

Ricerca di Sistema elettrico



Edifici monumentali vincolati: riqualificazione energetica e
intelligenza artificiale (LA1.6)

R. Stasi, F. Ruggiero, U. Berardi



Politecnico
di Bari

Edifici monumentali vincolati: riqualificazione energetica e intelligenza artificiale

Edifici monumentali vincolati: riqualificazione energetica e intelligenza artificiale (LA 1.6)

R. Stasi, F. Ruggiero, U. Berardi

Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design, Politecnico di Bari

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: 1.6

Responsabile del Progetto: ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: ing. Domenico Iatauro, ENEA

Responsabile Linea di Attività: PoliBa

Mese inizio previsto: Gennaio 2023

Mese inizio effettivo: Gennaio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
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	Individuazione del caso studio	12
7.2	Energy audit del caso studio	13
7.2.1	Fase preliminare di raccolta dati	13
7.2.2	Analisi della firma energetica dell'edificio	13
7.2.3	Analisi di ulteriori interventi migliorativi.....	15
7.3	Creazione modello energetico dinamico	17
7.3.1	Creazione del modello BEM	17
7.3.2	Validazione del modello	18
7.4	Ottimizzazione del funzionamento dei BACS attraverso MPC	19
7.4.1	Sviluppo dell'applicativo software	19
7.4.2	Scenari di ottimizzazione tramite MPC	21
7.5	Conclusioni	22
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	23
9	Pubblicazioni scientifiche	24
10	Eventi di disseminazione	25

Indice delle figure

Figura 1 – Localizzazione del Padiglione servizi amministrativi del Policlinico di Bari (a), Vista prospetto principale PSA (b) e prospetto posteriore (c).	12
Figura 2 – Consumi mensili per il teleriscaldamento (a) e per l'elettricità (b) negli anni analizzati.	13
Figura 3 – Profilo di consumo di riferimento per il teleriscaldamento del PSA in base ai consumi reali degli anni analizzati.	14
Figura 4 – Profilo di consumo di riferimento per l'elettricità del PSA in base ai consumi reali degli anni analizzati.....	14
Figura 5 – Percentuale di energia richiesta per servizio tecnologico per vettore energetico. .	15
Figura 6 – Strategie di riqualificazione energetica sul caso studio.....	16
Figura 7 – Modello energetico dinamico del caso studio.	17
Figura 8 – Comparazione tra i consumi simulati e misurati del caso studio con il modello energetico dinamico per il a) riscaldamento, b) raffrescamento, c) elettricità e d) illuminazione artificiale.....	18
Figura 9 – Fasi di lavoro per l'introduzione di modelli predittivi di controllo per l'ottimizzazione dei consumi energetici del caso studio.....	19
Figura 10 – Schema delle diverse librerie open source utilizzati nello sviluppo dell'applicativo software di integrazione di MPC nella gestione dei BACS.	20
Figura 11 – Schermata esemplificativa dello script Python.....	20
Figura 12 – Comparazione dei consumi energetici tra il caso base e lo scenario ottimizzato tramite MPC: a) Caso Base vs Scenario 1 (raffrescamento); b) Caso Base vs Scenario 2 (riscaldamento) e c) Caso Base vs Scenario 3 (raffrescamento).....	21

Indice delle tabelle

Tabella 1. Confronto tra i consumi calcolati e i consumi misurati per servizio in base al relativo vettore energetico.....	15
Tabella 2. Variazione percentuale per scenario dell'energia primaria totale ($EP_{gl,tot}$), non rinnovabile ($EP_{gl,nren}$), rinnovabile ($EP_{gl,ren}$) e della copertura da fonti rinnovabili (QR).	16
Tabella 3. Valutazione economica e classe energetica raggiungibile per gli scenari di riqualificazione energetica proposti.....	17

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente:

- Individuazione di un caso studio esemplare di edificio storico vincolato soggetto a riqualificazione energetica importante
- Valutazione del livello energetico attuale dell'edificio considerato raggiunto a seguito della riqualificazione energetica già attuata
- Studio di interventi aggiuntivi di riqualificazione energetica, attuabili nel rispetto dei principi di tutela del bene, ponendo particolare attenzione alla produzione di energia da fonti rinnovabili
- Realizzazione di un modello energetico dinamico del caso studio
- Sviluppo di un applicativo software per poter associare algoritmi di intelligenza artificiale che possano favorire processi predittivi di automazione, gestione e controllo remoto degli impianti tramite l'applicazione di termostati smart.

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti

- **Individuazione di un caso studio esemplare di edificio storico vincolato soggetto a riqualificazione energetica importante**

La prima fase della ricerca si è concentrata sull'individuazione di un caso studio rappresentativo di edificio storico vincolato, soggetto ad una riqualificazione energetica importante di primo livello. La scelta è ricaduta sul Padiglione dei Servizi Amministrativi del Policlinico di Bari, un edificio prevalentemente adibito a uffici costruito nel 1936 e sottoposto a vincolo architettonico dalla Soprintendenza per il suo valore storico e artistico. L'intervento di riqualificazione energetica, realizzato nel 2015, ha incluso l'ammodernamento degli impianti esistenti, l'installazione di un sistema centralizzato per il riscaldamento e il raffrescamento, il relamping e revamping del sistema di illuminazione e l'integrazione di tecnologie BACS. Queste ultime hanno compreso l'installazione di termostati e valvole smart, sensori di occupazione e luminosità, sistemi di automazione per le schermature solari mobili e l'apertura delle finestre, oltre a piattaforme di gestione remota dei BACS tra cui un sistema DALI e uno SCADA.

