

# Ricerca di Sistema elettrico



## **Efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati: caratterizzazione di casi studio reali (LA1.4)**

Silvia Di Turi, Domenico Palladino,  
Francesca Caffari Giulia Centi, Francesca Margiotta,  
Laura Ronchetti, Paolo Signoretti, Lisa Volpe

EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DI COMPLESSI DI EDIFICI STORICI E VINCOLATI: CARATTERIZZAZIONE DI CASI STUDIO REALI (LA1.4)

Silvia Di Turi, Domenico Palladino, Francesca Caffari, Giulia Centi, Francesca Margiotta, Laura Ronchetti, Paolo Signoretti, Lisa Volpe – ENEA

Con il contributo di: Fabiana Volpe, Michele Reginaldi - PAAA  
Nicolandrea Calabrese, Federica Giustini, Marco Morini - ENEA

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: 1 Decarbonizzazione

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

Linea di attività: 1.4

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Domenico Iatauro, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: Gennaio 2022

Mese inizio effettivo: Gennaio 2022

Mese fine previsto: Giugno 2023

Mese fine effettivo: Giugno 2023

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	7
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	7
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI .....	8
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	8
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	17
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	18
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE .....	19

## 1 Risultati attesi

1. **Disamina introduttiva volta all'inquadramento del tema "edifici storici ed efficienza energetica"** che metta in luce non soltanto lo stato dell'arte, ma anche le criticità che si riscontrano in tale campo di azione, fortemente dipendenti dai contesti in cui si opera.
2. **Analisi storica, bibliografica e archivistica** per reperire tutte le informazioni necessarie alla descrizione del sito analizzato.
3. **Caratterizzazione del sito**, corredata di adeguata documentazione fotografica e delle planimetrie degli edifici scelti.
4. **Individuazione di casi studio** ritenuti maggiormente significativi sia in considerazione del valore storico-artistico che dal punto di vista energetico, al fine di trattare tipologie di edifici peculiari, scelti anche in base alla possibilità di reperire tutte le informazioni necessarie per lo studio.
5. **Descrizione delle caratteristiche costruttive, impiantistiche** e di tutti gli elementi utili per un'analisi energetica approfondita: sarà fornito, ad esempio, un abaco dei componenti opachi e di quelli trasparenti con le proprietà termofisiche ipotizzate o rilevate.
6. **Risultati delle indagini in situ**, quali documentazione fotografica, indagine termografica. Tale indagine consentirà di individuare qualitativamente la presenza di ponti termici e discontinuità murarie che potrebbero influire sulla prestazione termica dell'involucro edilizio. Inoltre, potrà essere utile alla definizione delle epoche di costruzione e delle stratigrafie storiche degli edifici. Le prove saranno svolte a seguito della verifica di sussistenza di condizioni al contorno che permettano il conseguimento di risultati attendibili, come per esempio condizioni idonee di temperatura interna ed esterna. Al fine di caratterizzare adeguatamente l'involucro edilizio, saranno anche eventualmente utilizzate altre tecniche di misurazione, come ad esempio, nel caso ci sia la possibilità, l'utilizzo della termoflussimetria, utile a valutare la trasmittanza termica delle tipologie costruttive maggiormente significative di chiusure opache confinanti con l'esterno. Qualora si effettuassero studi su specifici ambienti, perché ritenuto opportuno, saranno riportati i risultati delle misure condotte a supporto dello studio per la caratterizzazione dei componenti di involucro nonché i parametri microclimatici acquisiti per una più accurata disamina delle effettive condizioni interne e del profilo di utilizzo degli ambienti e degli impianti presenti.
7. **Analisi delle bollette energetiche** e di tutto ciò che concorre alla stima dei consumi reali.
8. A corollario dell'attività saranno presentati una **panoramica e uno studio bibliografico di potenziali interventi** di efficientamento energetico riguardanti tecnologie di involucro e di impianto compatibili con il carattere storico e i vincoli degli edifici studiati e del sito in cui si collocano e che siano attuabili nel rispetto dell'integrità del bene e dei principi fondamentali del restauro.
9. Nel caso venissero condotte **indagini esplorative per lo studio della fattibilità di integrazione con fonti energetiche rinnovabili**, si prevede di riportarne i risultati preliminari.
10. Tutte le attività saranno descritte nel **report conclusivo**, che, oltre ad una parte introduttiva e metodologica, presenterà la descrizione e le analisi di dettaglio per ciascun caso studio.

## 2 Risultati ottenuti

1. **Disamina introduttiva su “Gli edifici storici e l’efficienza energetica”:** il Cap. 2 dell’Allegato LA1.4 - Report esteso descrive lo stato dell’arte del patrimonio storico costruito in Italia, l’inquadramento normativo, le criticità e le potenzialità che si riscontrano nei processi di riqualificazione energetica a seconda dei contesti in cui ci si trova, riportando la situazione italiana attuale e ciò che è stato implementato a riguardo.
2. **Analisi storica, bibliografica e archivistica:** il Cap. 3 dell’Allegato LA1.4 - Report esteso riporta una descrizione del contesto di applicazione della ricerca, ossia il Parco Archeologico dell’Appia Antica comprensivo di
  - un approfondimento sugli strumenti normativi e urbanistici;
  - un inquadramento geologico, geomorfologico e idrogeologico,
  - una ricerca bibliografica, storica e archivistica, oltre che documentale.In aggiunta sono state condotte analisi storiche, bibliografiche e documentali sui singoli complessi di edifici analizzati riportando per ciascuno gli aspetti salienti (cfr. Parr. 6.1, 7.1, 8.1, 9.1 dell’Allegato).
3. **Caratterizzazione del sito:** come evidenziato al punto 2, il Cap. 3 dell’Allegato LA1.4 - Report esteso riporta un inquadramento urbanistico, geologico, geomorfologico e idrogeologico del sito. Inoltre, per ciascun complesso di edifici analizzato sono riportate le descrizioni generali, alcuni dati dimensionali utili e le distribuzioni funzionali (cfr. Parr. 6.2, 7.2, 8.2, 9.2 dell’Allegato). Le tavole grafiche redatte con le planimetrie rielaborate in fase di sopralluogo sono invece riportate nell’Appendice 4 “Elaborati grafici”.
4. **Individuazione di casi studio:** Sono stati individuati i quattro casi studio (due in più rispetto a quanto dichiarato nella descrizione delle attività) ritenuti maggiormente significativi all’interno del Parco Archeologico dell’Appia Antica. I quattro complessi di edifici analizzati (Capo di Bove, Santa Maria Nova, Villa dei Quintili, Villa di Sette Bassi) risultano peculiari per il particolare pregio storico e artistico, oltre che dal punto di vista distributivo-funzionale, tecnologico ed energetico e offrono la possibilità di analizzare una casistica ampia di destinazioni d’uso (museali, di accoglienza, di ufficio) che li rende interessanti nell’intero panorama italiano. Essi possono rappresentare dei casi pilota replicabili e l’approccio metodologico adottato è generalizzabile all’intero contesto del patrimonio storico. Le motivazioni dettagliate della scelta sono riportate nel Cap. 4 dell’Allegato LA1.4 - Report esteso, mentre la descrizione dell’approccio metodologico utilizzato viene mostrata nel Cap. 5 e, in particolare, nel par. 5.1. Infine, ad ogni complesso di edifici è stata dedicata una sezione specifica dell’Allegato, coincidente con i rispettivi capitoli: Capo di Bove, Cap. 6; Santa Maria Nova, Cap. 7; Villa dei Quintili, Cap. 8; Villa di Sette Bassi, Cap. 9.
5. **Descrizione delle caratteristiche costruttive, impiantistiche:**

