

# Ricerca di Sistema elettrico



Efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati: analisi energetiche dei casi studio e valutazione degli interventi (LA1.5)

Silvia Di Turi, Domenico Palladino, Giovanni Murano, Giulia Centi,  
Laura Ronchetti, Paolo Signoretti, Riccardo Basile

## Efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati: analisi energetiche dei casi studio e valutazione degli interventi (LA1.5)

S. Di Turi, D. Palladino, R. Basile, G. Centi, G. Murano, L. Ronchetti, P. Signoretti (ENEA)

Con il contributo di: S. Quilici, M. Reginaldi, F. Volpe - PAAA

N. Calabrese, F. Caffari, F. Margiotta, L. Volpe - ENEA

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

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

Linea di attività: 1.5

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Domenico Iatauro, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: Luglio 2023

Mese inizio effettivo: Luglio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

## INDICE

1	Risultati attesi .....	5
2	Risultati ottenuti .....	6
3	Prodotti attesi.....	8
4	Prodotti sviluppati.....	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati .....	10
6	Sintesi delle attività svolte .....	11
7	Dettaglio delle attività svolte .....	12
7.1	Introduzione.....	12
7.2	Approccio metodologico .....	12
7.3	Gli inventari energetici.....	13
7.4	Costruzione dei modelli di simulazione energetica .....	14
7.5	Validazione dei modelli .....	17
7.6	Risultati delle analisi energetiche, scelta degli interventi di riqualificazione e risparmi energetici attesi .....	17
7.7	Stime economiche .....	20
7.8	Installazione di sistemi di produzione da FER a livello di sito .....	21
7.9	Conclusioni e potenziale di risparmio energetico.....	24
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte .....	25
9	Pubblicazioni scientifiche .....	26
10	Eventi di disseminazione.....	27

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Schematizzazione della metodologia applicata .....	12
Figura 2 –Esempio di ripartizione dei consumi elettrici(caso di studio del complesso di Santa Maria Nova).....	13
Figura 3 – Esempio di costruzione dei modelli di simulazione energetica e di definizione dei componenti di involucro e di impianto (Villa dei Quintili).....	15
Figura 4 – Esempio di profili orari e relativi apporti termici interni implementati nei modelli di simulazione (Villa dei Quintili).....	16
Figura 5– Prestazioni energetiche per il complesso di Santa Maria Nova in condizioni climatiche standard: grafico riassuntivo con i risultati in termini di energia primaria totale pre- e post-intervento e risparmi energetici conseguiti in caso di interventi singoli (tinta unita) e scenari combinati (tratteggio).....	18
Figura 6 – Prestazioni energetiche per il complesso di Villa dei Quintili(Casale e Antiquarium)in condizioni climatiche standard: grafico riassuntivo con i risultati in termini di energia primaria totale pre- e post-intervento e risparmi energetici conseguiti in caso di interventi singoli (tinta unita) e scenari combinati (tratteggio).....	19
Figura 7 – Prestazioni energetiche per il caso di Villa di Sette Bassi (casale e vaccheria con ripristino delle condizioni di utilizzo)in condizioni climatiche standard: grafico riassuntivo con i risultati in termini di energia primaria totale pre- e post-intervento e risparmi energetici conseguiti in caso di interventi singoli (tinta unita) e scenari combinati (tratteggio).....	19
Figura 8 –Stime economiche per il caso di studio di Santa Maria Nova: grafico riassuntivo con costi di investimento, risparmi economici e tempi di ritorno semplici (in verde) per ciascun intervento (tinta unita) e scenario di intervento (tratteggio).....	20
Figura 9 –Stime economiche per il caso di studio di Villa dei Quintili (Casale e Antiquarium): grafico riassuntivo con costi di investimento, risparmi economici e tempi di ritorno semplici (in verde) per ciascun intervento (tinta unita) e scenario di intervento (tratteggio).....	21
Figura 10 – Stime economiche per il caso di studio di Villa di Sette Bassi (con il ripristino delle condizioni di utilizzo): grafico riassuntivo con costi di investimento, risparmi economici e tempi di ritorno semplici (numeri in verde) per ciascun intervento e scenario di intervento....	21
Figura 11 – Ipotesi di installazione di moduli fotovoltaici colorati nel sito di Santa Maria Nova: localizzazione su pensilina accanto alla centrale termica, studio dell’impatto visivo dati tecnici, produzione annua stimata e costi. ....	22
Figura 12 – Ipotesi di installazione di moduli fotovoltaici semitrasparenti nel sito di Villa dei Quintili a copertura dei resti archeologici: localizzazione, dati tecnici, produzione annua stimata e costi.....	23
Figura 13 – Ipotesi di installazione di coppi fotovoltaici nel sito di Villa di Sette Bassi sulla copertura dell’ex-fienile dopo un possibile intervento di ristrutturazione integrale: localizzazione a scopo esemplificativo, dati tecnici, produzione annua stimata e costi.....	23

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Tabella riassuntiva con i consumi reali da bolletta, i consumi totali calcolati in condizioni climatiche reali e gli scostamenti percentuali per la validazione dei modelli di simulazione di ciascun complesso di edificio analizzato .....	17
--	----

## 1 Risultati attesi

1. **Costruzione di modelli di simulazione** su software di calcolo idonei per ciascun caso studio reale scelto nel Parco Archeologico dell'Appia Antica, in seguito alle analisi effettuate nella linea di attività LA1.4.
2. **Validazione dei modelli di simulazione** mediante confronto con i dati di consumo reali degli edifici derivanti dalle bollette energetiche e con le informazioni raccolte durante la linea di attività LA1.4.
3. **Analisi con metodo di calcolo orario** (UNI EN ISO 52016).
4. **Valutazione delle prestazioni energetiche dello stato di fatto** degli edifici scelti.
5. **Valutazione dei risparmi energetici conseguibili**, a seguito dell'applicazione di soluzioni standard e/o avanzate per l'incremento dell'efficienza energetica, nel rispetto dell'integrità del bene e dei principi fondamentali del restauro.
6. **Stima di massima in termini di costi di investimento e convenienza economica** per ogni intervento ipotizzato, al fine di verificarne la fattibilità e gli **eventuali risparmi economici** ottenibili dai singoli interventi e dalla loro combinazione.
7. **Valutazione della possibilità di installazione di applicazioni di geotermia e/o di campi fotovoltaici**, localizzati opportunamente in accordo con le esigenze di conservazione e tutela degli edifici e dell'intero sito del Parco Archeologico dell'Appia Antica. Se, a seguito di studi preliminari, tali ipotesi di intervento risulteranno plausibili, sarà effettuata **una stima della quantità di energia producibile e della sua influenza sul bilancio energetico degli edifici considerati**, quantificandone i risparmi energetici ed economici conseguibili. Per questi interventi si terrà conto dell'impatto visivo e paesaggistico delle soluzioni adottate e della fattibilità di upgrade riguardante l'intera area oggetto di analisi.
8. **Spunti di riflessione** derivanti dai "casi pilota" analizzati sul tema del **potenziale di risparmio energetico** che tali tipologie di edifici potrebbero rivestire nel patrimonio edilizio esistente italiano e sulle criticità eventualmente riscontrate, sia in termini metodologici che operativi.
9. **Visione integrata** degli edifici singoli e del rapporto con il contesto per sfruttarne al massimo le potenzialità nell'ottica di un "restauro energetico" di più ampia scala.