- **Valutazione del livello energetico attuale dell'edificio considerato raggiunto a seguito della riqualificazione energetica già attuata**

Il caso studio è stato sottoposto a un dettagliato energy audit per valutare l'attuale prestazione energetica dell'edificio raggiunto a seguito della riqualificazione energetica attuata, e calcolato attraverso modelli di simulazione validati con dati reali di consumo. La diagnosi energetica ha consentito di determinare la firma energetica dell'edificio, identificando i principali fattori che influenzano il consumo energetico e valutando la fattibilità di ulteriori interventi migliorativi. I risultati ottenuti non solo hanno fornito indicazioni utili per ottimizzare la gestione energetica dell'edificio stesso, ma rappresentano anche un benchmark di riferimento per professionisti e pubbliche amministrazioni. Spesso, infatti, i dati reali sui consumi energetici di edifici storici vincolati riqualificati sono difficilmente reperibili o poco rappresentativi, ciò rende questo studio un contributo fondamentale per la definizione di strategie di efficientamento più consapevoli e basate su evidenze concrete.

- **Studio di interventi aggiuntivi di riqualificazione energetica, attuabili nel rispetto dei principi di tutela del bene, ponendo particolare attenzione alla produzione di energia da fonti rinnovabili**

A seguito della diagnosi energetica, sono state analizzate possibili ulteriori strategie di riqualificazione energetica mirate a migliorare l'efficienza complessiva dell'edificio ponendo l'attenzione sull'integrazione di fonti energetiche rinnovabili. Sono stati studiati tre principali interventi: il primo ha previsto l'isolamento termico del solaio di copertura mediante l'applicazione di materiali isolanti ad alte prestazioni. Il secondo intervento si è concentrato sull'installazione di pannelli solari termici. Il terzo intervento ha riguardato l'integrazione di impianti fotovoltaici per l'autoproduzione di energia elettrica. I risultati hanno evidenziato miglioramenti significativi, con una riduzione dell'energia primaria non rinnovabile fino al 15.4% e un aumento della quota di energia da fonti rinnovabili pari al 39.6%.

- **Realizzazione di un modello energetico dinamico del caso studio**

Attraverso il software DesignBuilder è stato creato un modello energetico dinamico del caso studio validato con i consumi reali dell'edificio. La creazione di questo modello è stata necessaria per disporre di un gemello digitale del caso studio utile a prevedere il risparmio energetico conseguibile attraverso l'impiego dell'intelligenza artificiale. L'uso di modelli energetici dinamici in combinazione con BACS predittivi ha consentito, infatti, di valutare scenari alternativi e strategie di gestione ottimizzate prima della loro implementazione effettiva. Questo consente ai gestori degli edifici di prendere decisioni informate, riducendo il rischio di inefficienze o investimenti non ottimali. Inoltre, in edifici complessi o vincolati da normative specifiche, come quelli storici, questo approccio rappresenta un'opportunità per integrare soluzioni avanzate senza compromettere le caratteristiche architettoniche dell'edificio.

- **Sviluppo di un applicativo software per poter associare algoritmi di intelligenza artificiale che possano favorire processi predittivi di automazione, gestione e controllo remoto degli impianti tramite l'applicazione di termostati smart.**

È stata sviluppato un applicativo software attraverso l'impiego del software Python per integrare logiche di controllo predittivo nella gestione e nell'ottimizzazione di sistemi BACS. Nello specifico, tramite l'ottimizzazione basata sull'intelligenza artificiale è stata valutata la capacità dei termostati e delle valvole smart, presenti nell'edificio a seguito dell'intervento di riqualificazione, di incrementare il risparmio energetico grazie all'integrazione di modelli di controllo predittivi. Sono stati analizzati tre scenari: il primo ha riguardato la regolazione della temperatura di mandata del sistema di climatizzazione, ottimizzando l'uso dell'energia in base alle previsioni climatiche esterne, ai profili di occupazione dell'edificio e alla temperatura interna avendo come vincoli il mantenimento del comfort interno, il secondo ha esplorato l'automazione delle finestre per favorire la ventilazione naturale, riducendo il fabbisogno di raffrescamento in estate attraverso l'uso intelligente dell'apertura dei serramenti in funzione delle condizioni climatiche esterne e interne, mentre il terzo ha valutato la gestione automatizzata delle schermature solari mobili, adattandole alla previsione della radiazione solare al fine di migliorare il comfort interno e ridurre il consumo di energia per l'illuminazione artificiale e il raffrescamento. L'ottimizzazione della temperatura di mandata dell'impianto di riscaldamento attraverso modelli di controllo predittivo ha generato una riduzione del consumo per il riscaldamento pari al 19,8% (46.137,4 kWh/anno). L'ottimizzazione delle aperture dell'edificio per consentire il raffrescamento passivo tramite la ventilazione naturale ha generato una riduzione annuale di energia per il raffrescamento pari al 14% (15.923,7 kWh/anno), mentre l'ottimizzazione della gestione delle schermature solari mobili ha prodotto una riduzione del 9,9% (10.697,89 kWh/anno) del consumo per il raffrescamento.