Per ciascun edificio analizzato sono state ottenute:

- Caratterizzazione termofisica dell’involucro edilizio opaco di tutti gli edifici di ognuno dei complessi analizzati con le ipotesi di stratigrafie dei componenti opachi verticali e orizzontali. Nell’Allegato LA1.4 - Report esteso si vedano: Parr. 6.5.1.1 e 6.5.2.1 per gli edifici di Capo di Bove; Parr. 7.5.1.1 e 7.5.2.1 per gli edifici di Santa Maria Nova; Parr. 8.5.1.1 per Villa dei Quintili; Parr. 9.5.1.1 per Villa di Sette Bassi.
- Caratterizzazione dei componenti trasparenti di involucro di tutti gli edifici di ognuno dei complessi analizzati e relativo abaco degli infissi. Nell’Allegato LA1.4 - Report esteso si vedano: Parr. 6.5.1.2 e 6.5.2.2 per gli edifici di Capo di Bove; Parr. 7.5.1.2 e 7.5.2.2 per gli edifici di Santa Maria Nova; Parr. 8.5.1.2 per Villa dei Quintili; Parr. 9.5.1.2 per Villa di Sette Bassi. Per l’abaco degli infissi si veda anche l’Appendice 3 “Abaco degli infissi”.

- Caratterizzazione dei sistemi impiantistici adibiti a riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, illuminazione e trasporto di cose e persone di tutti gli edifici per ognuno dei complessi analizzati. Nell'Allegato LA1.4 - Report esteso si vedano i paragrafi (e tutti i relativi sottoparagrafi) 6.6 per Capo di Bove, 7.6 per Santa Maria Nova, 8.6 per Villa dei Quintili, 9.6 per Villa di Settebassi. Si vedano, inoltre: l'appendice 4 "Elaborati grafici" che riporta il posizionamento in planimetria di generatori e terminali di emissione per riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria e delle lampade all'interno di ciascun ambiente degli edifici studiati; l'appendice 5 "Dati di inventario" che riporta invece le principali informazioni inerenti alle macchine rilevate per il riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, nonché le tipologie di lampade utilizzate all'interno di ciascun ambiente.

6. **Risultati delle indagini in situ:** Per tutti i complessi analizzati, durante i sopralluoghi, sono state eseguite indagini in situ che hanno permesso di approfondire la conoscenza sia delle tecniche costruttive che dei sistemi impiantistici adottati, oltre che dei parametri microclimatici caratteristici. Le tecniche di indagine impiegate sono descritte nel par. 5.2 nell'Allegato LA1.4 - Report esteso. Nelle sezioni apposite dello stesso documento sono riportati anche i risultati ad esse relative; in particolare, sono state effettuate:

- indagini termografiche (cfr. parr. 6.3, 7.3, 8.3, 9.3) per valutazioni preliminari sui comportamenti delle componenti opache verticali di involucro;
- indagini termoflussimetriche (cfr. parr. 6.4, 7.4, 8.4, 9.4), per misurare la trasmittanza termica in opera di componenti di involucro ritenuti significativi, in alcuni casi affiancate da video-ispezioni.

Tali indagini hanno contribuito alla caratterizzazione dell'involucro opaco.

In aggiunta sono state effettuate misure di temperatura e umidità relativa interne ed esterne per la valutazione delle condizioni microclimatiche negli ambienti ritenuti significativi (cfr. parr. 6.7, 7.7, 8.7, 9.7).

7. **Analisi dei consumi reali:** Per i fabbricati oggetto di indagine sono stati analizzati i reali consumi energetici ricavati dalla raccolta delle bollette di gas ed elettricità, fornite dall'Ente Parco, al fine di definire un consumo di riferimento (baseline). Tali analisi sono state effettuate rispetto ai dati climatici dell'area esaminata. Alcune premesse metodologiche sono riportate nel par. 5.3 dell'Allegato LA1.4 - Report esteso, mentre le valutazioni di dettaglio sono riportate per ciascun caso studio nei parr. 6.8, 7.8, 8.8, 9.8.

8. **Panoramica e studio bibliografico di potenziali interventi di efficientamento energetico:** Sono state effettuate alcune riflessioni preliminari per l'applicazione di strategie di intervento per ogni edificio appartenente ai complessi analizzati secondo le premesse riportate nel par. 5.4 dell'Allegato LA1.4 - Report esteso. Nel paragrafo specifico di ogni caso studio (cfr. parr. 6.9, 7.9, 8.9, e 9.9), sono indicate le misure di riqualificazione energetica potenziali, utili al miglioramento energetico di ogni edificio afferente a ciascun complesso, che saranno ulteriormente selezionate nella LA1.5. Per ognuno degli interventi proposti è stata predisposta una scheda di sintesi descrittiva delle particolarità e delle caratteristiche tecniche e realizzative della misura stessa, in relazione agli edifici storici in cui è prevista. Tutte le schede descrittive sono riportate nell'Appendice 6 "Schede di intervento".