## 2 Risultati ottenuti

1. **Costruzione di modelli di simulazione:** Il primo risultato raggiunto, preliminare alla costruzione dei modelli, è stato l'elaborazione degli inventari energetici dei casi studio, che ha consentito di quantificare e ripartire i consumi per i diversi servizi energetici. La linea di attività L.A.1.4 ha rappresentato la base indispensabile per la costruzione dei modelli di simulazione dei complessi di edifici reali localizzati nel Parco Archeologico dell'Appia Antica. Nella L.A.1.5, sono stati presi in considerazione i casi studio di Santa Maria Nova, Villa dei Quintili (Casale e Antiquarium) e Villa di Sette Bassi. Attraverso un idoneo software di calcolo, sono stati costruiti i modelli di simulazione dei complessi esaminati, prestando particolare attenzione alla caratterizzazione delle componenti di involucro e degli impianti, oltre che ai profili di utilizzo e alla definizione delle zone termiche così come identificate grazie alle conoscenze precedentemente acquisite.
2. **Validazione dei modelli di simulazione:** I modelli energetici sono stati validati confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni, condotte utilizzando i dati climatici reali, con i dati di consumo degli edifici ricavati dalle bollette energetiche e a partire dagli inventari energetici elaborati.
3. **Analisi con metodo di calcolo orario:** tutte le simulazioni sono state realizzate con il metodo di calcolo orario previsto dalla UNI EN ISO 52016<sup>1</sup>; questo ha permesso di tener conto in modo più accurato del comportamento dinamico dell'involucro edilizio, considerando l'influenza di grandezze quali massa, densità, sfasamento e attenuazione dell'onda termica.
4. **Valutazione delle prestazioni energetiche dello stato di fatto degli edifici scelti:** a seguito della validazione dei modelli, si è proceduto alle simulazioni in condizioni climatiche standard, con i dati forniti dalla norma UNI 10349<sup>2</sup>, in modo da quantificare e ottenere le prestazioni energetiche dei complessi nello stato attuale (ex-ante), che sono poi serviti da base per la valutazione degli interventi di riqualificazione energetica.
5. **Valutazione dei risparmi energetici conseguibili:** per ogni complesso analizzato, si è proceduto alla selezione di possibili interventi di riqualificazione energetica degli edifici, tenendo conto delle loro peculiarità e dei vincoli di tutela, conservazione e salvaguardia del bene. Infatti, nonostante siano tutti localizzati nel Parco Archeologico dell'Appia Antica, i complessi di edifici presentano caratteristiche estremamente diversificate che hanno richiesto specifiche e accurate valutazioni per la scelta degli interventi ipotizzati. Sono state analizzate soluzioni per l'incremento dell'efficienza energetica, sia di tipo standard sia di tipo più avanzato, presenti sul mercato. Al fine di non compromettere l'autenticità del bene (in termini strutturali, figurativi, ecc.), per gli interventi studiati sono state adottate misure poco invasive, evitando di introdurre elementi non strettamente necessari all'interno o nelle pertinenze degli edifici. Quando possibile, si è cercato, di garantire la reversibilità degli interventi e la compatibilità con le modalità d'uso del bene e con i materiali impiegati, senza comprometterne la stabilità né alterarne l'aspetto estetico. Come facilmente prevedibile, per gli edifici del Parco, i sistemi impiantistici assumono un ruolo strategico per il miglioramento delle prestazioni energetiche, in particolare laddove

---

<sup>1</sup> Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52016-1. Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo, marzo 2018.

<sup>2</sup> Ente Italiano di Normazione, UNI 10349:2016. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.

non sia possibile operare sull'involucro edilizio, dati i vincoli culturali e paesaggistici presenti. Una volta scelte le soluzioni da adottare, sono state condotte le simulazioni in condizioni climatiche standard, valutando i possibili risparmi energetici conseguibili.

6. **Stima di massima in termini di costi di investimento e convenienza economica:** Per le soluzioni ipotizzate, al fine di verificarne la fattibilità, è stata condotta un'analisi economica volta a quantificare i costi di investimento e gli eventuali risparmi economici oltre che i tempi di ritorno semplici.
7. **Valutazione della possibilità di installazione di applicazioni di geotermia e/o di campi fotovoltaici e stima della quantità di energia producibile e della sua influenza sul bilancio energetico degli edifici considerati:** È stata esaminata la possibilità di installazione di impianti fotovoltaici sugli edifici e nel contesto circostante prestando una particolare attenzione alla minimizzazione degli impatti e alla loro integrazione, in accordo con le esigenze di conservazione e tutela degli edifici e del Parco Archeologico dell'Appia Antica. Per gli edifici, si è preferito l'utilizzo di tecnologie visivamente gradevoli e meno impattanti, quali tegole fotovoltaiche e pannelli colorati, mentre a livello di sito è stata valutata l'installazione di coperture con fotovoltaico semitrasparente su limitate aree di pertinenza o di stoccaggio di resti archeologici, anche allo scopo di proteggerli dalle intemperie. In un caso specifico (Santa Maria Nova) è stata ipotizzata la realizzazione di un'area parcheggio, dotata di pensilina fotovoltaica con punti di ricarica per i veicoli elettrici ad uso dei dipendenti del Parco e non visibile dai percorsi di visita. Per le soluzioni proposte è stata effettuata una stima dell'energia elettrica producibile e l'incidenza sul bilancio energetico degli edifici esaminati, calcolandone i risparmi energetici ed economici. Inoltre, a seguito delle analisi energetiche svolte, viste anche le possibili problematiche delle attività connesse (scavi e realizzazioni di pozzi) e le ridotte potenze termiche degli impianti, è stato scelto di non realizzare un ulteriore approfondimento del modello idrogeologico territoriale per l'utilizzo della risorsa geotermica a bassa entalpia per la climatizzazione degli edifici, anche in considerazione del fatto che questa soluzione non si è ritenuta economicamente idonea.
8. **Potenziale di risparmio energetico:** A conclusione dell'attività sono state ricavate alcune considerazioni finali sia su aspetti metodologici e criticità da valutare per l'analisi del patrimonio edilizio italiano storico e vincolato, sia sul potenziale di risparmio energetico legato a tali tipologie di edifici, che potrebbe contribuire in maniera consistente al processo di transizione ecologica e tradursi in beneficio per il sistema elettrico nazionale, pur rispettando i vincoli di tutela e conservazione dei beni.
9. **Visione integrata:** Durante tutto il corso dell'attività, l'analisi dei complessi di edifici del Parco Archeologico dell'Appia Antica è stata condotta con uno sguardo sempre attento al contesto circostante, subordinando quindi le possibili strategie di miglioramento alle esigenze di tutela e conservazione degli edifici e del Parco stesso. Grazie ad una visione integrata del tema affrontato si è cercato di immaginare un'ipotesi di "restauro energetico" che potesse da un lato migliorare le prestazioni degli edifici e dall'altro valorizzarne il carattere storico e di pregio dell'intero sito.

### 3 Prodotti attesi

#### 1. Report

## 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 ed eventi di disseminazione. La descrizione delle attività condotte e dei risultati ottenuti sono il frutto dell'analisi di tutto il materiale di studio elaborato, comprensivo dei modelli di simulazione, dei file Excel di analisi dei risultati numerici delle simulazioni, degli inventari energetici e delle stime economiche. Il report contiene anche considerazioni finali, metodologiche e operative, sulle analisi energetiche degli edifici storici e sul potenziale di risparmio energetico del patrimonio edilizio storico nazionale.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

1. Le attività svolte non presentano alcuno scostamento rispetto agli obiettivi previsti e ai risultati raggiunti.
2. Non erano previste spese per attrezzature di misura.
3. Le spese per *dissemination* e relative missioni sono risultate in linea rispetto alle previsioni e si è partecipato a conferenze e altri eventi senza aggravio di costi. Ulteriori articoli e pubblicazioni sono attualmente in fase di predisposizione.

## 6 Sintesi delle attività svolte

È stata realizzata l'analisi energetica di complessi di edifici storici e vincolati nel Parco Archeologico dell'Appia Antica. I modelli di simulazione sono stati validati in condizioni climatiche reali, tramite confronto con i consumi di bolletta e in base agli inventari energetici. Gli edifici sono stati poi simulati in condizioni climatiche standard con metodo di calcolo orario e sono state valutate le prestazioni energetiche dello stato di fatto. Successivamente, sono stati analizzati possibili interventi di riqualificazione energetica standard e avanzati per involucro e impianti, compresi i sistemi di produzione da fonti rinnovabili, e quantificati i risparmi energetici conseguibili, realizzando altresì una stima economica comprensiva di costi di investimento, risparmi e tempi di ritorno. Tutti gli interventi a livello di edificio e di sito sono stati selezionati secondo i principi di integrazione e riduzione degli impatti, nel rispetto dei vincoli di conservazione e tutela.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Introduzione

L'attività di ricerca condotta per la linea di attività LA1.5 si colloca in continuità con la LA1.4 e ha l'obiettivo di analizzare "casi pilota" che possano offrire spunti di riflessione sul tema del risparmio energetico in edifici storici e vincolati. L'unicità di questi edifici non può infatti rappresentare un ostacolo alla riduzione dei consumi e al raggiungimento di elevati standard di efficienza energetica, pur nel rispetto dei principi del restauro e dei vincoli di tutela. La ricerca ha rappresentato l'occasione per sperimentare sui casi studio analizzati un approccio metodologico *ad hoc*, ma al tempo stesso replicabile, almeno concettualmente, nel contesto del patrimonio edilizio storico nazionale. La presenza di diverse destinazioni d'uso (uffici, sedi museali, spazi di accoglienza e di servizio) ha consentito di includere nell'analisi una serie di categorie di edifici comuni nel nostro Paese, mentre l'appartenenza ad un contesto vincolato più esteso, come il Parco Archeologico dell'Appia Antica, ha permesso di valutare differenti strategie di intervento e la possibilità di installare sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili a servizio sia del singolo edificio sia del sito, nel rispetto del contesto circostante e dei vincoli vigenti.