Lista dei risultati aggiuntivi ottenuti :

- **Analisi costi-benefici delle strategie di riqualificazione energetica attraverso tecnologie tradizionali.**

È stata condotta un'analisi costi-benefici per valutare l'efficacia delle strategie di riqualificazione energetica proposte, basate sull'adozione di tecnologie tradizionali (Punto 3). I risultati hanno evidenziato che il tempo di ritorno dell'investimento varia a seconda dell'intervento considerato. Nello specifico, l'isolamento della copertura dell'edificio presenta un payback period di 13,1 anni, l'integrazione del solare termico di 9,8 anni, mentre l'installazione di un impianto fotovoltaico richiede 13,1 anni per rientrare

dell'investimento. Dal punto di vista economico, lo scenario più vantaggioso risulta essere quello che prevede l'adozione del solare termico, grazie al minor tempo di ammortamento dei costi in relazione al risparmio energetico considerato.

3 Prodotti attesi

- Report finale

4 Prodotti sviluppati

- Report finale

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

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.

6 Sintesi delle attività svolte

La ricerca si è sviluppata in quattro fasi. La I fase ha riguardato l'individuazione del caso studio. La II fase si è concentrata sulla redazione della diagnosi energetica dell'edificio atta a valutare la performance energetica del caso studio a seguito della riqualificazione energetica a cui è stato soggetto. Successivamente, si sono valutati gli interventi di riqualificazione energetica possibili in relazione ai vincoli architettonici a cui l'edificio è sottoposto, ponendo l'attenzione sull'integrazione da fonti rinnovabili. La III fase ha riguardato lo sviluppo di un modello energetico dinamico del caso studio al fine di ottenere un gemello digitale utile per l'implementazione di algoritmi di controllo e gestione dei BACS. La IV fase dello studio ha riguardato lo sviluppo e l'integrazione nel modello digitale di algoritmi di controllo predittivo per l'ottimizzazione della gestione dell'energia e dei BACS con lo scopo di incrementare il risparmio energetico negli edifici storici.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Individuazione del caso studio

La ricerca del caso studio si è concentrata sull'individuazione di un edificio storico vincolato soggetto ad una recente riqualificazione energetica e che avesse previsto nel corso della stessa l'inserimento di sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS). La scelta è ricaduta sul Padiglione dei Servizi Amministrativi (PSA) del Policlinico di Bari (Figura 1).

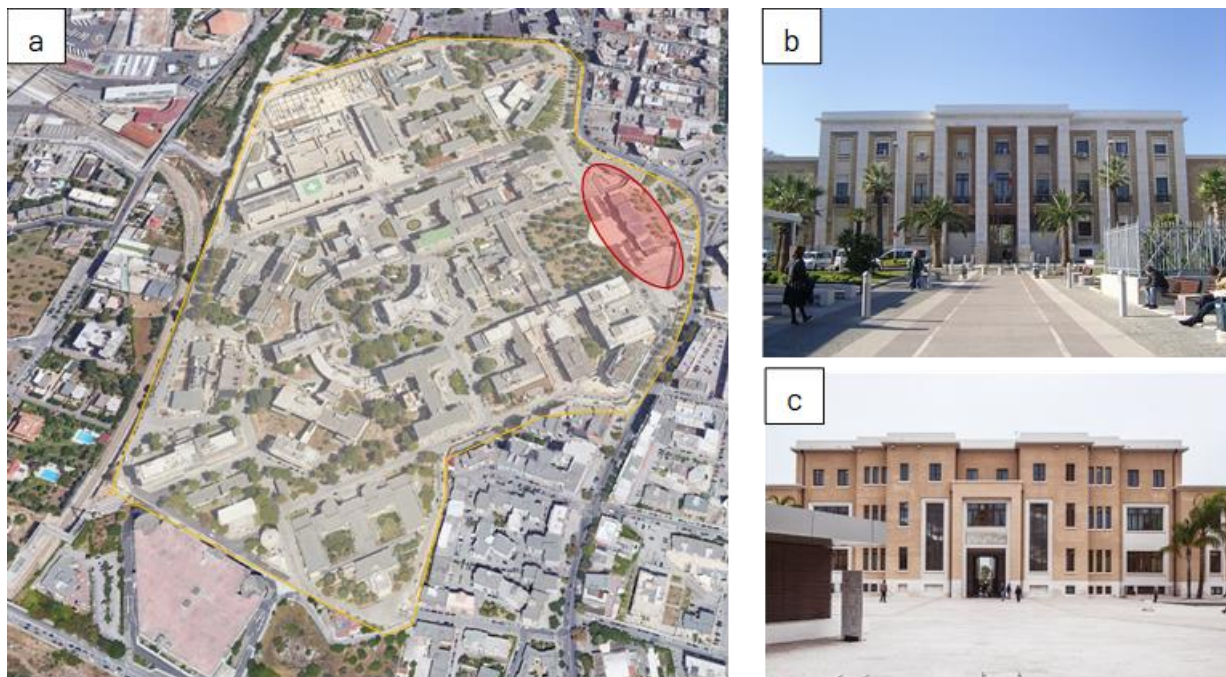


Figura 1 - Localizzazione del Padiglione servizi amministrativi del Policlinico di Bari (a), Vista prospetto principale PSA (b) e prospetto posteriore (c).

