	-326'158
TvBe	1004	952	1957	186,38	4,37%	574,24	3,75%	560'305	84	oltre 20	-461'286
PV	884	1014	1898	180,80	7,23%	538,46	9,75%	115'335	8	circa 9	113'182
INS	1026	991	2017	192,15	1,40%	590,03	1,10%	31'968	16	circa 21	-2'011
REC+REG	1026	784	1810	172,40	11,54%	505,47	15,28%	82'535	6	6	137'235
TvBe+INS	999	922	1921	182,94	6,13%	566,25	5,09%	592'273	65	oltre 20	-456'470
REC+FV	889	812	1701	162,05	16,85%	502,56	15,76%	134'743	5	circa 6	270'942
TvBe+REG	996	917	1913	182,18	6,52%	564,15	5,44%	623'432	64	oltre 20	-478'483
TvBe+REG+INS	990	917	1906	181,59	6,82%	561,79	5,84%	655'400	63	oltre 20	-501'100
PV+LED+C	751	1029	1780	169,59	12,98%	488,92	18,05%	713'732	25	oltre 20	-293'430
REC+PV+LED+C+REG	745	795	1540	146,73	24,71%	442,72	25,79%	796'268	18	oltre 20	-152'451
TvBe+INS+REG+LED+C	860	897	1758	167,43	14,09%	507,22	14,98%	1'253'797	50	oltre 20	-881'680

Tabella 5.16: Risultati dell'analisi energetica ed economica delle misure di retrofit applicate al caso studio prima della realizzazione degli interventi nella centrale termica.

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/a]	[MWh/a]	[MWh/a]	[kWh/m ²]							
CB _{POST} Cald+Boil	1032	838	1870	178,13		563,61					
REC	1037	661	1698	161,71	9,22%	532,30	5,56%	19'408	2	2	135'397
REG	1021	798	1819	173,30	2,71%	551,94	2,07%	63'127	18	oltre 20	-10'079
PV	884	838	1722	164,05	7,91%	519,67	7,80%	115'335	8	circa 9	113'142
LED+C	899	853	1751	166,79	6,36%	513,83	8,83%	598'397	46	oltre 20	-405'392
REC+FV	889	661	1550	147,64	17,12%	474,18	15,87%	134'743	5	6	248'443
REC+LED+C+REG	893	647	1540	146,73	17,63%	473,17	16,05%	680'933	26	oltre 20	-291'427
REC+PV+LED+C+REG	745	645	1390	132,45	25,65%	414,60	26,44%	796'268	19	oltre 20	-176'243
REC+PV+LED+C+REG+TvBe+INS	718	567	1284	122,34	31,32%	388,97	30,99%	1'388'541	28	oltre 20	-653'808

Tabella 5.17: Risultati dell'analisi energetica ed economica delle misure di retrofit applicate al caso studio dopo la realizzazione degli interventi nella centrale termica (installazione di nuove caldaie e boiler, avvenuta in primavera 2018)

Conclusioni e raccomandazioni

La presente relazione descrive i risultati dell'audit energetico *del III 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 con rilievi termografici);
- tipologia, profili di funzionamento e di regolazione dell'impianto termico e illuminotecnico;
- 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. Nel 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 il livello di temperatura all'interno degli ambienti, sia in regime invernale, è supera lo standard ottimale per tutte le zone monitorate ad eccezione di quelle ubicate al piano terra.

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 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. 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 dallo standard 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. Dalle informazioni acquisite dall'ufficio tecnico è stato preso atto della realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica della centrale termica a servizio del complesso edilizio, risalente alla primavera 2018, che prevede la sostituzione dei generatori termici con nuovi generatori a basamento ad alto rendimento con potenza di 766 kW cadauno, alimentati a gas naturale, la sostituzione dei bollitori verticali per la produzione e accumulo di acqua calda sanitaria della capacità di 1500 lt cadauno, il rifacimento delle tubazioni in centrale termica e coibentazione delle stesse nonché tutte le operazioni necessarie per l'adeguamento dell'impianto elettrico e di distribuzione gas in centrale. La recente implementazione di tali interventi non ha permesso di calibrare opportunamente il modello numerico del sistema edificio-impianti, non avendo, difatti, uno storico significativo dei consumi energetici, e quindi di distinte dei contratti di fornitura, necessari per procedere all'aggiornamento del nuovo stato di fatto così definito. Tuttavia, tale condizione non ha impedito di condurre valutazioni energetiche ed economiche in merito all'applicazione degli interventi realizzati, nonché di trattare il nuovo stato di fatto in questione come ulteriore caso base rispetto al quale confrontare le misure proposte per il complesso edilizio in questione.