### 7.2 Approccio metodologico

A seguito della caratterizzazione termofisica e impiantistica di alcuni complessi di edifici nel Parco Archeologico dell'Appia Antica ottenuta nella LA1.4, per il proseguo della ricerca si è deciso di prendere in considerazione i complessi di edifici nei siti di Santa Maria Nova, Villa di Sette Bassi e Villa dei Quintili (Casale e Antiquarium). Santa Maria Nova è il complesso più significativo per stratificazione storica e pregio artistico. Le due ville, invece, sono costruttivamente simili ma presentano uno stato di fatto e condizioni di utilizzo molto differenti<sup>3</sup>.

I casi studio analizzati ha offerto la possibilità di effettuare analisi diversificate e nello stesso tempo verificare la replicabilità del metodo adottato (Figura 1) sull'intero patrimonio storico italiano.



Figura 1- Schematizzazione della metodologia applicata

<sup>3</sup> Villa di Sette Bassi è attualmente in stato avanzato di degrado e quindi per lo più inutilizzata, mentre il Casale nel sito di Villa dei Quintili è sede di uffici e l'Antiquarium è adibito a spazio espositivo.

Pur ricalcando le fasi sostanziali di una diagnosi energetica classica, esso cerca di superare le inevitabili criticità cui si va incontro nell'analisi di un edificio reale storico e vincolato, come illustrato nei prossimi paragrafi.

### 7.3 Gli inventari energetici

Gli inventari energetici sono stati elaborati a partire dal censimento di tutte le tipologie di macchine termiche, corpi scaldanti e illuminanti presenti, delle apparecchiature elettriche utilizzate, dei sistemi di telefonia e allarme e di tutto ciò che concorre ai consumi energetici dei complessi di edifici analizzati. La costruzione degli inventari energetici ha riguardato sostanzialmente i consumi elettrici, tranne che per gli edifici afferenti al sito di Villa dei Quintili, in cui, per il riscaldamento, è utilizzato anche il gas naturale. Per la ripartizione dei consumi elettrici da bolletta (Figura 2), sono stati considerati sia i servizi energetici previsti per il calcolo della prestazione energetica (climatizzazione invernale ed estiva, produzione di acqua calda sanitaria (ACS), illuminazione, ventilazione, trasporto di persone), sia quelli dedicati ad altre esigenze (forza motrice, illuminazione esterna, ricarica dei veicoli elettrici).

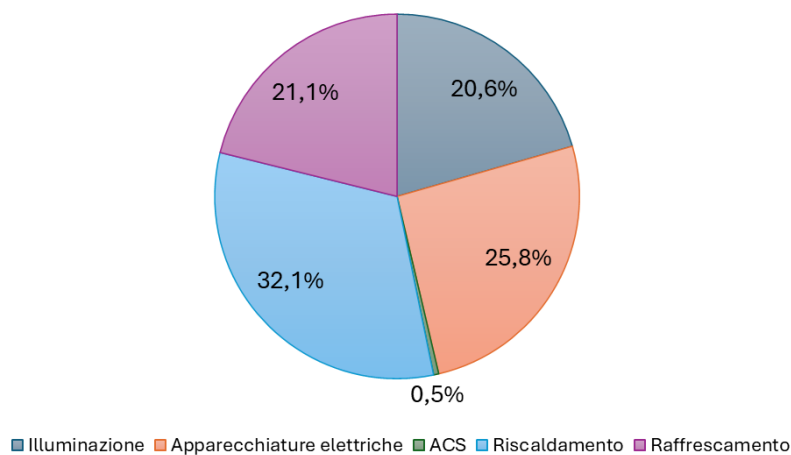


Figura 2 - Esempio di ripartizione dei consumi elettrici (caso di studio del complesso di Santa Maria Nova).

La ripartizione è stata possibile grazie ad una ricostruzione attendibile dell'uso dell'energia sulla scorta delle informazioni acquisite in fase di sopralluogo e sulle stime basate sui dati tecnici e di funzionamento di impianti e apparecchiature (potenza nominale, ore di funzionamento e/o utilizzo, rendimento, ecc.). L'ingente quantità dei dati raccolti ha reso questa operazione particolarmente complessa, vista anche l'assenza di sistemi di contabilizzazione dedicati alla rilevazione diretta dei consumi dei servizi energetici<sup>4</sup>.

I consumi elettrici diversi da quelli dei servizi di climatizzazione sono stati considerati come baseline dei consumi noti da bolletta quindi, per l'anno di riferimento<sup>5</sup>, i consumi stagionali per

<sup>4</sup> In tutti i casi, ma in particolar modo per Villa di Sette Bassi, si è ritenuto utile procedere all'analisi dettagliata dei consumi elettrici per fasce orarie (F1, F2 e F3), in modo da realizzare una ripartizione più realistica e attendibile, visto l'utilizzo solo parziale dell'edificio.

<sup>5</sup> Per l'analisi delle bollette energetiche e degli andamenti dei consumi reali negli anni presi a riferimento a seconda dei casi studio analizzati, si veda il Report RdS\_PTR 22-24\_PR 1.5\_LA1.4\_073: S. Di Turi, D. Palladino, F. Caffari, G. Centi, F. Margiotta, L. Ronchetti, P. Signoretti, L. Volpe, "Efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati: caratterizzazione di casi studio reali (LA1.4)", Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA. Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024.

la climatizzazione sono stati calcolati come differenza tra i consumi elettrici totali da bolletta e quelli di baseline.

#### 7.4 Costruzione dei modelli di simulazione energetica

I modelli degli edifici (Figura 3) sono stati implementati con un software di calcolo certificato e simulati con metodo dinamico orario secondo la UNI EN ISO 52016-1<sup>6</sup>. I dati di input dei modelli comprendono tutte le caratteristiche architettoniche, morfologiche e costruttive, le proprietà termiche e materiche dei componenti di involucro, i ponti termici ove presenti, i dati dei componenti impiantistici, le temperature di set-point. Queste ultime sono state rilevate durante i sopralluoghi oppure ipotizzate in base alle informazioni fornite dagli utilizzatori e dai dipendenti dell'Ente Parco. Sono state inoltre definite le diverse zone termiche, suddivise per destinazione d'uso e caratterizzate in base alle peculiarità di ciascun ambiente.

Particolare attenzione è stata rivolta alla quantificazione degli apporti interni dovuti alle apparecchiature elettriche e agli occupanti, nonché alla determinazione del contributo derivante dalla ventilazione naturale e dai ricambi d'aria.

---

<sup>6</sup> UNI EN ISO 52016-1. Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo, marzo 2018.