L'edificio del PSA, costruito nel 1936, è sottoposto a vincolo dalla Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio della provincia di Bari per il suo valore storico e artistico. Nel 2015 è stato oggetto di un'importante riqualificazione energetica, che ha incluso l'adeguamento e la rifunzionalizzazione della sottocentrale termica esistente mediante la sostituzione delle apparecchiature obsolete con scambiatori di calore a piastre. Inoltre, è stata realizzata una nuova sottocentrale frigorifera, dotata di due scambiatori con una potenza frigorifera di 200 kW.

L'intervento ha comportato anche la sostituzione del precedente impianto di distribuzione del riscaldamento a radiatori con un sistema centralizzato a fan coil a cassetta a 2 tubi. Parallelamente, la riqualificazione ha interessato l'involucro edilizio, rispettando i vincoli imposti dalla Soprintendenza per la conservazione delle caratteristiche architettoniche. Le modifiche autorizzate hanno incluso la sostituzione degli infissi a vetro singolo con vetri basso emissivi a doppia camera e l'installazione di controsoffittature in cartongesso per l'integrazione del nuovo sistema di distribuzione dell'impianto di condizionamento.

L'aggiornamento ha riguardato anche il sistema di illuminazione, con un relamping completo che ha introdotto apparecchi downlight a LED da 25 W, gestiti tramite un sistema DALI. Inoltre, è stato implementato un sistema SCADA per l'ottimizzazione del controllo energetico e la gestione del sistema HVAC. Questo sistema avanzato consente di regolare da remoto, attraverso sensori e attuatori, i termostati smart, la portata dell'aria condizionata, la velocità e

la temperatura di mandata degli impianti, nonché il controllo automatizzato delle aperture e delle schermature solari.

7.2 Energy audit del caso studio

7.2.1 Fase preliminare di raccolta dati

Al fine di svolgere l'energy audit del caso studio è stata condotta un'indagine approfondita per esaminare le diverse caratteristiche dell'edificio, tra cui le sue modalità di utilizzo, il livello di coinvolgimento degli occupanti, le temperature interne, i ricambi d'aria, le fonti energetiche impiegate, i consumi medi annui e le schede tecniche degli impianti. Inoltre, sono stati esaminati gli elaborati tecnici dell'edificio e analizzati i consumi attraverso le bollette degli ultimi 8 anni.

È stata, inoltre, condotta anche un'analisi storica dell'immobile per ricostruire le tecniche costruttive e i materiali utilizzati, verificando e approfondendo i vincoli storici e il loro valore culturale. L'audit energetico è stato eseguito secondo le procedure indicate nella norma EN 16247:2022. La raccolta dei dati ha consentito il reperimento dei documenti tecnici esistenti in merito a geometria e dimensione dell'edificio, elementi tecnologici ed impianti (planimetrie, disegni tecnici, schemi di impianto, abaco strutture, abaco infissi, abaco ponti termici, ecc.); certificazione energetica dell'edificio, documentazione relativa agli interventi di manutenzione/ristrutturazione precedentemente eseguiti e documentazione fotografica utili per la creazione del modello energetico dello stesso.

7.2.2 Analisi della firma energetica dell'edificio

Il modello energetico è stato elaborato in conformità alle normative UNI 52016-1:2018 e UNI/TS 11300, utilizzando i valori medi degli HDD (Heating Degree Days) e CCD (Cooling Degree Days) relativi ai tre anni precedenti e tenendo conto del tempo effettivo di funzionamento del sistema di condizionamento. La validazione dei risultati è stata effettuata confrontando il consumo medio annuo registrato nel medesimo periodo. Per garantire l'affidabilità dei dati ed evitare distorsioni dovute alla pandemia, sono stati presi in considerazione esclusivamente i consumi del triennio 2017-2019. Per validare il modello, è stato inoltre calcolato il consumo teorico dell'edificio e confrontato con i dati reali disponibili, verificando che lo scostamento tra i valori simulati e quelli effettivi fosse inferiore al 5%. La Figura 2 mostra l'andamento dei consumi relativi al teleriscaldamento e all'elettricità registrati dal PSA nei tre anni precedenti analizzati.