9. **Indagini esplorative per l'integrazione con fonti energetiche rinnovabili:** Sono state effettuate alcune riflessioni preliminari per l'utilizzo di fonti rinnovabili sui singoli edifici e all'interno dei siti di appartenenza, come ad esempio l'applicazione del fotovoltaico (si vedano i parr. 6.9, 7.9, 8.9, e 9.9). Inoltre, il reperimento di documenti e dati di letteratura oltre che di relazioni tecniche, sia del territorio di Roma sia specifiche dei siti analizzati, ha permesso alcune considerazioni preliminari sull'utilizzo della risorsa geotermica a livello dell'intero sito (si veda il par. 10.3 e in particolare il sottoparagrafo 10.3.2).

10. **Report conclusivo:** oltre al presente Report, è stato redatto un Allegato LA1.4 - Report esteso con la descrizione dettagliata di tutte le attività svolte e dei risultati conseguiti, corredato di sei Appendici che completano il lavoro.

### 3 Prodotti attesi

1. Rapporto

### 4 Prodotti sviluppati

1. **Report conclusivo** (con risultati attesi e ottenuti, Prodotti attesi e ottenuti, Analisi degli scostamenti su attività e risultati, sintesi delle attività svolte, dettaglio delle attività svolte, contributo delle consulenze, pubblicazioni scientifiche e eventi di disseminazione).
2. **Allegato LA1.4 - Report esteso**, che, oltre ad una parte introduttiva e metodologica, presenta la descrizione e le analisi di dettaglio con i risultati ottenuti per ciascun caso studio e considerazioni finali e di sintesi sull'attività condotta.
3. **Appendice 1.** Fonti d'archivio.
4. **Appendice 2.** Indagini termografiche.
5. **Appendice 3.** Abaco degli infissi.
6. **Appendice 4.** Elaborati grafici.
7. **Appendice 5.** Dati di inventario.
8. **Appendice 6.** Schede di intervento.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

1. Le attività svolte non presentano alcuno scostamento rispetto agli obiettivi previsti e ai risultati raggiunti. Pertanto, non è stato necessario ricorrere al piano di rischio.
2. Le spese per le attrezzature di misura sono state effettuate regolarmente, in linea con quanto previsto.
3. Le spese per *dissemination* e relative missioni sono risultate minori rispetto alle previsioni, in quanto convegni sul tema e ulteriori articoli per conferenze e/o riviste saranno presentati a fine 2023 e nel 2024.
4. Ai fini dello svolgimento delle attività non sono state necessarie consulenze esterne a titolo oneroso. Dalle analisi condotte, si è evinto, in particolare, che le eventuali prove in situ per la valutazione della fattibilità di specifiche tecnologie rinnovabili, quali il *Ground Response Test*, non sono risultate necessarie per valutare l'installazione di sonde geotermiche: l'ipotesi di applicazione di sistemi di geoscambio a circuito chiuso (closed-loop) con l'utilizzo di sonde geotermiche verticali, infatti, si è rivelata non idonea in quanto le potenze richieste dagli impianti degli edifici analizzati sono limitate e i costi di installazione di tali tecnologie elevati. Grazie, invece, i dati presenti in letteratura, ad alcune campagne di rilevamento eseguite del corso degli anni e alle relazioni geologiche già in possesso dall'Ente Parco e fornite a titolo gratuito dall'Ente stesso, è possibile invece ipotizzare l'utilizzo di sistemi di geoscambio a circuito aperto (open-loop), su corpo idrico sotterraneo. Per le analisi in dettaglio si veda il Par. 10.3.2 dell'Allegato LA1.4 – Report esteso.

## 6 Sintesi delle attività svolte

La ricerca si è focalizzata sullo studio e la caratterizzazione di edifici storici vincolati di particolare pregio artistico, storico e architettonico, rappresentativi del patrimonio edilizio storico italiano. Quattro complessi nel Parco Archeologico dell'Appia Antica sono stati analizzati attraverso ricerche documentali, sopralluoghi, indagini diagnostiche sul campo (termografie e termoflussimetrie) per la caratterizzazione dell'involucro edilizio, campagne di monitoraggio di parametri microclimatici in ambienti significativi, caratterizzazione dei sistemi impiantistici, raccolta e analisi di bollette per la valutazione dei consumi reali, inventario delle principali apparecchiature energivore, relazioni geologiche. Dai risultati conseguiti è derivata una conoscenza completa dello stato attuale degli edifici che, insieme ad un'indagine preliminare di ipotesi di intervento, a livello bibliografico, costituirà la base per la successiva attività LA1.5.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Premessa

L'obiettivo ambizioso di raggiungere un alto livello di efficienza energetica in edifici storici, pur rispettando i principi fondamentali del restauro e i vincoli di tutela cui sono sottoposti, è estremamente difficile da raggiungere. L'Italia può vantare quasi tre milioni di beni vincolati e più di duecentomila beni stimati sotto le categorie "architettura" e "beni immobili"<sup>1</sup>. Il crescente interesse che ne deriva è testimoniato dalle numerose iniziative a livello europeo e italiano, come ad esempio il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)<sup>2</sup> e la *Renovation Wave*<sup>3</sup>, che mirano al raggiungimento di un parco edilizio decarbonizzato entro il 2050, così come progetti di ricerca internazionali, quali l'IEA-SHC Task 59<sup>4</sup>, focalizzato sulle potenzialità dell'energia solare nella riqualificazione energetica degli edifici storici.

Ogni edificio storico è unico ed è essenziale affrontare un processo *ad hoc* di miglioramento energetico, tenendo conto delle sue specificità al fine di garantire che il valore culturale del bene venga preservato pur raggiungendo un'elevata prestazione.

In tale contesto di straordinaria complessità, a partire dall'analisi dello stato di fatto di casi reali, l'obiettivo dell'attività di ricerca è stato lo studio e la caratterizzazione di complessi di edifici vincolati di particolare pregio storico e artistico. Si è deciso di applicare un approccio metodologico replicabile per l'intero patrimonio edilizio storico italiano, considerando casi rappresentativi del contesto nazionale, pur nel rispetto dell'unicità dei fabbricati. Le analisi conoscitive preliminari sono indispensabili per identificare successive soluzioni di miglioramento dell'efficienza energetica negli edifici storici, senza comprometterne il valore storico, artistico, culturale e paesaggistico.