A tal proposito, sono stati ipotizzati ed analizzati i seguenti interventi:

- installazione di recuperatori di calore all'interno delle unità di trattamento aria presenti nella sotto-centrale del I lotto;
- adeguamento del sistema di regolazione degli impianti di climatizzazione;
- sostituzione dei gruppi frigo esistenti con macchine più performanti ed a maggiore efficienza, a parità di potenza;
- sostituzione/rifacimento dell'impianto di illuminazione interna;
- sostituzione dei serramenti con altri caratterizzati da una maggiore resistenza termica;
- installazione di un impianto fotovoltaico;
- incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco.

Tali misure sono state poi combinate in pacchetti per un totale di 17 tipologie di interventi (compresa la sostituzione di caldaie e boiler) applicate allo stato di fatto antecedente agli interventi realizzati in centrale, e 8 tipologie di interventi applicate, invece, allo stato di fatto in cui siano state implementate le nuove caldaie e boiler. Per ciascuna delle misure così 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 nei relativi stati di fatto

precedentemente specificati. 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 nello stato di fatto antecedente alla sostituzione delle caldaie e boiler è caratterizzato dal più alto fabbisogno, pari a 195 kWh/m², e di un valore pari a 178 kWh/m² in seguito all'implementazione di tale intervento.

Per entrambi i casi base la combinazione di misure che risulta essere il miglior compromesso tra risparmio di energia primaria e redditività dell'investimento è quella corrispondente al codice REC+PV, che prevede l'installazione di ulteriori recuperatori di calore nelle UTA, ubicate nella sotto-centrale del I lotto, non provviste attualmente di questi ultimi e l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura del tetto. Per tale combinazione di interventi è stato previsto un fabbisogno complessivo di energia primaria di circa 148 kWh/m² in relazione allo stato di fatto in cui siano state implementate nuove caldaie e boiler in centrale, comportando una riduzione complessiva del fabbisogno energetico di circa il 17% e di circa il 16% sulle emissioni di CO₂ evitate, derivanti, difatti, dalla diminuzione del fabbisogno stesso richiesto dall'edificio. Inoltre, per questi ultimi, ipotizzando un costo complessivo di investimento pari a circa 134'743 €, è stato stimato un Simple Pay Back di circa 5 anni e un Discount Pay Back pari a circa 6 anni; infine, al ventesimo anno il VAN risulta positivo e pari a 248'443 €.

Appendice

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

1. Intervento: Sostituzione caldaie e bollitori (già sostituite in primavera 2018)

Fonte: computo metrico per il III Edificio Polifunzionale

Voci di costo considerate:

- smontaggio delle due caldaie esistenti ed annesse apparecchiature, taglio e chiusura delle tubazioni di adduzione e scarico, trasporto a rifiuto in oneri di discarica: 2'000 €;
- opere murarie a seguito della sostituzione dei generatori per la demolizione e rifacimento dei basamenti di appoggio: 2'000 €;
- quadro comando caldaia per temperature di esercizio fino a 90°C, montaggio sopra caldaia, funzioni di termoregolazione per circuito di riscaldamento miscelato e diretto, carica bollitore comprendente sonda esterna. sonda mandata e sonda bollitore, possibilità di ampliamento delle funzioni: 2'000 €;
- caldaie pressurizzate in acciaio ad alto rendimento con bruciatore ad aria soffiata con pannellatura d'acciaio verniciata a fuoco, con quadro porta-strumenti comprendente termoidrometro, interruttore di linea, termostato di regolazione, collegamenti elettrici ed equipotenziali, piastra frontale per attacco bruciatore, compreso di bruciatori a gas bistadio: 29'003,32 €;
- bollitori ad accumulo verticale, in acciaio zincato a bagno caldo, per produzione di acqua calda sanitaria, con scambiatore in rame estraibile a grande superficie di scambio, funzionante con acqua a $T < 100^{\circ}\text{C}$, corredati di termostato e termometro, completamente coibentati, completi di valvola per lo scarico del serbatoio, valvole d'intercettazione circuiti, valvola di sfiato, gruppo di riempimento automatico $\frac{1}{2}$ ", pressione 6 bar, della capacità cadauno di 1500 litri: 6'354,46 €;
- modifica alle 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: 3'600 €.