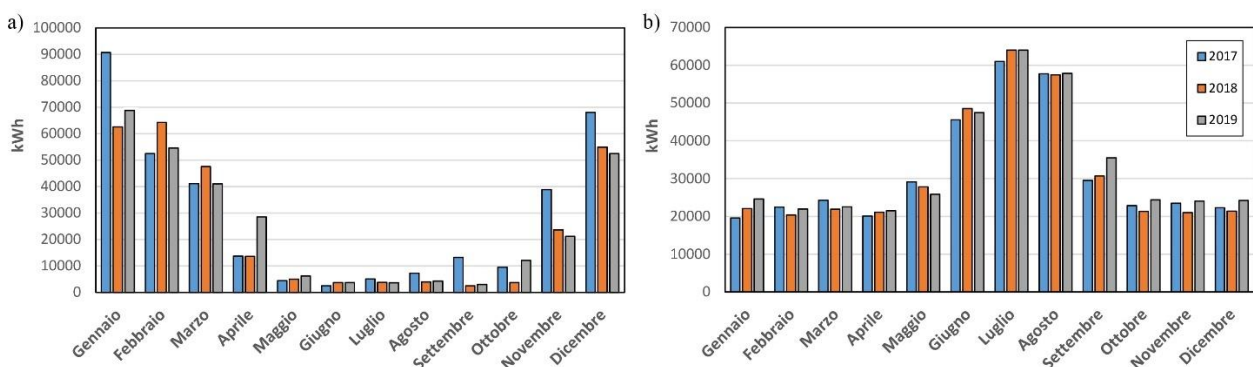


Figura 2 - Consumi mensili per il teleriscaldamento (a) e per l'elettricità (b) negli anni analizzati.

Gli andamenti dei consumi per il diverso vettore energetico sono stati rapportati ai relativi HDD e CDD degli anni analizzati al fine di ottenere una curva di consumo di riferimento da utilizzare per la calibrazione del modello di calcolo. Il *base load* calcolato risulta essere pari a 0.68 kWh/m² per il teleriscaldamento (Figura 3) e 5.08 kWh/m² per l'elettricità (Figura 4).

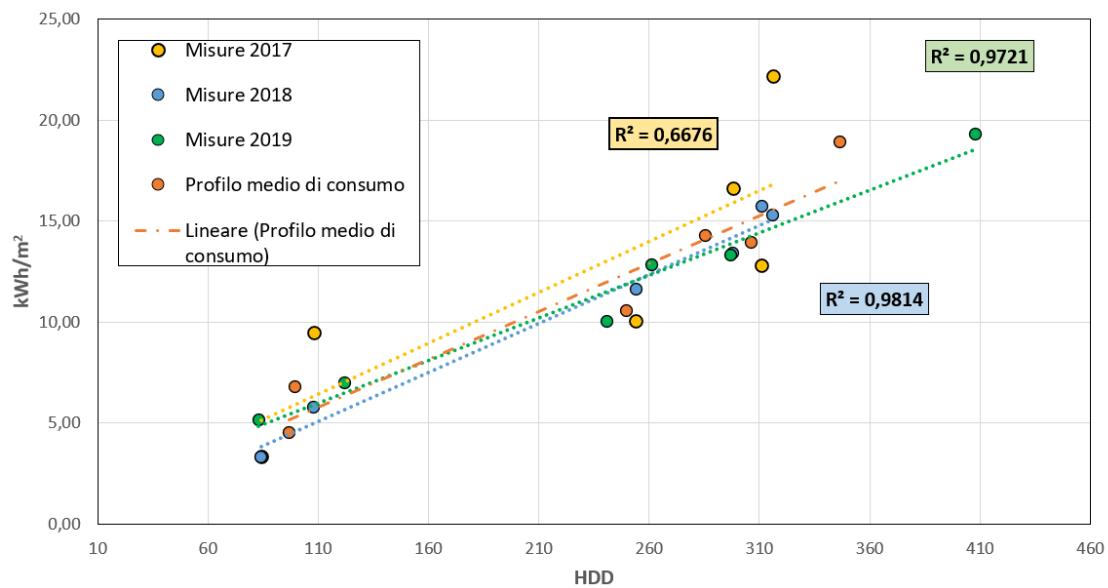


Figura 3 – Profilo di consumo di riferimento per il teleriscaldamento del PSA in base ai consumi reali degli anni analizzati.

Dal confronto tra il modello di calcolo e l'andamento dei consumi dei tre anni analizzati per servizio tecnologico in relazione al vettore energetico è possibile notare come si registri un EER (errore nel consumo energetico) inferiore al $\pm 5\%$ e nello specifico pari al 1.5% per il teleriscaldamento e -1.9% per l'elettricità (Tabella 1). Il modello così validato ha consentito il calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio. Dei 480.471 kWh di energia totale annua necessaria, il 65% è fornito dal teleriscaldamento, mentre il restante 35% dall'elettricità da rete. Nello specifico in base al servizio tecnologico per quanto concerne il totale fornito dal teleriscaldamento (310.374 kWh) il 72% è richiesto per il riscaldamento dell'edificio e il 28% per la produzione di acqua calda sanitaria (Figura 5).