### 7.2 Introduzione

Nella fase iniziale del lavoro, è stata condotta una ricerca bibliografica per un inquadramento critico sul tema "Edifici Storici ed Efficienza Energetica" (cfr. Cap. 2 – Allegato LA1.4 "Report esteso"), descrivendo le sfide ad esso associate. Il rispetto delle disposizioni di tutela del Codice dei Beni culturali e del Paesaggio<sup>5</sup>, può infatti, compromettere e disincentivare tale processo; uno degli aspetti cruciali è dato dalla necessità di applicare metodi di indagine *ad hoc* per ogni edificio, considerando dati reali per la caratterizzazione termofisica ed impiantistica e per la stima dei consumi.

Dopo aver acquisito una conoscenza approfondita dello stato di fatto degli edifici, è necessario adottare un approccio flessibile e multidisciplinare e valutare non soltanto l'applicabilità di soluzioni standard e consolidate, che in questi casi potrebbero alterare il valore del bene, ma anche esplorare soluzioni innovative al fine di raggiungere un equilibrio tra l'esigenza di elevata prestazione energetica e la necessità di mantenere intatto il valore storico, nel rispetto dei principi del restauro (riconoscibilità, reversibilità, compatibilità, minimo intervento e interdisciplinarietà). La conservazione del passato deve integrarsi con l'innovazione del presente per creare un futuro in cui l'efficienza energetica e la valorizzazione del patrimonio edilizio procedano di pari passo.

---

<sup>1</sup> Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro, Ministero della Cultura, Progetto Vincoli in Rete <http://vincoliinrete.beniculturali.it/VincoliInRete/vir/utente/login>

<sup>2</sup> Piano nazionale di ripresa e resilienza – PNRR; <https://www.italiadomani.gov.it/content/sogei-ng/it/it/home.html>

<sup>3</sup> Commissione Europea, *Renovation wave*, [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en)

<sup>4</sup> International Energy Agency (IEA), Solar Heating and Cooling programme (SHC), IEA SHC Task 59: "Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy", Settembre 2017 - Febbraio 2021, <https://task59.iea-shc.org/>

<sup>5</sup> D. Lgs. 22 gennaio 2004, n.42. Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137.

### 7.3 Scelta dei casi studio, motivazioni e approccio metodologico

I complessi di edifici analizzati di Capo di Bove, Santa Maria Nova, Villa dei Quintili e Villa di Sette Bassi (Figura 1), comprensivi sia degli edifici principali sia di tutte le pertinenze e gli edifici minori ad essi annessi, sono situati all'interno del Parco Archeologico dell'Appia Antica a Roma, l'area periurbana protetta più importante della Regione Lazio (cfr. Cap. 3 - Report esteso).



Figura 1. I casi studio analizzati nel Parco Archeologico dell'Appia Antica.

Le motivazioni principali che hanno condotto alla scelta dei casi studio sono così riassumibili (cfr. Cap. 4 - Report esteso):

- Tutti gli edifici sono il risultato di una complessa stratificazione storica avvenuta nel corso di differenti epoche, condizione questa molto diffusa nel patrimonio edilizio storico italiano.
- La varietà delle destinazioni d'uso cui essi sono adibiti (uffici, sedi museali, spazi di accoglienza e di servizio) offrono la possibilità di ampliare l'analisi e renderla generalizzabile.
- L'appartenenza ad un contesto vincolato più esteso, come il Parco Archeologico, offre un'opportunità unica per valutare diverse strategie di intervento e considerare la possibilità di installare sistemi avanzati di produzione di energia da fonti rinnovabili, a servizio sia dell'edificio singolo che del sito.

Tali motivazioni rendono lo studio significativo e replicabile nel panorama italiano, fatta salva la specificità di ogni contesto.

Ai fini dell'analisi, è stato utilizzato un approccio metodologico pratico-applicativo (Figura 2) finalizzato ad acquisire tutte le informazioni utili alla caratterizzazione termofisica degli edifici, spesso di non facile valutazione in casi di studio reali di carattere storico (Cfr. Cap. 5 - Report esteso).



Figura 2. Schematizzazione della metodologia applicata.

I diversi edifici sono stati analizzati attraverso ricerche documentali e archivistiche, rilievi e sopralluoghi, indagini diagnostiche sul campo (termografie e termoflussimetrie) finalizzate alla caratterizzazione dell'involucro, raccolta dati per la descrizione delle tipologie impiantistiche presenti, campagne di monitoraggio di parametri microclimatici in ambienti significativi, raccolta e analisi di bollette per la valutazione dei consumi reali, inventario delle principali apparecchiature che consumano energia, consultazioni di relazioni idrogeologiche. Il tutto è dettagliatamente descritto nel Report esteso e nelle Appendici correlate. Ciò ha permesso di ottenere una fotografia dello stato di fatto degli edifici, tappa

fondamentale nel processo di “restauro energetico”, senza limitarsi al singolo fabbricato ma con una visione agli interi complessi, cogliendo l’opportunità di lavorare in un contesto “aperto” a prospettive future di riqualificazione.