Costo totale sostenuto per gli interventi di riqualificazione energetica in centrale termica: 44'957,78 €

2. Installazione Recuperatori di calore nelle UTA della sotto-centrale I lotto

Voci di costo considerate:

Provvista e posa in opera di recuperatore di calore, del tipo aria-aria, con passaggio dei fluidi a correnti incrociate, provvisto di pacco scambiatore in lamiera di alluminio a larga spaziatura, involucro esterno in lamiera di acciaio zincato, rendimento del 60-70% per portata d'aria:

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Oltre 18.000 m ³ /h fino a 25.000 m ³ /h (UTA. P1 portata 21000 m ³ /h e per UTA BL portata 21900 m ³ /h)	2	7204,64	14'409,28	Computo metrico (2016) in rete: www.regione.piemonte.it/oopp/prezzario/dwd/2018/sez05.xls
Oltre 6.500 m ³ /h fino a 8.000 m ³ /h (UTA AL portata 7450 m ³ /h e per UTA AT portata 7000 m ³ /h)	2	2499,52	4'999,04	

Costo totale per l'installazione di recuperatori di calore nelle UTA della sotto-centrale I lotto: 19'408,32 €

1. Adeguamento del sistema di regolazione degli impianti

Voci di costo considerate:

		Quantità	€/cad	€	Fonte
Fornitura termostati 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.	400	120,00	48'000	Listino FANTINI COSMI (2018): http://www.idroftp.net/FLIPBOOK/ROSSIELERSA/FCS/FANTINICOSMI%20-%20LISTINO%202018/index.html
Fornitura valvole e comandi termostatici per radiatori	art. 1620 valvola termostattizzabile a squadra cromata-attacco per tubo ferro-1"	35	26,99	944,65	Listino FAR (marzo 2018): http://www.far-spa.it/download_far/far_catalogo/P07%20Valvole%20per%20corpi%20scaldanti%20ed%20accessori.pdf
	art. 1828 -comando termostatico con sensore a liquido incorporato in abbinamento a valvole termostattizzabili FAR	35	17,50	612,50	
Installazione termostatici	valvole e comandi	35	22,00	770,00	Prezzario Molise - conferma Ufficio tecnico
Fornitura e installazione termostati per canali d'aria	Termostato per il controllo della temperatura all'interno dei canali ad aria	5	400,00	2'000,00	Ufficio tecnico

	Unità di misura	€/h	€	Fonte
Installazione termostati per fan coil - n.2 installatori di 5ª categoria - tempo di installazione: 30 min/cad	200 h	54,00	10'800	Prezzario Molise - conferma Ufficio tecnico

Costo totale di adeguamento del sistema di regolazione a livello di singolo ambiente: 63'127,15 €

2. Sostituzione lampade con LED e faretto Atrio

Voci di costo considerate:

		Quantità	€/cad	€	Fonte
Sostituzione plafoniere	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	1840	180,57	332'248,8	Catalogo Disano