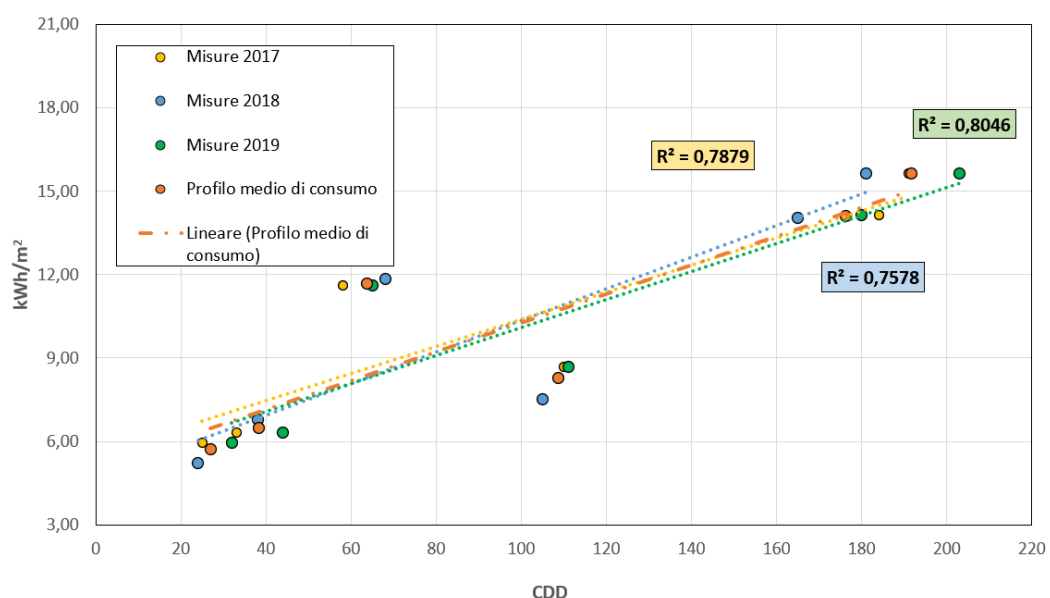


Figura 4 – Profilo di consumo di riferimento per l'elettricità del PSA in base ai consumi reali degli anni analizzati.

Analizzando la domanda di energia elettrica totale pari a 170.097 kWh risulta come la percentuale preponderante di domanda pari a 68% è al servizio del raffrescamento, mentre il riscaldamento, la produzione di ACS, la ventilazione, l'illuminamento e il trasporto incidano rispettivamente del 3%, 2%, 13% e 5%.

Tabella 1. Confronto tra i consumi calcolati e i consumi misurati per servizio in base al relativo vettore energetico.

Teleriscaldamento		Co_{calc}	Co_{reali}	EER
		<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	$\Delta\%$
Riscaldamento	<i>H</i>	224.162	221.436	1,2%
Produzione ACS	<i>ACS</i>	86.212	84.191	2,3%
Globale	<i>GL</i>	310.374	305.627	1,5%
Elettricità		Co_{calc}	Co_{reali}	EER
		<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	$\Delta\%$
Riscaldamento	<i>H</i>	16.494	16.549	-0,3%
Raffrescamento	<i>C</i>	115.495	118.931	-3,0%
Produzione ACS	<i>ACS</i>	4.380	4.345	0,8%
Ventilazione	<i>V</i>	3.282	3.256	0,8%
Illuminamento	<i>L</i>	22.224	22.037	0,8%
Trasporto	<i>T</i>	8.222	8.156	0,8%
Globale	<i>GL</i>	170.097	173.274	-1,9%

Dall'analisi dei fabbisogno, l'edificio è risultato essere in classe D con un indice di energia primaria globale non rinnovabile ($EP_{gl, nren}$) pari a 194,88 kWh/m² anno. L'indice di energia primaria totale $EP_{gl, tot}$ è pari a 211,16 kWh/m² anno con un indice di energia primaria rinnovabile ($EP_{gl, ren}$) pari a 19,00 kWh/m² anno.

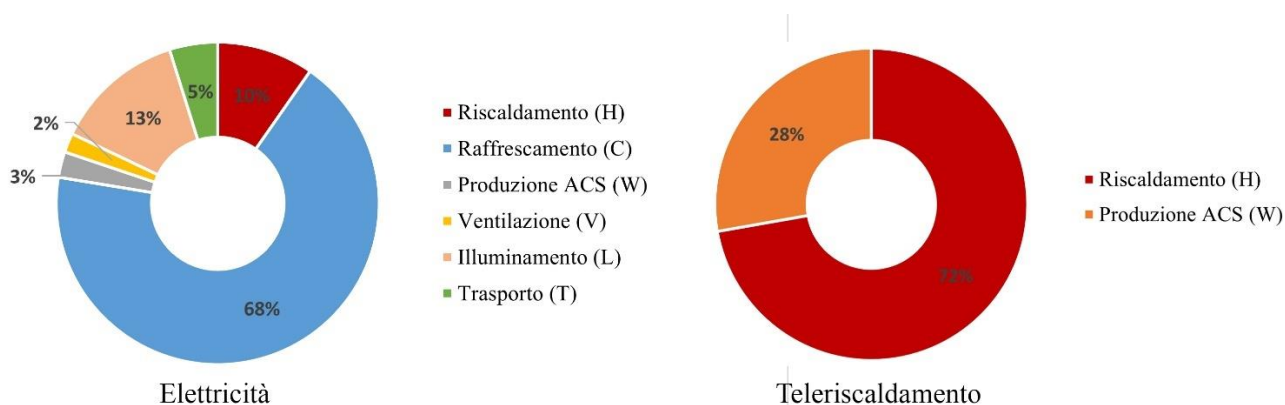


Figura 5 - Percentuale di energia richiesta per servizio tecnologico per vettore energetico.