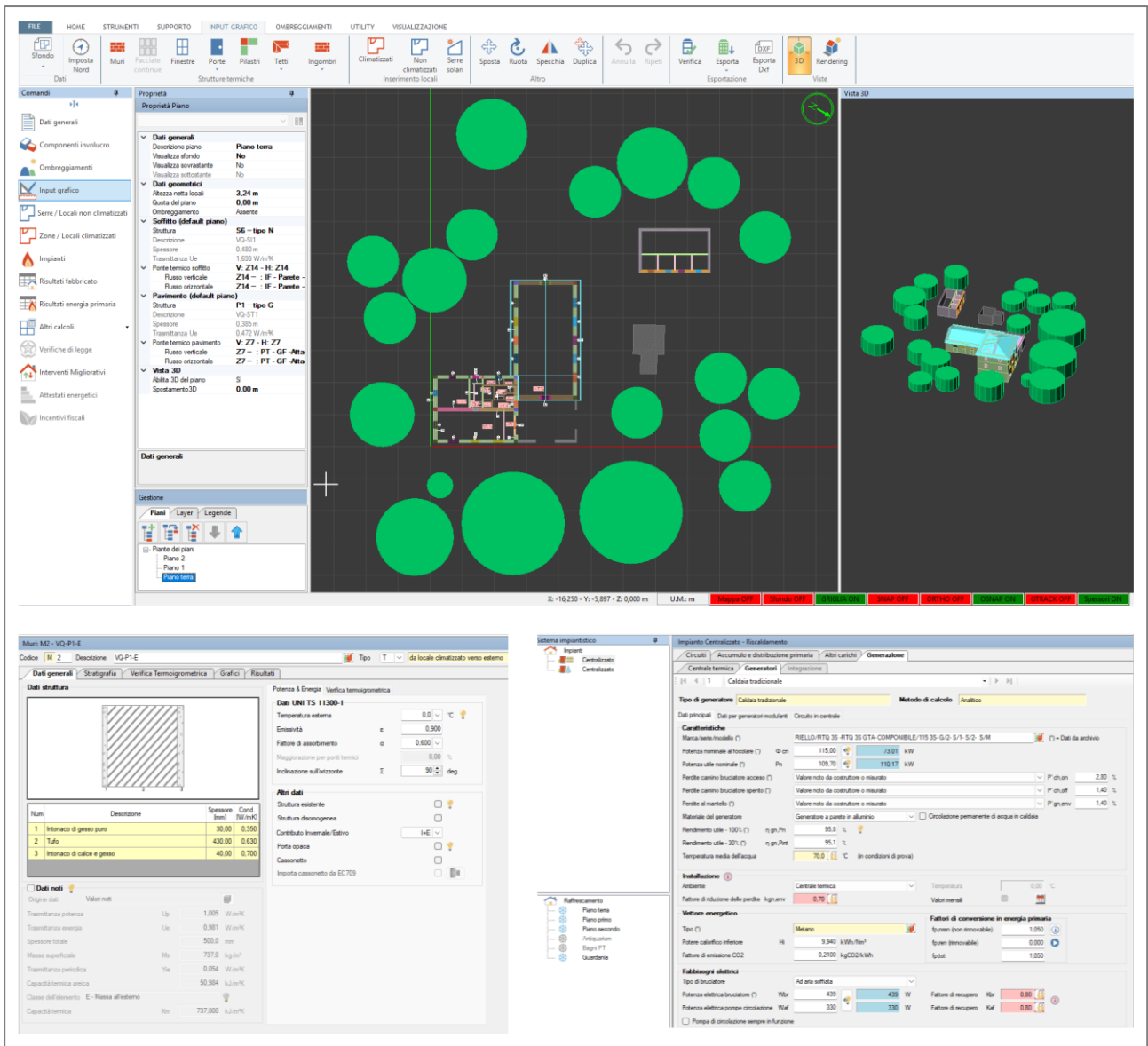
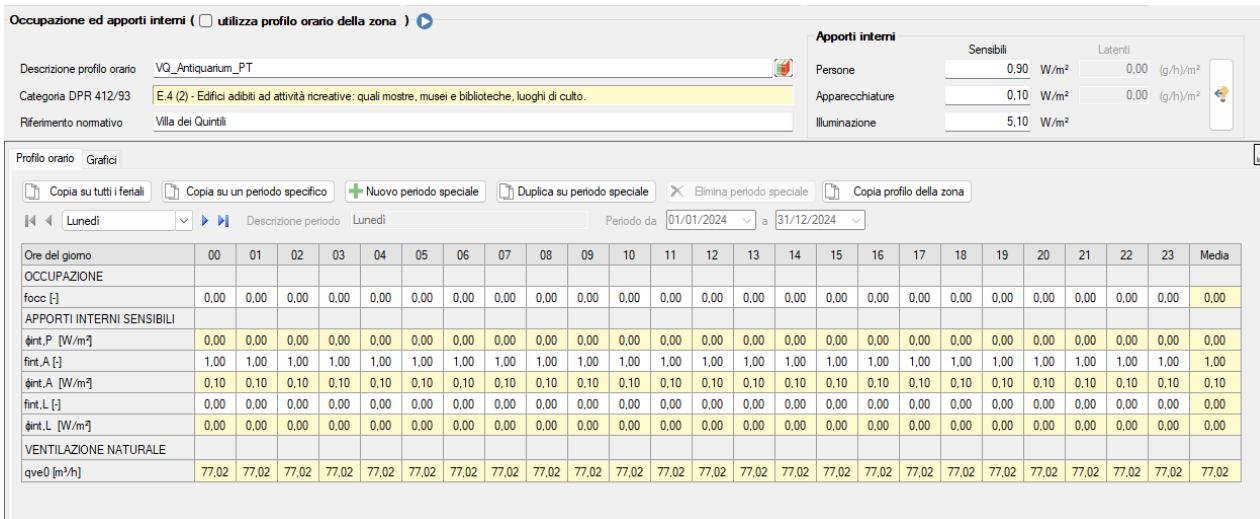


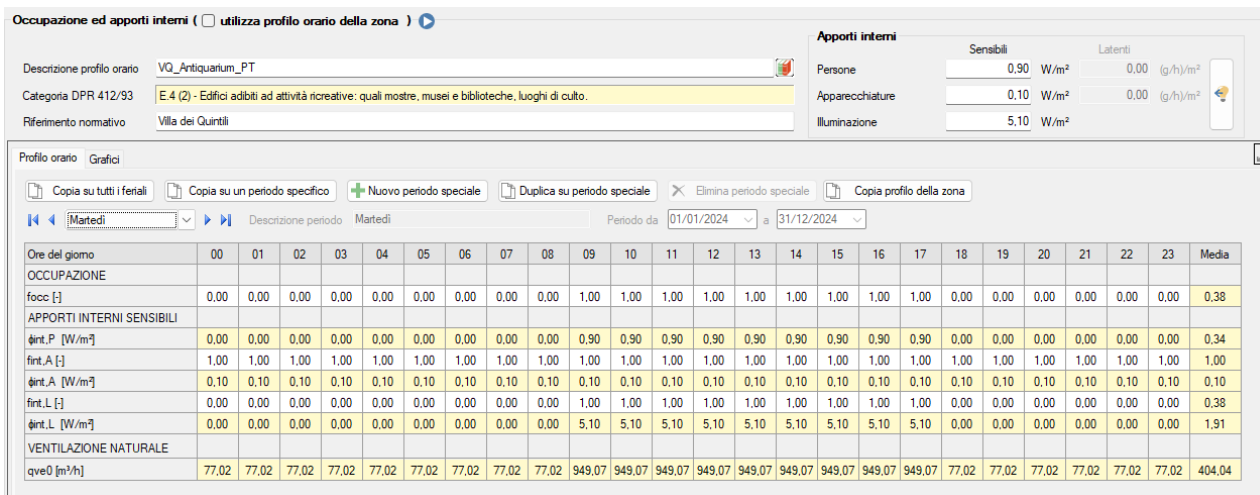
Figura 3 – Esempio di costruzione dei modelli di simulazione energetica e di definizione dei componenti di involucro e di impianto (Villa dei Quintili).

Sono stati ipotizzati profili di utilizzo realistici per ogni ambiente (Figura 4) con le ore di occupazione giornaliera, tenendo conto degli orari di apertura al pubblico, dei giorni festivi annuali e dell'utilizzo effettivo da parte dei dipendenti e dei visitatori del Parco. Tali informazioni sono state correlate con i profili di utilizzo e i consumi delle apparecchiature in modo da ricavare i corrispondenti dati di input.

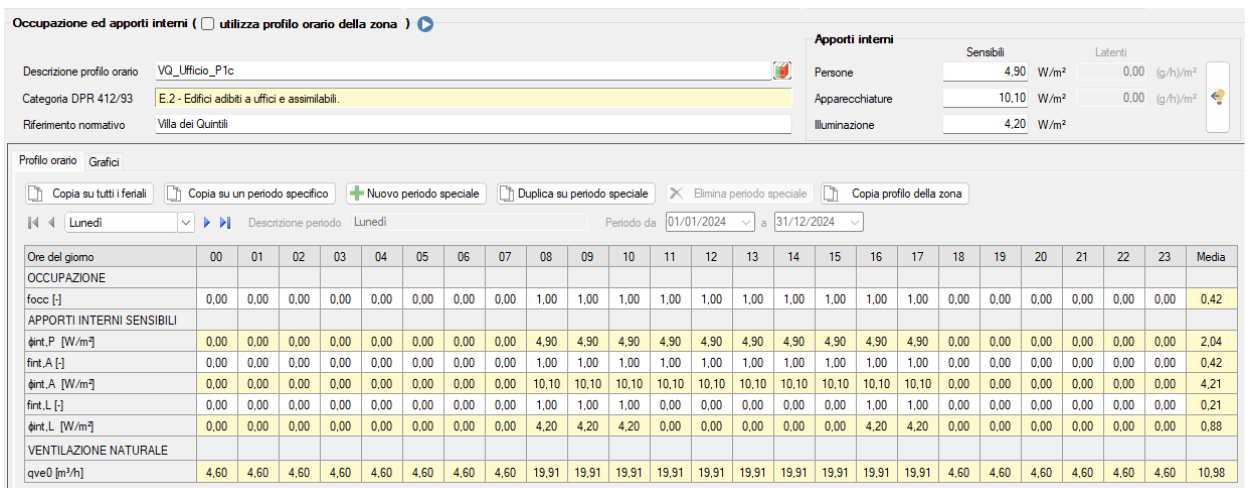
La modellazione è risultata delicata e complessa vista la mancanza di sistemi di monitoraggio continuativi dei parametri microclimatici ambientali interni, nonché la variabilità delle abitudini di utilizzo da parte dei dipendenti e dei fruitori. A questa attività, spesso sottovalutata nei tradizionali processi di diagnosi energetica, è stato dato ampio spazio perché ritenuta di fondamentale importanza per una valutazione energetica quanto più dettagliata e affidabile.