	Installazione, compreso quanto occorre per dare il lavoro finito (esclusi gli oneri per eventuale adattamento/modifica della controsoffittatura esistente) -n.2 installatore 5 ^a categoria -tempo di installazione 1,5 h	1840	81,00	149'040	Prezzario Regione Molise; https://www.inps.it/docAllegati/InpsSettings/Lists/AllegatiGare/Gara_b584/SCM-C.1.01.pdf
Sostituzione faretti atrio	Fornitura e manodopera-Apparecchio ad incasso con corpo in alluminio, lampada led temperatura di colore 3000 K, alimentatore incorporato, riflettore in alluminio cromato, classe di isolamento 1, grado di protezione IP 23, alimentazione 230 V 50 Hz, classe energetica A, apertura del fascio 95°: potenza 20 W, equivalente a 36 W fluorescente, diametro 190 mm	60	98,19	5'891,40	Prezzario Regione Molise

		Quantità	€/kg	€	Fonte
Dismissione apparecchi esistenti	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	6350,8	2,07	13'146,16	https://www.guarene.it/wp-content/uploads/2017/06/ALL-EGATO-5-3.pdf

Stima peso lampade esistenti ³		Peso	Quantità	Peso Totale	Fonte
Plafoniere	Art.151301-08 CEL-F FL 1x36 3350lm-4000K-Ra 1b G13 37 W TOT BIANCO	3,40	1840	6'256	http://catalogo.disano.it/it/classic/disano-apparecchi-da-incasso/disano-comfort-serie-8/874-comfort-t8-ottica-speculare-99-99-bordo-largo#
Faretti	Philips Latina FBH024 - 2 pcs - MASTER PL-C 4 Pin - 26 W - Reattore alta frequenza HF - Frosted glass	1,58	60	94,8	https://www.domuswire.com/search/scheda_prodotto.jsp?cprodotto=Philips+88507799&t=Philips-FBH024+2xPL-C%2F4P26W%2F840+K+HF+WH+FRG&ccategoria=1630
Peso totale				6'350,8	

³ Scelta di lampade analoghe a quelle esistenti per avere una stima per peso

Costo totale di intervento stimato per sostituzione lampade con LED: 500'326,36 €

3. Installazione sensori di presenza e illuminazione per controllo apparecchi illuminanti

Voci di costo considerate:

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Fornitura rilevatori Busch-Jaeger ABB	415	212,00	87'980	Da listino ABB 2018 in rete: https://library.e.abb.com/

		Unità di misura	€/h	€	Fonte
Installazione e settaggio dei dispositivi. Tempo installazione 30 min/cad	n.1 Installatore 5 ^a categoria	207,5 h	27,00	10'090,73	Prezzario Regione Molise
	n. 1 Installatore 2 ^a categoria		21,63		

Costo totale di intervento stimato per sostituzione lampade con LED e sensori di controllo: 598'397,08 €

4. Sostituzione dei serramenti con doppio vetro

Voci di costo considerate:

		m ²	€/m ²	€	Fonte
Fornitura e posa in opera	Serramento realizzato con profili estrusi di alluminio verniciato bianco RAL 9010, spessore 50 µ, a taglio termico e giunto aperto, completo di controtelaio metallico, esclusa la posa dello stesso, compresi maniglie, cerniere, meccanismi di manovra, dispositivi di sicurezza contro le false manovre e quant'altro necessario per il funzionamento, guarnizioni in EPDM o neoprene e vetrocamera, permeabilità all'aria classe 4 secondo la norma UNI EN 12207, tenuta all'acqua 9A secondo la norma UNI 12208, resistenza al vento C3 secondo la norma UNI 12210: vetrocamera 4-16-33.1 bassoemissivo con gas argon, Uw = 1,2 W/mqK, Ug = 1,0 W/mqK, Uf = 0,9 W/mqK, Rw = 35 dB. Prezzo medio per le seguenti tipologie: ▪ finestra a 1 anta, a vasistas	1'137,49 (esclusa parete vetrata atrio, parete in vetrocemento e portefinestre sottotetti)	311,19	353'975,51	Prezzario Regione Molise

	<ul style="list-style-type: none"> finestra a 2 ante, a battente finestra a 1 anta, a telaio fisso portafinestra 2 ante, a battente 				
Smontaggio e Dismissione vecchi serramenti	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombero 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 0,50 m ²		12,58	14'309,62	<p>Computo metrico in rete (2017):</p> <p>https://www.guarene.it/wp-content/uploads/2017/06/ALLLEGATO-5-3.pdf</p>