7.2.3 Analisi di ulteriori interventi migliorativi

A seguito dell'analisi dei risultati emersi dalla diagnosi energetica, sono state individuate due categorie principali di intervento: interventi mirati alla riduzione del fabbisogno termico dell'edificio ed interventi atti alla riduzione del fabbisogno energetico da fonte non rinnovabile.

Il primo scenario (ST1) prende in esame la riduzione della trasmittanza del solaio di copertura attraverso l'aggiunta di pannelli isolanti in polistirene espanso ($\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,036 \text{ W/m}^2\text{K}$) per uno spessore totale di 0,08 m. Il secondo e il terzo scenario, rispettivamente chiamati ST2 e ST3, valutano l'integrazione di fonti rinnovabili nell'edificio (Figura 6). Nello specifico lo scenario ST2 valuta l'installazione di pannelli solari termici per la produzione di acqua calda

sanitaria per una superficie totale di 12 m² con lo scopo di ridurre il fabbisogno energetico del teleriscaldamento per la produzione di ACS. Lo scenario ST3, invece, prevede la realizzazione di tre campi fotovoltaici per una potenza di picco pari a 43 kW_p. I pannelli fotovoltaici presentano un angolo di tilt di 25°, scelto in maniera tale da incrementare la producibilità dell'impianto, ma con quota massima d'installazione inferiore a quella del parapetto esistente in modo tale che l'impianto non sia percepibile dal basso creando un'alterazione dei prospetti.

La Tabella 2 riporta la variazione percentuale di energia primaria non rinnovabile, rinnovabile e totale, nonché la percentuale di copertura di consumi (QR) da fonti rinnovabili ottenuta dai diversi scenari analizzati. Il primo scenario ST1 produce una riduzione del 14,6% dell'indice di energia prima totale, un decremento del 15,4% dell'indice di energia primaria non rinnovabile e del 6,4% di quella rinnovabile. La riduzione dei consumi totale produce un aumento della copertura da fonti rinnovabili che registra un aumento del 9,9% rispetto al caso base. Lo scenario ST2 riporta le variazioni meno significative dal punto di vista energetico. L'integrazione del solare termico produce una riduzione dell'energia primaria totale pari al 0,6% e dell'energia non rinnovabile del 2%. Si registra, invece, un aumento del 12,8% di energia prima da fonti rinnovabili e un incremento del QR pari al 13,2%. Grazie all'integrazione del fotovoltaico nell'edificio (ST3), si genera un decremento del 7,1% dell'EP_{gl,tot} e un incremento dell'EP_{gl,ren} del 29,1% e della QR del 39,6% che rappresentano i valori più alti ottenuti dai diversi scenari.

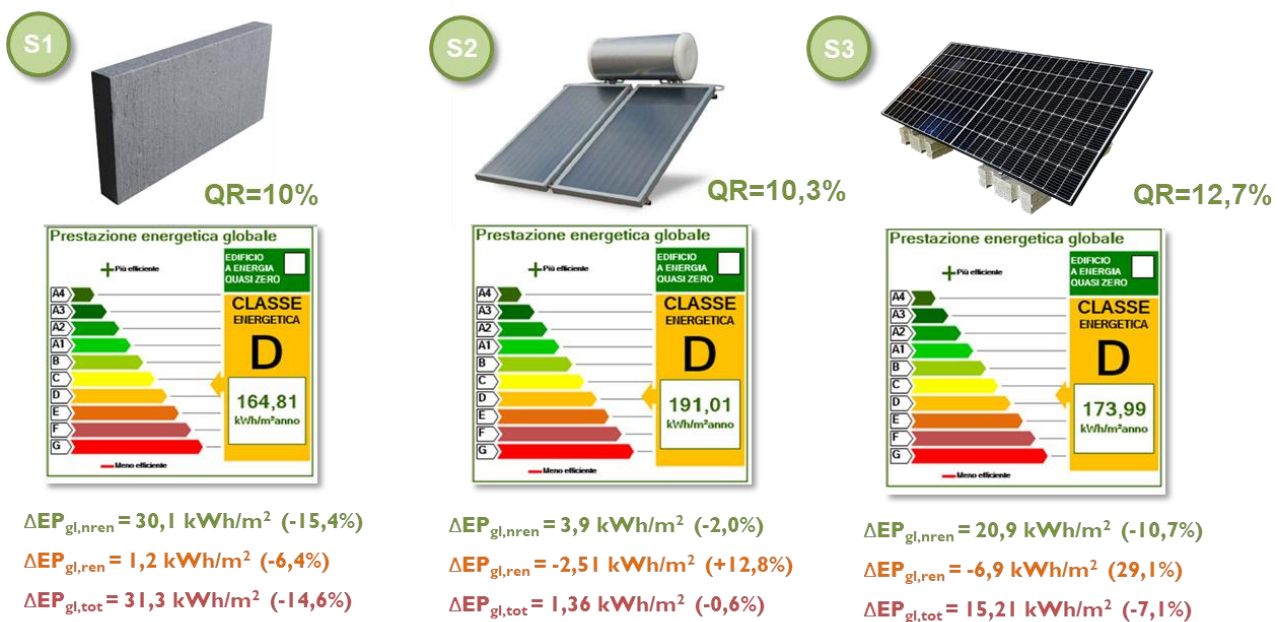


Figura 6 – Strategie di riqualificazione energetica sul caso studio.