1. Profilo nel giorno di chiusura dell'Antiquarium



2. Profilo nel giorno di apertura dell'Antiquarium



3. Profilo di un giorno tipico feriale per un ufficio del Casale

Figura 4 – Esempio di profili orari e relativi apporti termici interni implementati nei modelli di simulazione (Villa dei Quintili).

## 7.5 Validazione dei modelli

I modelli energetici sono stati validati attraverso il confronto con i consumi reali<sup>7</sup> conducendo le simulazioni in condizioni climatiche reali<sup>8</sup> e con metodo di calcolo orario (UNI EN ISO 52016).

La validazione dei modelli di ciascun caso studio ha consentito di ottenere risultati attendibili, (Tabella 1) con uno scostamento (valutato sul totale annuo dei consumi elettrici calcolati e simulati per tutti i servizi energetici) compreso in un range variabile tra circa - 5,4% e + 4,3%. Per il Casale e l'Antiquarium di Villa dei Quintili sono stati calcolati gli scostamenti sia sui consumi elettrici che su quelli di gas.

Tabella 1 – Tabella riassuntiva con i consumi reali da bolletta, i consumi totali calcolati in condizioni climatiche reali e gli scostamenti percentuali per la validazione dei modelli di simulazione di ciascun complesso di edificio analizzato

Casi studio	Consumi reali	Consumi calcolati	Scostamento
Santa Maria Nova	41.627 kWh	41.917 kWh	- 2,2%
Villa dei Quintili (elettrico)	44.330 kWh	41.956 kWh	- 5,4%
Villa dei Quintili (gas)	6.739 m <sup>3</sup>	6.779 m <sup>3</sup>	+ 0,6%
Villa di Sette Bassi	7.237 kWh	6.954 kWh	+ 4,3%

## 7.6 Risultati delle analisi energetiche, scelta degli interventi di riqualificazione e risparmi energetici attesi

Validati i modelli, è stato possibile effettuare le analisi delle prestazioni energetiche degli edifici nello stato di fatto in condizioni climatiche standard con i dati climatici della norma UNI 10349<sup>9</sup>. Per Villa di Sette Bassi, ad oggi quasi del tutto inutilizzata, si è deciso di considerare come caso di riferimento per le analisi successive le ipotesi di ripristino dei componenti di involucro degradati, comprensive di intervento di isolamento della copertura e sostituzione di infissi, e di ammodernamento e pieno funzionamento degli impianti di climatizzazione e ACS (VRF dimensionati sulla base del fabbisogno dell'edificio e scaldacqua a pompa di calore). Tali interventi sono dettati dalla necessità di riportare l'edificio al pieno utilizzo a prescindere dalle esigenze di miglioramento della prestazione energetica. A tal fine, sono stati considerati profili di utilizzo coerenti con la piena occupazione di tutti gli ambienti del casale.

Ciò ha di fatto rappresentato la base per la scelta degli interventi ritenuti più idonei in base ai vincoli di salvaguardia vigenti e per il successivo confronto con le prestazioni energetiche post-intervento.

Per ciascun caso studio sono stati ipotizzati differenti tipi di interventi singoli e di scenari aggregati: da un lato sono stati analizzati interventi ritenuti economicamente e tecnicamente fattibili per raggiungere un livello di efficienza energetica più elevato rispetto a quello attuale,

<sup>7</sup> ENEA, CTI. Rapporto tecnico UNI/TR 11775:2020. Linee guida nazionali per le diagnosi energetiche degli edifici.

<sup>8</sup> Sono stati utilizzati i dati di temperatura, umidità relativa, velocità del vento e radiazione globale di ARPA Lazio (disponibili sul sito: <https://www.arpalazio.it/rete-micro-meteorologica>) relativi agli anni 2021 e 2022. A tal proposito è stata scelta la stazione di rilevamento AL001 sita a Roma – Tor Vergata, in quanto si tratta del sito più vicino al Parco Archeologico dell'Appia Antica. Le componenti di radiazione solare diretta e diffusa su piano orizzontale sono state invece ricavate da ENEA dai dati di radiazione globale di ARPA Lazio.

<sup>9</sup> UNI 10349:2016. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.

applicabili nel rispetto dei vincoli e del carattere storico; dall'altro si è cercato di proporre interventi innovativi o tecnicamente più avanzati a livello impiantistico possibilmente integrati con sistemi di produzione da fonti rinnovabili (fotovoltaico). In entrambi i casi, sono state privilegiate soluzioni il meno invasive possibile, soprattutto a livello di involucro, nel tentativo di superare una delle maggiori criticità presenti quando si interviene su edifici storici e vincolati, ossia le difficoltà di realizzazione connesse a problemi di integrazione storico-architettonica e funzionale. Per esempio, al fine di non compromettere l'autenticità del bene (in termini strutturali, figurativi, ecc.), si è ritenuto opportuno adottare un approccio prudente sull'utilizzo del cappotto termico, che è stato escluso in tutti i casi studio tranne che in Villa di Sette Bassi. Negli edifici storici, infatti, l'isolamento esterno delle pareti altera in maniera evidente l'aspetto del bene, pregiudicandone la valenza. Per Villa di Sette Bassi si è, invece, ritenuto che tale intervento possa risultare fattibile almeno in un'ipotesi di riqualificazione avanzata, in quanto l'edificio deve essere totalmente restaurato e ristrutturato dal punto di vista strutturale, energetico e delle finiture esterne per ripristinarne il completo utilizzo. L'impossibilità di attuare interventi invasivi sull'involucro, per minimizzarne le dispersioni termiche ha di fatto favorito la scelta di interventi a livello impiantistico, quali la sostituzione dei generatori esistenti con sistemi VRF e a pompa di calore per i servizi di climatizzazione e produzione di ACS. Negli scenari più avanzati è stata prevista l'installazione di sistemi di produzione da fonti rinnovabili, quali impianti fotovoltaici realizzati con pannelli colorati (per esempio su pensilina nascosta al percorso turistico, accanto alla centrale termica in Santa Maria Nova) o coppi fotovoltaici (nelle due Ville), rivolgendo particolare attenzione non soltanto alla fattibilità tecnica, ma anche all'impatto visivo sui percorsi di visita e sul contesto del Parco. Si è, invece, deciso di escludere dagli interventi previsti i sistemi di produzione a pompa di calore accoppiati con sistemi di geoscambio in quanto ritenuti da un lato di difficile realizzazione tecnico/economica, soprattutto in prossimità dei resti archeologici, dall'altro non appropriati viste le ridotte potenze termiche degli impianti presenti.

Tutti gli interventi e gli scenari aggregati sono stati simulati con metodo di calcolo orario; dalla Figura 5 alla Figura 7, sono riportati i consumi pre- e post-intervento in termini di energia primaria annua totale<sup>10</sup> e risparmi energetici attesi.

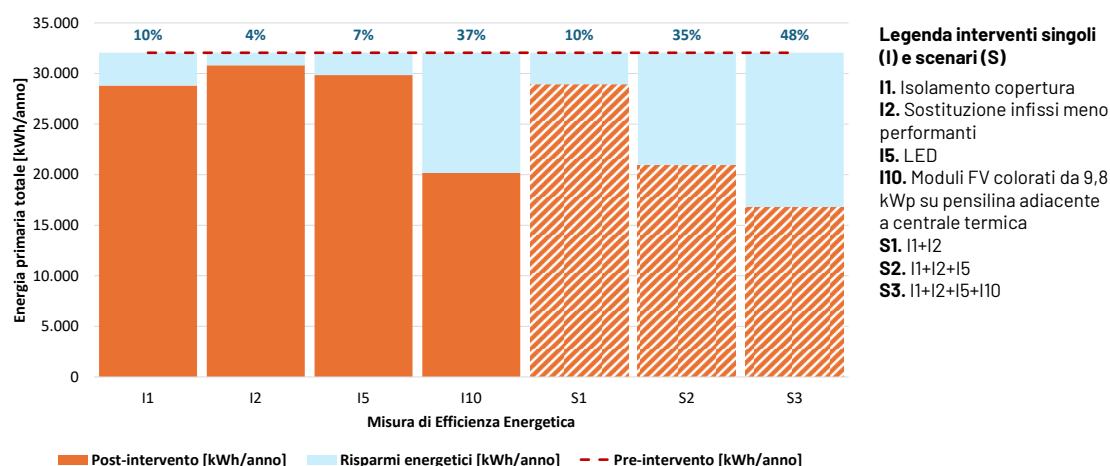


Figura 5 - Prestazioni energetiche per il complesso di Santa Maria Nova in condizioni climatiche standard: grafico riassuntivo con i risultati in termini di energia primaria totale pre- e post-intervento e risparmi energetici conseguiti in caso di interventi singoli (tinta unita) e scenari combinati (tratteggio)

<sup>10</sup> L'energia primaria annua totale è calcolata come la somma dei contributi dovuti a climatizzazione, ACS, illuminazione e trasporti, al netto delle apparecchiature elettriche.