Costo totale stimato per sostituzione dei componenti finestrati con vetrocamera basso-emissivo: 368'285,14 €

5. Sostituzione dei serramenti con triplo vetro (in alternativa alla precedente)

Voci di costo considerate:

		m ²	€/m ²	€	Fonte
Fornitura e posa in opera	Telaio in alluminio a taglio termico dotato di un triplo vetro con doppio trattamento basso-emissivo e riempimento delle intercapedini in argon - Uw 1,1 W/m ² K; Ug 0,6 W/m ² K; g 0.52; Rw 35dB antieffrazione e antiinfortunistica. Ad una o più ante, con sistema di apertura anta/ribalta. 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 a scelta, riprese di intonacature e tinteggiature, Prezzo medio per finestre e portefinestre	1'137,49 (esclusa parete vetrata atrio, parete in vetrocemento e portefinestre sottotetti)	480	545'995,20	<p>Computo metrico in rete (più affine alla tipologia scelta):</p> <p>http://www.comune.turriac.o.go.it/portale/export/sites/turriaco/allegati/archivio_file/Tecnico/ScuolaPrimaria/COMPUTO.pdf</p>
Smontaggio e Dismissione vecchi serramenti	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombero dei		12,58	14'309,62	<p>Computo metrico in rete (2017):</p> <p>https://www.guarene.it/wp-content/uploads/2017/06/ALLLEGATO-5-3.pdf</p>

	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 0,50 m ²				
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--

Costo totale stimato per sostituzione dei componenti finestrati con triplo vetro basso-emissivo: 560'304,82 €

6. Installazione impianto fotovoltaico da 76,89 kWp (233 pannelli)

Voci di costo considerate:

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)- 1500 €/kWp

MODULO FOTOVOLTAICO:

- JKM330PP-72- JINKO SOLAR EAGLE
- Policristallino
- 1956×992×40mm
- $P_{max}=330Wp$
- $\eta_{modulo}=17.01\%$

Inverter di stringa ABB:

- $\eta_{max}=98.3\%$
- $V_{max}=1100V$

Costo totale di intervento stimato impianto fotovoltaico da 76,89 kWp: 115'335,00 €

7. Isolamento in intercapedine-5cm (per la parete esterna isolata con Porfido) mediante insufflaggio

Voci di costo considerate:

		m ³	€/m ³	€	Fonte
Fornitura	Isolante in fiocchi di cellulosa per insufflaggio ISOFLOC LM: $\lambda=0,039 W/m K$ $p=50 kg/m^3$ $c=2150 J/kg K$ Prezzo:19,50 €/sacco Ogni m ³ = 4 sacchi 1 sacco=12,5 kg	188,28	78,09	14'703	In rete per affinità di materiale: http://docplayer.it/10798423-Costruire-sano-vivere-meglio.html
Posa in opera	insufflaggio a secco a bassa pressione di materiali isolanti termoacustici in fiocchi		67,80	12'765,38	Da computo metrico 2017 in rete: https://www.guarene.it/wp-content/uploads/2017/06/ALLEGATO-5-3.pdf

	in intercapedini murarie. Compreso il trasporto, il carico, lo scarico, il deposito a qualsiasi piano del fabbricato, il nolo del macchinario per l'insufflaggio e tutta la strumentazione necessaria. Compresa la formazione dei fori necessari per la messa in opera dall'interno o dall'esterno dell'edificio e la video ispezione mediante endoscopio. Compresa la chiusura dei fori con malta premiscelata a rustico o equivalente. Esclusa la rasatura, stuccatura ed ogni opera da decoratore per il rappezzo della tinteggiatura. Escluso il nolo di ponteggio.				
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--

		Quantità	€/parete	€	Fonte
Smontaggio e rimontaggio pannelli di rivestimento interni	-manodopera n.2 operaio comune edile - tempo di smontaggio e rimontaggio 2h	90	50,00	4500	Ufficio tecnico