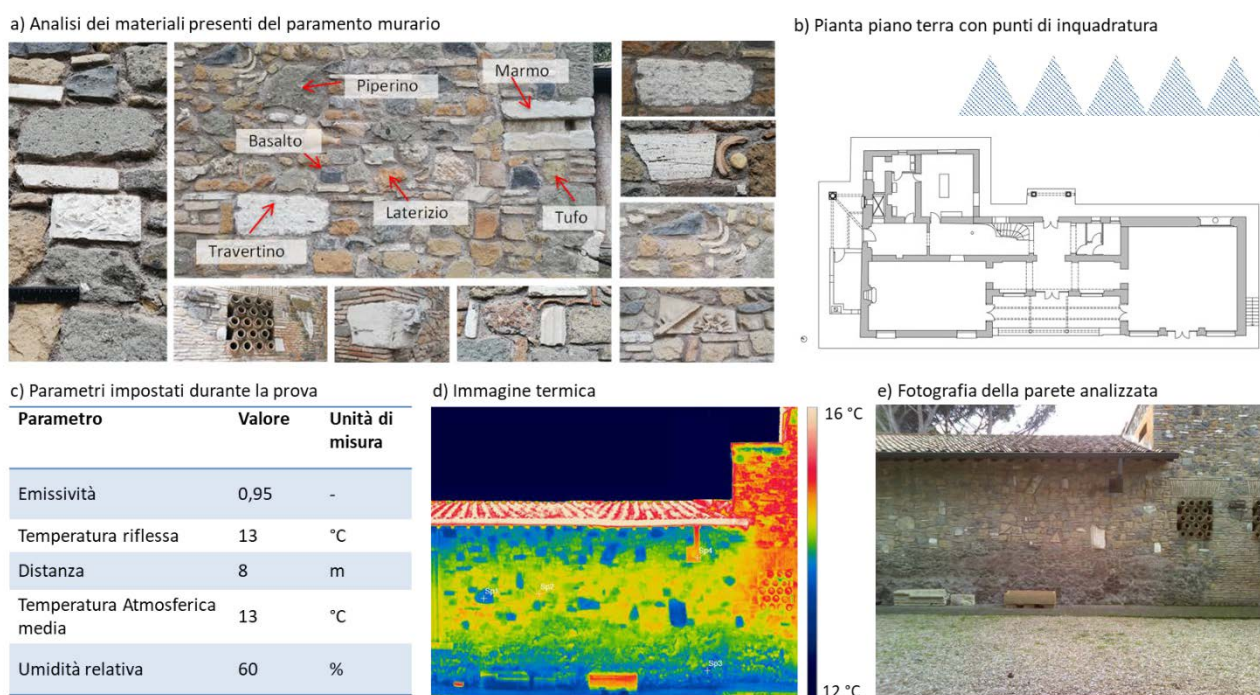
I risultati ottenuti, insieme ad alcune riflessioni preliminari su potenziali interventi, sono propedeutici all’attività successiva (LA1.5), che comprenderà la valutazione delle prestazioni energetiche sia attuali sia conseguenti ad ipotesi di differenti scenari di intervento.

### 7.4 Indagini diagnostiche sperimentali

Per tutti i casi studio, l’analisi storica (cfr. Parr. 6.1, 7.1, 8.1, 9.1 del Report esteso) ha permesso di evidenziare le diverse fasi costruttive e le trasformazioni subite dagli edifici nel tempo, aspetti fondamentali per formulare ipotesi di caratterizzazione termofisica degli edifici.

I numerosi sopralluoghi condotti in loco hanno rappresentato il punto cardine del lavoro e hanno permesso non soltanto di analizzare le caratteristiche dimensionali degli edifici e raccogliere materiale fotografico, ma anche di verificare la sussistenza di condizioni idonee allo svolgimento delle indagini sperimentali.

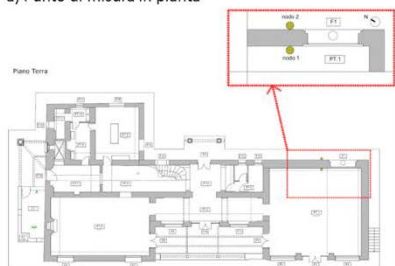
Per ogni caso studio, è stata condotta un’indagine termografica sulle componenti verticali opache dell’edificio (cfr. Parr. 6.3, 7.3, 8.3, 9.3 del Report esteso). Essa ha permesso di identificare in modo qualitativo la presenza di punti critici, come ponti termici e discontinuità murarie, elementi che influiscono significativamente sulle prestazioni termiche dell’involucro edilizio. Inoltre, ha fornito spunti interessanti per una migliore comprensione delle stratigrafie storiche dei componenti di involucro e dei materiali utilizzati (Figura 3).



**Figura 3. Esempio di indagine termografica sul casale di Capo di Bove.**

Le ispezioni preliminari hanno, inoltre, permesso di avviare alcune campagne di misura con l’utilizzo di termoflussimetri (cfr. Parr. 6.4, 7.4, 8.4, 9.4 - Report esteso), nel tentativo di quantificare le dispersioni termiche attraverso l’involucro edilizio e calcolare la trasmittanza termica delle tipologie costruttive indagate con il metodo della media progressiva (Figura 4).

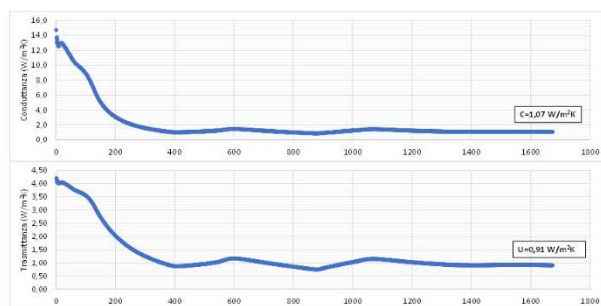
a) Punto di misura in pianta



b) Documentazione fotografica della applicazione dello strumento di misura



c) Andamento della conduttanza e della trasmittanza termica nella parete indagata



d) Ipotesi di stratigrafia della parete indagata

N. strato	Materiale	Spessore (m)	Conducibilità termica (W/mK)	Resistenza termica (m²K/W)
1	Intonaco	0,02	0,70	0,029
2	Mattone forato	0,08	0,29	0,273
3	Intercapedine d'aria	0,05	-	0,180
4	Muratura in tufo/mista	0,69	1,50±0,63	0,460±1,095

Figura 4. Esempio di campagna sperimentale condotta con termoflussimetro su una muratura esterna di Capo di Bove.

## 7.5 Caratterizzazione termofisica di involucro e impianti

Le indagini descritte, assieme ad alcune video-ispezioni autorizzate dall'Ente Parco, hanno permesso la caratterizzazione delle stratigrafie dei principali componenti di involucro. Laddove non è stato possibile dedurre tali informazioni dalle campagne sperimentali sono state effettuate alcune ipotesi coerenti con le notizie storiche sulle tecniche costruttive e con i dati di letteratura.