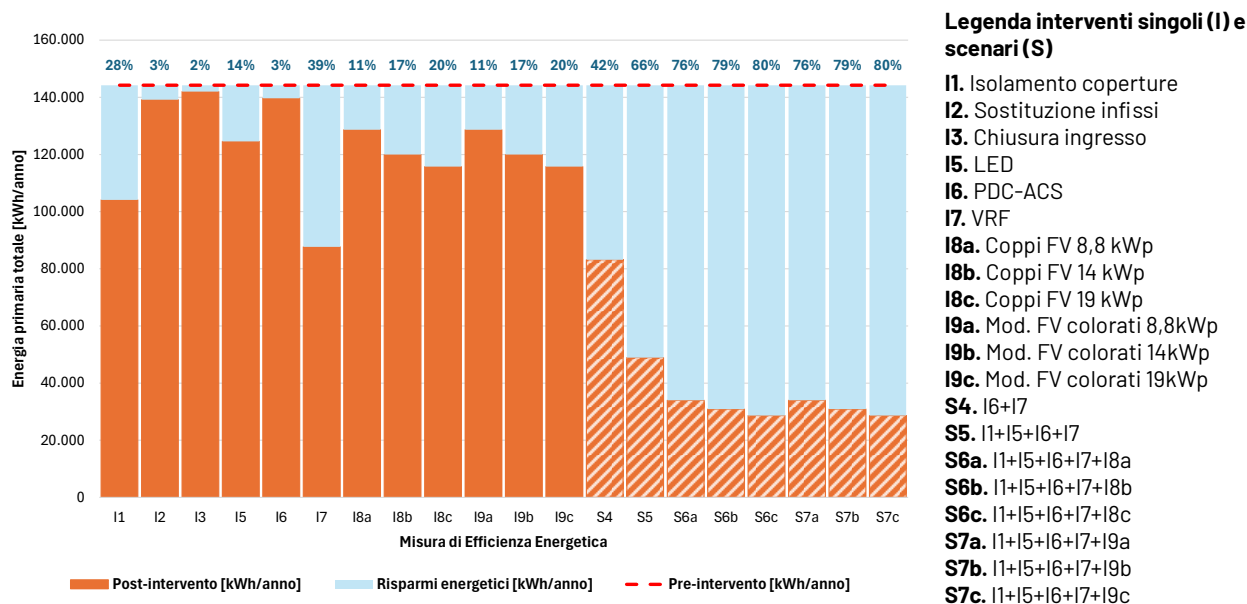


Figura 6 – Prestazioni energetiche per il complesso di Villa dei Quintili (Casale e Antiquarium) in condizioni climatiche standard: grafico riassuntivo con i risultati in termini di energia primaria totale pre- e post-intervento e risparmi energetici conseguiti in caso di interventi singoli (tinta unita) e scenari combinati (tratteggio).

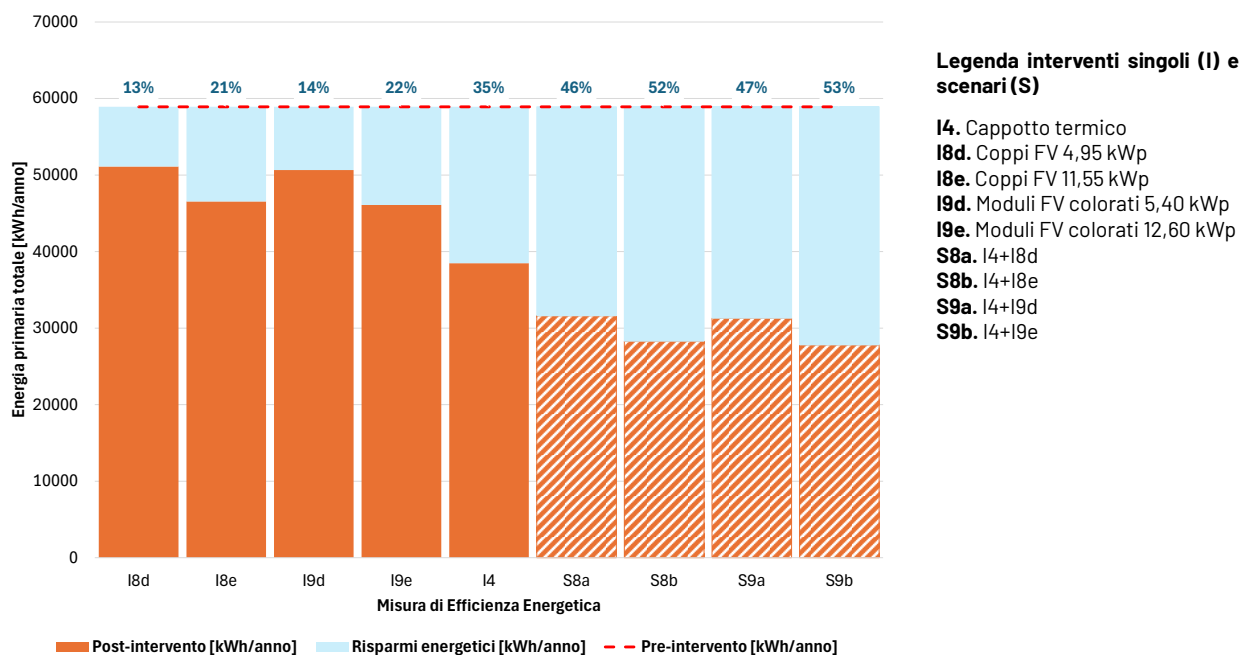


Figura 7 – Prestazioni energetiche per il caso di Villa di Sette Bassi (casale e vaccheria con ripristino delle condizioni di utilizzo) in condizioni climatiche standard: grafico riassuntivo con i risultati in termini di energia primaria totale pre- e post-intervento e risparmi energetici conseguiti in caso di interventi singoli (tinta unita) e scenari combinati (tratteggio)

Come si può dedurre dai risultati ottenuti, la sostituzione dei generatori esistenti con sistemi VRF e l'installazione di moduli fotovoltaici portano da soli ai maggiori risparmi energetici. Gli scenari aggregati comportano invece risparmi variabili che possono raggiungere anche valori dell'80% (S4c in Villa dei Quintili).

## 7.7 Stime economiche

Al fine di valutare l'impatto economico delle misure adottate, sono stati calcolati i costi di investimento<sup>11</sup> e, a partire da questi e dai risparmi energetici, i risparmi economici e i tempi di ritorno semplici<sup>12</sup>, sintetizzati da Figura 8 a Figura 10

Si può osservare che gli interventi più comuni, quali la sostituzione dei corpi illuminanti con lampade LED e dei boiler elettrici per ACS, risultano economicamente sostenibili, mentre l'installazione di coppi fotovoltaici influisce significativamente sul costo complessivo sia se valutata singolarmente sia in scenari aggregati, presentando un allungamento evidente dei tempi di ritorno rispetto ai moduli fotovoltaici colorati.

Gli interventi sull'involucro sono quelli che presentano i tempi di ritorno più elevati, risultando di fatto inattuabili a meno di realizzarli con azioni programmate di manutenzione straordinaria, dettate da esigenze di utilizzo e conservazione e non solo energetiche.

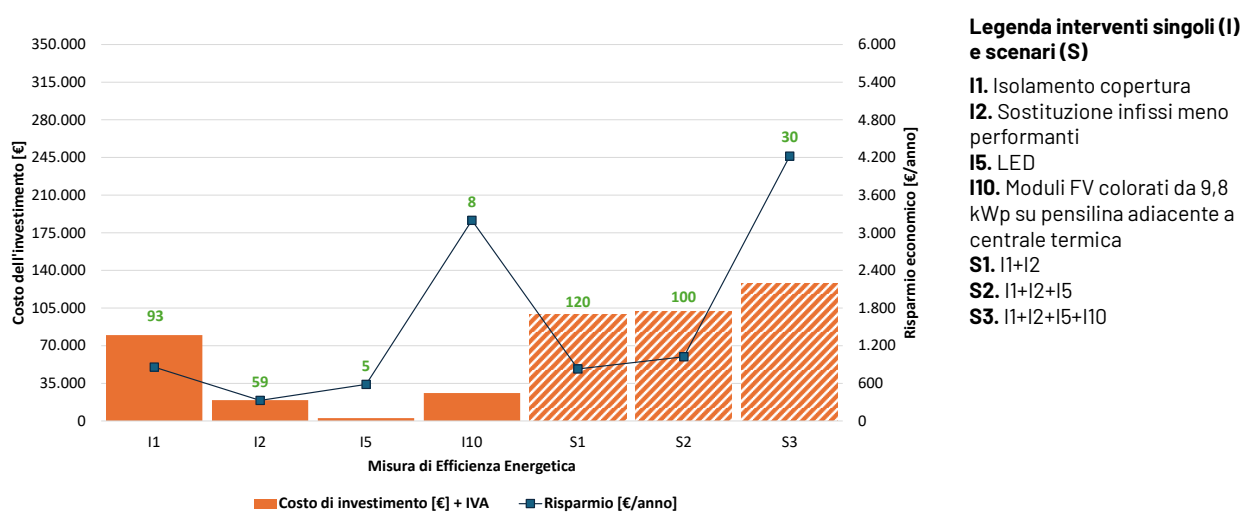


Figura 8 - Stime economiche per il caso di studio di Santa Maria Nova: grafico riassuntivo con costi di investimento, risparmi economici e tempi di ritorno semplici (in verde) per ciascun intervento (tinta unita) e scenario di intervento (tratteggiato)

<sup>11</sup> I costi di investimento sono stati calcolati prendendo a riferimento il costo a m<sup>2</sup> degli interventi scelti, valutato secondo i prezziari "DEI, Prezzi informativi dell'edilizia. Materiali e opere compiute. Secondo semestre 2023".