Costo totale stimato per insufflaggio in intercapedine della parete esterna con porfido: 31'968,38 €

8. sostituzione dei gruppi frigo esistenti con macchine più performanti ed a maggiore efficienza, a parità di potenza;

	Quantità	€/cad	€	Fonte
Refrigeratori d'acqua condensati ad aria con ventilatori elicoidali, in esecuzione "package" per esterno, composti da: compressori; evaporatore a fascio tubiero o a piastra completo di resistenza antigelo; condensatore in rame-alluminio completo di ventilatori; circuito frigorifero completo di accessori; carica di refrigerante e olio; sistema di controllo a microprocessore con display e schema sinottico, interfacciabile con sistemi esterni di supervisione, completo di strumentazione di regolazione e controllo; quadro elettrico a doppia chiusura con sezionatore generale e cablaggi a valle; basamento in acciaio zincato a caldo e verniciato completo di supporti antivibranti; pannellatura di contenimento in peralluman smontabile. Serie con le caratteristiche seguenti: - refrigerante HFC R-407c - compressori ALTERNATIVI SEMI-	1	62.235	62.235,00	Da listino Comune di Milano

<p>ERMETICI</p> <ul style="list-style-type: none"> - versione STANDARD per pressione sonora massima dB(A) 86 a m 1 - costruzione MODULARE. <p>Grandezze (kW: potenza frigorifera con acqua °C da 12 a 7 e aria °C 35 - n°: numero minimo compressori): - oltre 460 fino a 500 kW</p>				
<p>Refrigeratori d'acqua condensati ad aria con ventilatori elicoidali, in esecuzione "package" per esterno, composti da:compressori; evaporatore a fascio tubiero o a piastra completo di resistenza antigelo; condensatore in rame-alluminio completo di ventilatori; circuito frigorifero completo di accessori; carica di refrigerante e olio; sistema di controllo a microprocessore con display e schema sinottico, interfacciabile con sistemi esterni di supervisione, completo di strumentazione di regolazione e controllo; quadro elettrico a doppia chiusura con sezionatore generale e cablaggi a valle; basamento in acciaio zincato a caldo e verniciato completo di supporti antivibranti; pannellatura di contenimento in peralluman smontabile.</p> <p>Serie con le caratteristiche seguenti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - refrigerante HFC R-407c - compressori ALTERNATIVI SEMI-ERMETICI - versione STANDARD per pressione sonora massima dB(A) 86 a m 1 - costruzione MODULARE. <p>Grandezze (kW: potenza frigorifera con acqua °C da 12 a 7 e aria °C 35 - n°: numero minimo compressori): - oltre 660 fino a 700 kW</p>	1	93.095	93.093,00	Da listino Comune di Milano
<p>Rimozione di refrigeratore acqua di medie dimensioni (da 301 a 700 kw)</p> <p>Comprensiva di tutti i componenti ed accessori dell'impianto esistente,</p> <ul style="list-style-type: none"> - trasporto e conferimento a discarica autorizzata di tutti i componenti ed accessori rimossi dall'impianto esistente <p>gruppo Trane RTAC 140 gruppo Trane ERTAA 324</p>	2	2.280	5.760,00	Da listino Comune di Milano
<p>Opere di installazione refrigeratore acqua di medie dimensioni (da 301 a 700 kw) comprensivo di:</p> <ul style="list-style-type: none"> - trasporto e posizionamento dove previsto, scarico con idonei mezzi, posa in opera in opportuni sistemi e supporti - collegamento all'impianto elettrico e fluidi di distribuzione esistenti con scarico e ricarica impianti, taglio e saldature tubazioni, sostituzione arresti e manometri, rifacimento coibentazioni e rivestimenti in lamierino di alluminio e tutto quanto necessario per dare l'apparecchiatura perfettamente funzionante 	2	5.960	11.920,00	Analisi prezzo

Costo totale stimato per sostituzione gruppi frigo:

173.010,00 €

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 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".

- DECRETO LEGISLATIVO 3 marzo 2011 , n. 28 - Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/C.