Caratteristica comune a tutti i complessi è l'elevata inerzia delle componenti opache verticali. Alcune tipologie costruttive, come quelle degli edifici principali di Capo di Bove e Santa Maria Nova sorti su antiche cisterne romane, sono il risultato dell'evoluzione storica dei singoli fabbricati; altre, come quelle dell'Antiquarium di Villa dei Quintili, della dependance di Santa Maria Nova o di Villa Sette Bassi, sono, invece, il frutto di recenti trasformazioni che hanno introdotto nuovi elementi costruttivi e impiantistici. I materiali maggiormente impiegati nelle murature sono il tufo e il laterizio con spessori variabili. Le coperture sono piane o a falda, in materiali misti (es. legno e laterizio) e risultano prive di isolamento e spesso di non facile caratterizzazione.

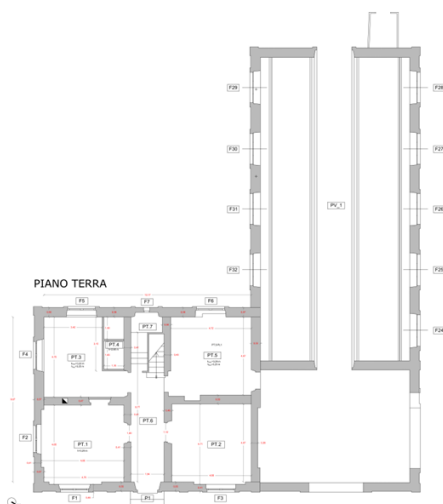
Per l'involucro trasparente, invece, gli edifici sono dotati di tipologie varie di infissi, per lo più con caratteristiche termiche non conformi agli attuali standard. Per le ipotesi dettagliate di caratterizzazione di involucro (esempi in Figura 5 e Figura 6) si vedano i parr. 6.5, 7.5, 8.5, 9.5 del Report esteso e l'Appendice 3, fatti salvi margini di incertezza che richiederanno ulteriori approfondimenti nelle prossime fasi (LA1.5).



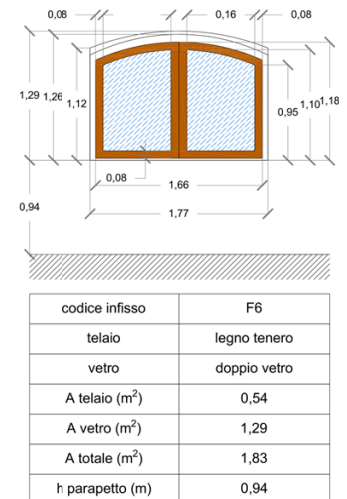
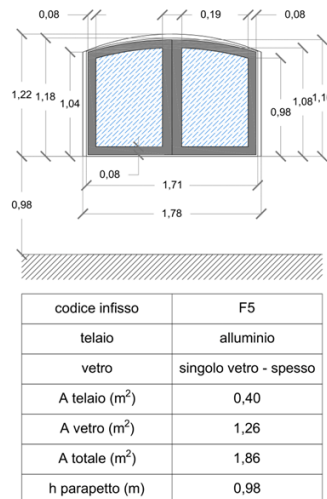
Strato	Descrizione	Spessore (m)	Conduttività (W/mK)	Resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	Densità (Kg/m <sup>3</sup> )	Massa superficiale (Kg/m <sup>2</sup> )	Calore specifico (J/KgK)
	Rsi			0,130			
1	Intonaco interno	0,03	0,70	0,043	1400	42	1000
2	Muratura in tufo	0,40	0,63-1,70	0,635-0,259	1500-2300	600-920	1000
3	Intonaco esterno	0,03	0,70	0,043	1400	42	1000
	Rse			0,04			

**Figura 5. Esempio di caratterizzazione di una delle murature di Villa di Sette Bassi con documentazione fotografica della video-ispezione effettuata.**

a) Pianta con codici degli infissi



b) Esempi di abaco degli infissi



**Figura 6. Esempio di caratterizzazione di involucro trasparente tratto dall'Abaco degli infissi (Appendice 3) di Villa di Sette Bassi.**

La caratterizzazione dei sistemi impiantistici è stata realizzata attraverso un'accurata raccolta di dati relativi a tutti i servizi presenti (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, illuminazione, trasporto di persone e cose). In Figura 7 si riporta, a titolo di esempio, un quadro di sintesi delle caratteristiche dei principali generatori installati in Villa dei Quintili; Per le caratteristiche dettagliate si vedano per completezza i parr. 6.6, 7.6, 8.6, 9.6 del Report esteso e le Appendici 4 e 5.

Nella maggior parte degli edifici i servizi di riscaldamento e raffrescamento utilizzano generatori a pompa di calore, ad esclusione di Villa dei Quintili, dotata anche di una caldaia a gas per il riscaldamento. Nell'edificio principale di Capo di Bove la pompa di calore alimenta anche due unità di trattamento dell'aria (portate fino a 2000 m<sup>3</sup>/h) per la climatizzazione della sala espositiva e della sala conferenze. I terminali di emissione più diffusi sono del tipo radiatori e ventilconvettori. Soltanto nel complesso di Santa Maria Nova è presente un sistema a pavimento radiante nell'ala espositiva di ingresso del casale e al piano terra della dependance (dove non risulta funzionante).



Riscaldamento		
Caldaia tradizionale RIELLO RTQ 115 3S	Potenza al focolare max.	115 kW
	Potenza al focolare min.	90 kW
	Potenza termica utile max 80°-60° C	109,7 kW
	Potenza termica utile min 80°-60° C	86,6 kW
	Rendimento 80°-60° C a P.max.	95,8 %
	Rendimento 80°-60° C a P.min.	96,2 %
	Rendimento utile 30%	99,7 %
Riscaldamento		
PdC Ferroli-U.E. Diamant 27-3	Capacità termica	8,21 kW
	Potenza assorbita	2,10 kW
PdC Mitsubishi SCM80ZF-S	Capacità termica	9,30 kW
	Potenza assorbita	2,43 kW
Raffrescamento		
PdC Ferroli-U.E. Diamant 27-3	Capacità termica	7,92 kW
	Potenza assorbita	2,45 kW
PdC Mitsubishi Air Conditioner, Split Type - Modello SCM80ZF-S	Capacità termica	8,00 kW
	Potenza assorbita	2,38 kW
Acqua Calda Sanitaria		
Boiler elettrico Andris	Potenza assorbita	1,5 kW
	Capacità	30 l
Boiler elettrico Perla	Potenza assorbita	1,2 kW
	Capacità	75 l