<sup>12</sup> Nel calcolo del risparmio economico e dei tempi di ritorno sono stati considerati i kWh elettrici risparmiati, comprensivi del contributo dovuto alla produzione da impianto fotovoltaico a compensazione di tutti i servizi energetici comprese le apparecchiature elettriche.

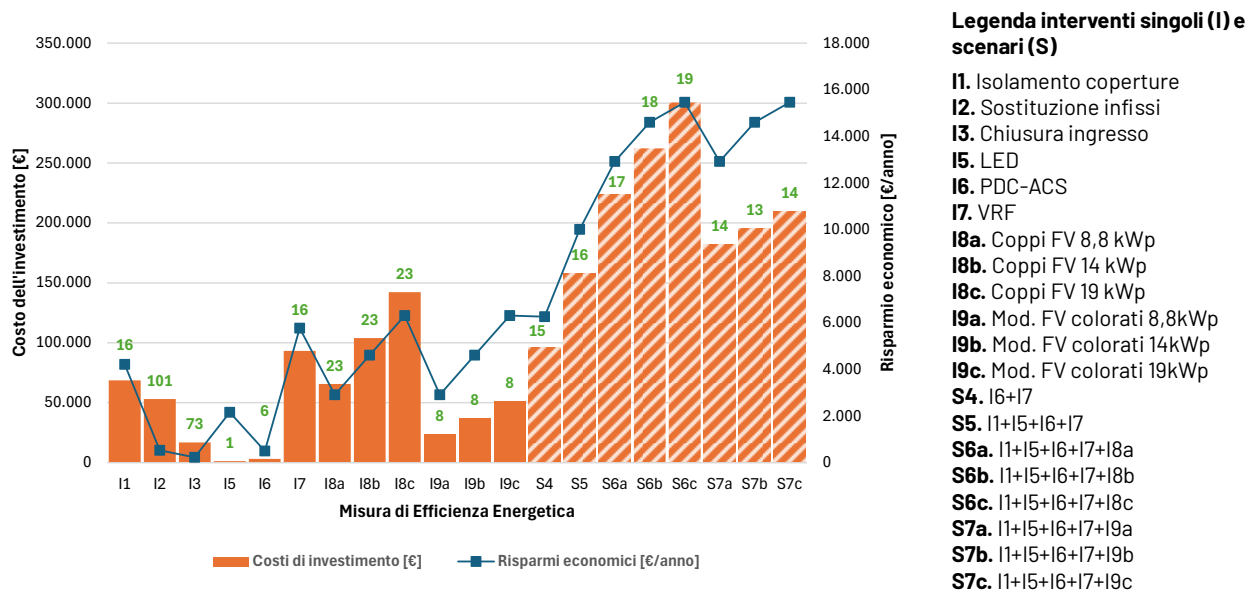


Figura 9 –Stime economiche per il caso di studio di Villa dei Quintili (Casale e Antiquarium): grafico riassuntivo con costi di investimento, risparmi economici e tempi di ritorno semplici (in verde) per ciascun intervento (tinta unita) e scenario di intervento (tratteggio)

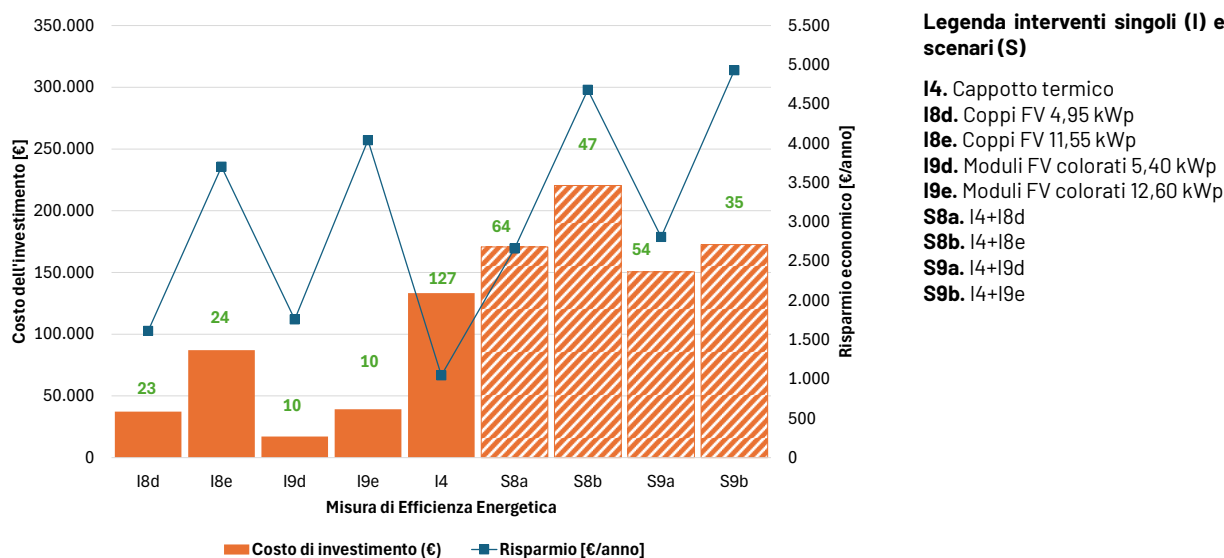


Figura 10 – Stime economiche per il caso di studio di Villa di Sette Bassi (con il ripristino delle condizioni di utilizzo): grafico riassuntivo con costi di investimento, risparmi economici e tempi di ritorno semplici (numeri in verde) per ciascun intervento e scenario di intervento

## 7.8 Installazione di sistemi di produzione da FER a livello di sito

L'ultima fase della ricerca ha riguardato la possibilità di rendere i siti energeticamente più efficienti grazie alla realizzazione di sistemi di produzione da FER nelle aree in prossimità degli edifici.

Per Santa Maria Nova, si è pensato di utilizzare lo spazio prospiciente la centrale termica per realizzare una piccola area parcheggio, dotata di pensilina fotovoltaica e punti di ricarica per i veicoli elettrici a servizio del Parco, invisibile alla vista dei visitatori grazie alla vegetazione esistente.

Nel caso di Villa dei Quintili si è invece ipotizzata l'installazione di una copertura dotata di moduli fotovoltaici semitrasparenti in vetro (efficienza pari a 13,1%) che assolve alla funzione di

protezione dei resti archeologici. La pensilina è pensata come una struttura a basso impatto e all'occorrenza rimovibile, rendendo l'intervento potenzialmente reversibile e assecondando un approccio conservativo e rispettoso del bene.

Per Villa di Sette Bassi, infine, la volontà da parte dell'Ente di riqualificare l'ex-fienile può rappresentare l'occasione per installare coppi fotovoltaici sulla falda di copertura.

Da Figura 11 a Figura 13 si riportano i quadri di sintesi degli interventi proposti.