**Figura 7. Esempio di Quadro di sintesi con le caratteristiche dei principali sistemi di generazione per i servizi di riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria nel complesso di Villa dei Quintili.**

L'utilizzo degli impianti risulta discontinuo in tutti i casi (escluso il casale principale di Santa Maria Nova adibito a museo): l'accensione e lo spegnimento sono spesso condizionati dagli orari lavorativi e dalle esigenze dei dipendenti che in alcuni casi possono avere accesso ai quadri di gestione degli impianti (ad es. delle U.T.A. di Capo di Bove o delle pompe di calore a piano terra di Villa di Sette Bassi). In altri casi invece gli orari di utilizzo, impostati stagionalmente, non risultano idonei alle esigenze degli utilizzatori (ad es. nel caso di Villa dei Quintili). I risultati dei monitoraggi effettuati sui principali parametri microclimatici (umidità relativa e temperatura) hanno confermato tali criticità (cfr. parr. 6.7,7.7,8.7,9.7 - Report esteso).

Laddove presente, la produzione di acqua calda è garantita da boiler elettrici di piccole dimensioni, di potenza di 1200÷1500 W, a servizio dei bagni.

Per l'illuminazione, nonostante la sostituzione dei corpi meno efficienti con sistemi a LED, si è riscontrata ancora la presenza di tipologie di lampade a maggior consumo energetico (fluorescenti, alogene, ecc.).

Gli unici edifici dotati di impianti per il trasporto di cose e persone sono il casale di Capo di Bove e il casale di Santa Maria Nova. Tali sistemi risultano, tuttavia, quasi inutilizzati e non influiscono in maniera significativa sui consumi degli edifici.

## 7.6 Analisi dei consumi reali

La raccolta e l'analisi delle bollette energetiche hanno reso possibile una stima dei reali consumi energetici. Tutti gli edifici utilizzano un unico vettore energetico (energia elettrica), ad eccezione di Villa dei Quintili per la quale si fa uso anche del metano. I consumi di gas sono stati esaminati a partire dalle bollette degli anni 2021, 2022 e dei periodi ottobre-dicembre 2020 e gennaio-aprile 2023. I consumi elettrici sono stati esaminati a partire dalle bollette degli anni 2020, 2021 e 2022.

A titolo d'esempio delle analisi condotte (dettagliate nei parr. 5.3, 6.8, 7.8, 8.8, 9.8 e 10.2 dell'Report esteso) si riportano in Tabella 1 i consumi medi di gas, elettricità ed energia primaria.

**Tabella 1. Consumi medi di energia elettrica, gas ed energia primaria dei complessi oggetto di indagine**

Complesso di edifici	Consumo elettricità (kWh)	Consumo di gas (m <sup>3</sup> )	Consumo energia primaria (kWh)
Capo di Bove	77.681	-	190.730
Santa Maria Nova	44.806	-	100.737
Villa dei Quintili	45.483	7.405	180.755
Villa di Sette Bassi	6.910	-	17.514

### 7.7 Riflessioni preliminari per il miglioramento della prestazione energetica

A conclusione del lavoro, in via del tutto preliminare è stato condotto uno studio sui principali interventi applicabili agli edifici storici e ai complessi analizzati (cfr. parr. 5.4, 6.9, 7.9, 8.9, 9.9, 10.3 del Report esteso e Appendice 6). A titolo esemplificativo, in Tabella 2 sono riassunti alcuni dei possibili interventi relativi al Complesso di Santa Maria Nova.

**Tabella 2. Strategie potenziali di miglioramento dell'efficienza energetica del complesso di Santa Maria Nova**

Tipologia intervento	Codice scheda	Edifici interessati
<b>Involucro opaco</b>	-	-
Coibentazione estradosso copertura a falda	INO1	Casale e Dependance
Coibentazione del solaio di terra	INO4	Dependance
Mitigazione dell'umidità di risalita	INO7	Dependance
<b>Involucro trasparente</b>	-	-
Sostituzione infissi	INT1	Dependance
Inserimento vetri ad alte prestazioni (basso-emissivi/selettivi) su telaio esistente	INT2	Casale
<b>Impianto meccanico</b>	-	-
Installazione pompa di calore aria-acqua più efficiente	MEC1	Casale e Dependance
Installazione sistema geotermico a pompa di calore	MEC3	Casale e Dependance
Installazione scaldacqua a pompa di calore	MEC4	Casale
<b>Impianto elettrico</b>	-	-
Installazione corpi illuminanti a led	ELE1	Casale e Dependance
<b>Sistemi di automazione e controllo</b>	-	-
Installazione di sensori di presenza	BAC1	Casale
Installazione sistemi di termoregolazione per singolo ambiente	BAC2	Casale e Dependance
Suddivisione in zone termiche	BAC3	Casale e Dependance
Installazione di sistema di supervisione e controllo	BAC4	Casale e Dependance
<b>Impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile</b>	-	-
Installazione di fotovoltaico integrato	FER2	Area archeologica
Installazione di pensiline fotovoltaiche	FER3	Area esterna
Installazione di lampioni o altri sistemi di illuminazione fotovoltaici	FER4	Parco archeologico

Tali strategie saranno ulteriormente selezionate nelle fasi successive (LA1.5), scegliendo interventi meno invasivi possibile per migliorare le prestazioni e la gestione degli edifici stessi nel rispetto delle peculiarità del bene. Inoltre, un'attenzione particolare sarà rivolta all'introduzione delle fonti rinnovabili per la produzione di energia. A tal proposito, a conclusione dell'attività, sono state effettuate alcune considerazioni preliminari sulla possibilità di utilizzo della risorsa geotermica. Pensare alla geotermia in un contesto così complesso come quello di un parco archeologico potrebbe porre numerosi interrogativi. Tuttavia, l'insieme delle

informazioni acquisite durante l'analisi consente di ipotizzare che, plausibilmente, nel sito oggetto di indagini potrebbero essere presenti uno o più acquiferi di buona qualità, sia dal punto di vista idrodinamico sia in termini di portata e temperatura. Sussistono pertanto le premesse necessarie per un approfondimento successivo, ai fini dell'utilizzo della risorsa geotermica a bassa entalpia per la climatizzazione degli edifici studiati.