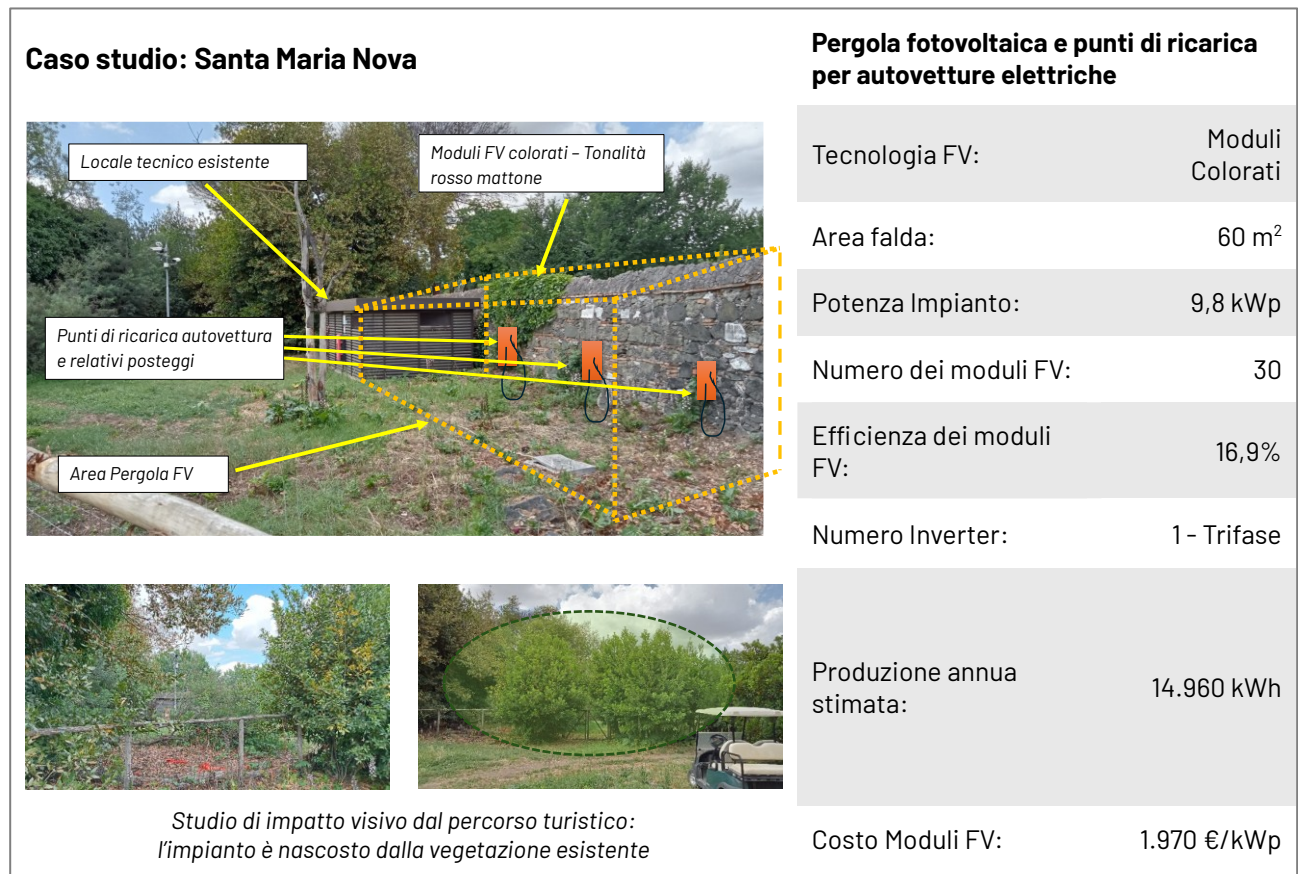
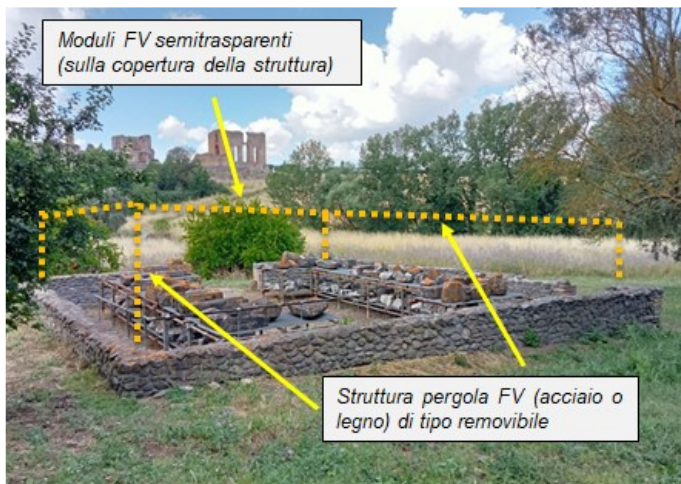


Figura 11- Ipotesi di installazione di moduli fotovoltaici colorati nel sito di Santa Maria Nova: localizzazione su pensilina accanto alla centrale termica, studio dell'impatto visivo dati tecnici, produzione annua stimata e costi.

### Caso studio: Villa dei Quintili



### Copertura FV per area di stoccaggio resti archeologici

Tecnologia FV:	Semitrasparenti
Area falda:	102 m <sup>2</sup>
Potenza Impianto:	11 kWp
Numero dei moduli FV:	48
Efficienza dei moduli FV:	13,1%
Numero Inverter:	1 - Trifase
Produzione annua stimata:	14.120 kWh
Costo Moduli FV:	1.970 €/kWp

Figura 12 – Ipotesi di installazione di moduli fotovoltaici semitrasparenti nel sito di Villa dei Quintili a copertura dei resti archeologici: localizzazione, dati tecnici, produzione annua stimata e costi.

### Caso studio: Villa dei Sette Bassi



### Copertura FV dell'ex-fienile

Tecnologia FV:	Coppi FV
Area falda:	126 m <sup>2</sup>
Potenza Impianto:	20,8 kWp
Numero dei coppi FV:	1874
Efficienza dei coppi FV:	12,8%
Numero Inverter:	1 - Trifase
Produzione annua stimata:	30.940 kWh
Costo Coppi FV:	5,76 €/Wp

Figura 13 – Ipotesi di installazione di coppi fotovoltaici nel sito di Villa di Sette Bassi sulla copertura dell'ex-fienile dopo un possibile intervento di ristrutturazione integrale: localizzazione a scopo esemplificativo, dati tecnici, produzione annua stimata e costi.

## 7.9 Conclusioni e potenziale di risparmio energetico

L'attività svolta ha consentito di studiare dei "casi pilota" per valutare la possibilità di incrementare l'efficienza energetica in edifici storici e vincolati e stimarne il potenziale di risparmio energetico.

La costruzione di modelli di simulazione affidabili, validati sulla base dei consumi reali (da bolletta) è un processo delicato che richiede la conoscenza approfondita dello stato di fatto e delle modalità di utilizzo dell'edificio.

Le analisi energetiche hanno evidenziato un potenziale di risparmio energetico compreso tra il 10 e l'80% a seconda degli scenari ipotizzati. Molte delle misure previste dimostrano come sia possibile realizzare una riqualificazione energetica degli edifici storici senza comprometterne l'unicità e il valore. Le soluzioni più avanzate, come l'utilizzo di coppi fotovoltaici in combinazione con altri interventi, comportano i maggiori risparmi energetici ma risultano anche più costose. Tutti gli interventi, inoltre, sono soggetti al parere degli enti preposti alla tutela ed è pertanto necessario un dialogo continuo che deve iniziare sin dalle prime fasi progettuali e di analisi.

Uno sguardo più ampio a livello di sito consente infine di ottenere una visione integrata del rapporto degli edifici con il contesto circostante nell'ottica di un "restauro energetico" di più ampia scala.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Ai fini dello svolgimento delle attività non sono state previste in fase di proposta della linea di attività, né sono state necessarie consulenze esterne a titolo oneroso.

Il supporto da parte dell'Ente Parco si è invece rivelato fondamentale per il proseguimento delle attività già avviate durante la LA1.4, grazie ad eventuali chiarimenti e/o consultazioni in merito all'utilizzo ed alla fruizione degli edifici.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Si riporta l'elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dalle attività svolte:

1. 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.
2. 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.

È in corso la stesura di ulteriori articoli scientifici a conclusione dell'attività.

## 10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione scaturiti dall'attività svolta:

1. 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.
2. 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:
  - Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici nel Parco Archeologico dell'Appia Antica. Relatore: Francesca Caffari.
  - Indagini non distruttive: uso della termografia nelle diagnosi energetiche degli edifici. Relatore: Silvia Di Turi.
  - Indagini non distruttive: uso della termoflussimetria per la misura della trasmittanza termica in edilizia. Relatore: Domenico Palladino.
  - Strategie di intervento in edifici storici vincolati. Relatore: Giulia Centi.
3. Organizzazione del convegno "Progettare la riqualificazione energetica degli edifici storici", 14 marzo 2024, Mostra Convegno Expocomfort (MCE), Fiera Milano Rho. In particolare, i seguenti interventi hanno riguardato gli edifici analizzati del Parco Archeologico dell'Appia Antica:
  - Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici nel Parco Archeologico dell'Appia Antica. Relatore: Francesca Caffari.
  - Indagini non distruttive: uso della termografia e della termoflussimetria in edilizia storica. Relatore: Silvia Di Turi.
4. Seminario "Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica. Progetto 1.5 del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale", Roma, 28 novembre 2024, Centro Congressi Frentani. Intervento dal titolo "Efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati: analisi di casi studio reali nel Parco Archeologico dell'Appia Antica". Relatore: Silvia Di Turi.