### **7.8 Conclusioni**

La ricerca getta le basi per un'analisi completa delle prestazioni energetiche dei casi studiati che sarà oggetto della LA1.5. I risultati ottenuti rappresentano una solida base su cui sviluppare scenari di intervento a livello di edifici e di sito per il miglioramento delle prestazioni energetiche, nel rispetto dei vincoli di tutela. Il lavoro condotto rappresenta un primo contributo nel delineare un approccio capace di bilanciare le esigenze dell'efficienza energetica con quelle di salvaguardia del patrimonio architettonico.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Ai fini dello svolgimento delle attività non sono state necessarie consulenze esterne a titolo oneroso.

Le eventuali prove in situ, citate in proposta, per la valutazione della fattibilità di specifiche tecnologie rinnovabili, quali il *Ground Response Test*, si sono rivelate non necessarie in fase di analisi in quanto le basse potenze dei sistemi impiantistici utilizzati negli edifici e gli elevati costi di realizzazione delle sonde geotermiche verticali non rendono valida l'ipotesi di applicazione di sistemi di geoscambio a circuito chiuso (closed-loop).

Sono state, invece, effettuate delle valutazioni a partire da campagne di rilevamento eseguite del corso degli anni, dati presenti in letteratura e relazioni geologiche già in possesso dell'Ente Parco e fornite a titolo gratuito dallo stesso. Dato l'assetto idrogeologico del territorio del Parco e la presenza di vari pozzi idrici, si è pensato quindi di approfondire l'utilizzo di sistemi di geoscambio a circuito aperto (open-loop), su corpo idrico sotterraneo. L'insieme delle informazioni acquisite, infatti, consente di ipotizzare che, plausibilmente, nel sito oggetto di indagini potrebbero essere presenti uno o più acquiferi di buona qualità, sia dal punto di vista idrodinamico sia in termini di portata e di temperatura. Per le analisi in dettaglio si veda il Par. 10.3.2 dell'Allegato LA1.4 – Report esteso.

Il supporto da parte dell'Ente Parco si è rivelato, infine, fondamentale per l'ottenimento delle autorizzazioni necessarie ai sopralluoghi e alle indagini diagnostiche in situ e alle campagne di monitoraggio, oltre che nella raccolta della documentazione necessaria allo svolgimento delle attività, quale:

- planimetrie ed elaborati tecnici,
- relazioni tecniche,
- relazioni geologiche,
- documenti di vincolo,
- documenti archivistici e bibliografici,
- bollette energetiche (gas ed elettricità).

## 9 Pubblicazioni scientifiche

1. N. Calabrese, F. Caffari, F. Giustini, M. Morini, S. Di Turi, “Linee di indirizzo per il miglioramento dell’efficienza energetica nel Parco Archeologico dell’Appia Antica”, Dipartimento Unità Efficienza Energetica, Laboratorio efficienza energetica negli Edifici e Sviluppo Urbano (DUJEE-SPS-ESU) – ENEA, Dicembre 2022.
2. S. Di Turi, N. Calabrese, F. Caffari, G. Centi, F. Giustini, F. Margiotta, D. Palladino, L. Ronchetti, P. Signoretti, L. Volpe. Con il contributo di: M. Reginaldi, F. Volpe, Poster “Efficienza energetica negli edifici storici”. Casi studio nel Parco archeologico dell’Appia Antica” elaborato per il Workshop “Ricerca, sviluppo e applicazioni per i Beni Culturali. Dai risultati del progetto VADUS alle future collaborazioni”, ente organizzatore ENEA - Centro Ricerche Frascati - Aula Brunelli 9 - 10 maggio 2023.
3. Calabrese N., Caffari F., “La riqualificazione energetica degli edifici storici del Parco Archeologico dell’Appia Antica: linee di indirizzo e proposte di efficientamento energetico”. Atti del 39° Convegno Nazionale AiCARR “Riqualificazione energetica del patrimonio edilizio: soluzioni tecniche e finanziarie”, Milano, 2023.
4. S. Di Turi, F. Caffari, G. Centi, F. Margiotta, D. Palladino, L. Ronchetti, P. Signoretti, L. Volpe, “Efficienza energetica in edifici storici e vincolati”. Contributo in: ENEA, Rapporto Annuale Efficienza Energetica - Capitolo 5 “Efficienza energetica negli edifici”, Dicembre 2023.

## 10 Eventi di disseminazione

1. Workshop “Ricerca, sviluppo e applicazioni per i Beni Culturali. Dai risultati del progetto VADUS alle future collaborazioni”, ente organizzatore ENEA - Centro Ricerche Frascati - Aula Brunelli 9 - 10 maggio 2023. Intervento dal titolo “Efficienza energetica negli edifici storici. Casi studio nel Parco archeologico dell'Appia Antica”. Relatore: Silvia Di Turi.
2. 39° Convegno Nazionale AiCARR “Riqualificazione energetica del patrimonio edilizio: soluzioni tecniche e finanziarie”, Centro Congressi Federico II, Napoli, 8 settembre 2023. Intervento dal titolo: “La riqualificazione energetica degli edifici storici del Parco Archeologico dell’Appia Antica: linee di indirizzo e proposte di efficientamento energetico”. Relatori: Nicolandrea Calabrese, Francesca Caffari.
3. Organizzazione del convegno “Progettare la riqualificazione energetica degli edifici storici”, 19 Ottobre 2023, Fiera delle Costruzioni SAIE, Bari con i seguenti interventi sull’attività specifica LA 1.4:
  - a. Linee di indirizzo per il miglioramento dell’efficienza energetica degli edifici nel Parco Archeologico dell’Appia Antica. Relatore: Francesca Caffari.
  - b. Indagini non distruttive: uso della termografia nelle diagnosi energetiche degli edifici. Relatore: Silvia Di Turi.
  - c. Indagini non distruttive: uso della termoflussimetria per la misura della trasmittanza termica in edilizia. Relatore: Domenico Palladino.
  - d. Strategie di intervento in edifici storici vincolati. Relatore: Giulia Centi.