Tabella 2. Variazione percentuale per scenario dell'energia primaria totale (EP_{gl,tot}), non rinnovabile (EP_{gl,nren}), rinnovabile (EP_{gl,ren}) e della copertura da fonti rinnovabili (QR).

Scenario	Caso base	ST1	ST2		ST3		
			Δ%	Δ%	Δ%	Δ%	
EP _{gl,nren}	194,88	164,81	-15,4%	191,01	-2,0%	173,99	-10,7%
EP _{gl,ren}	19,54	18,29	-6,4%	22,05	12,8%	25,22	29,1%
EP _{gl,tot}	214,42	183,11	-14,6%	213,06	-0,6%	199,21	-7,1%
QR	9,1	10	9,9%	10,3	13,2%	12,7	39,6%

Si è valutato, inoltre, la convenienza economica dei diversi interventi di riqualificazione considerando il costo di investimento iniziale (I_c) in relazione al risparmio economico conseguibile dalla riduzione dei consumi energetici (ΔS_{gl}). La Tabella 3 riporta il tempo di ritorno semplice (PBT) dei diversi investimenti per ogni scenario.

Tabella 3. Valutazione economica e classe energetica raggiungibile per gli scenari di riqualificazione energetica proposti.

Id	Descrizione	I_c	ΔS_{gl}	t_r	$\Delta EP_{gl,nren}$	Classe energetica
		[€]	[€/anno]	anni	[kWh/m ² anno]	[-]
ST1	Coibentazione copertura	115.398,5	8.827,21	13,1	30,70	D
ST2	Installazione solare termico	9.000,0	920,63	9,8	3,87	D
ST3	Installazione Fotovoltaico	143.624,0	10.955,35	13,1	20,89	D

Il tempo di ritorno dell'investimento per lo scenario ST1 risulta essere pari a 13.1 anni, per lo scenario ST2 di 9.8 anni, per lo scenario ST3 di 13.1 anni. Dal punto di vista economico l'investimento più vantaggioso risulta essere, quindi, quello previsto dallo scenario ST2. Dal punto di vista ambientale i diversi scenari producono una riduzione delle emissioni di CO₂ rispetto al caso base pari al 11.4% con lo scenario ST3, 1.9% con lo scenario ST2 e del 15% con lo scenario ST1.

7.3 Creazione modello energetico dinamico

7.3.1 Creazione del modello BEM

La III fase del progetto ha riguardato la creazione del modello energetico dinamico dell'edificio oggetto di studio. L'edificio è stato modellato con tutte le sue caratteristiche geometriche, termo-fisiche, impiantistiche, di destinazioni d'uso e di occupazione nel software DesignBuilder (Figura 7). La realizzazione del modello energetico dinamico è stata necessaria per la creazione di un gemello digitale del caso studio al quale applicare le strategie di ottimizzazione di gestione dei BACS attraverso modelli predittivi di controllo, al fine di valutare il risparmio energetico conseguibile implementando l'intelligenza artificiale nella gestione energetica degli edifici storici.

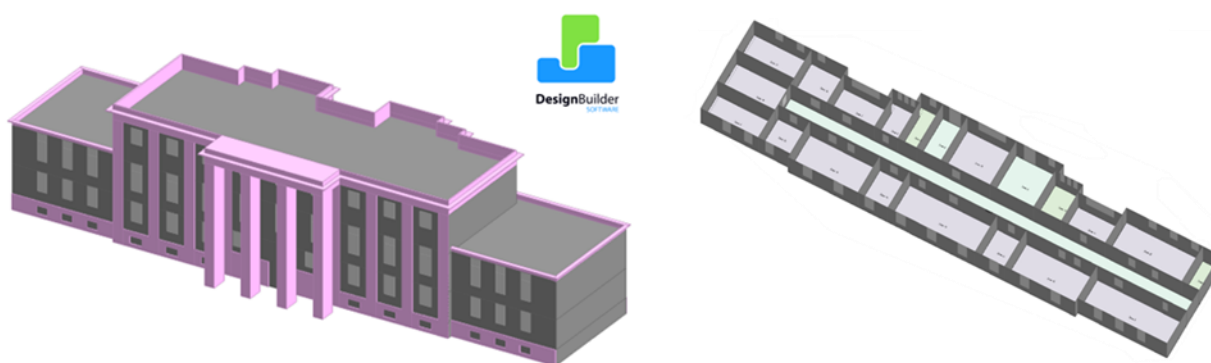


Figura 7 - Modello energetico dinamico del caso studio.

7.3.2 Validazione del modello

Il modello energetico dinamico è stato validato secondo la metodologia D dell'ASHRAE Guidelines 14-2023, verificando che gli indici MBE (*Mean Bias Error*) e CV(RMSE) (*Coefficient of Variation*) tra i valori mensili simulati e misurati fossero inferiori rispettivamente al $\pm 5\%$ e al 10%. Per il confronto con i dati misurati sono stati utilizzati i consumi monitorati su base mensile dell'anno 2023.

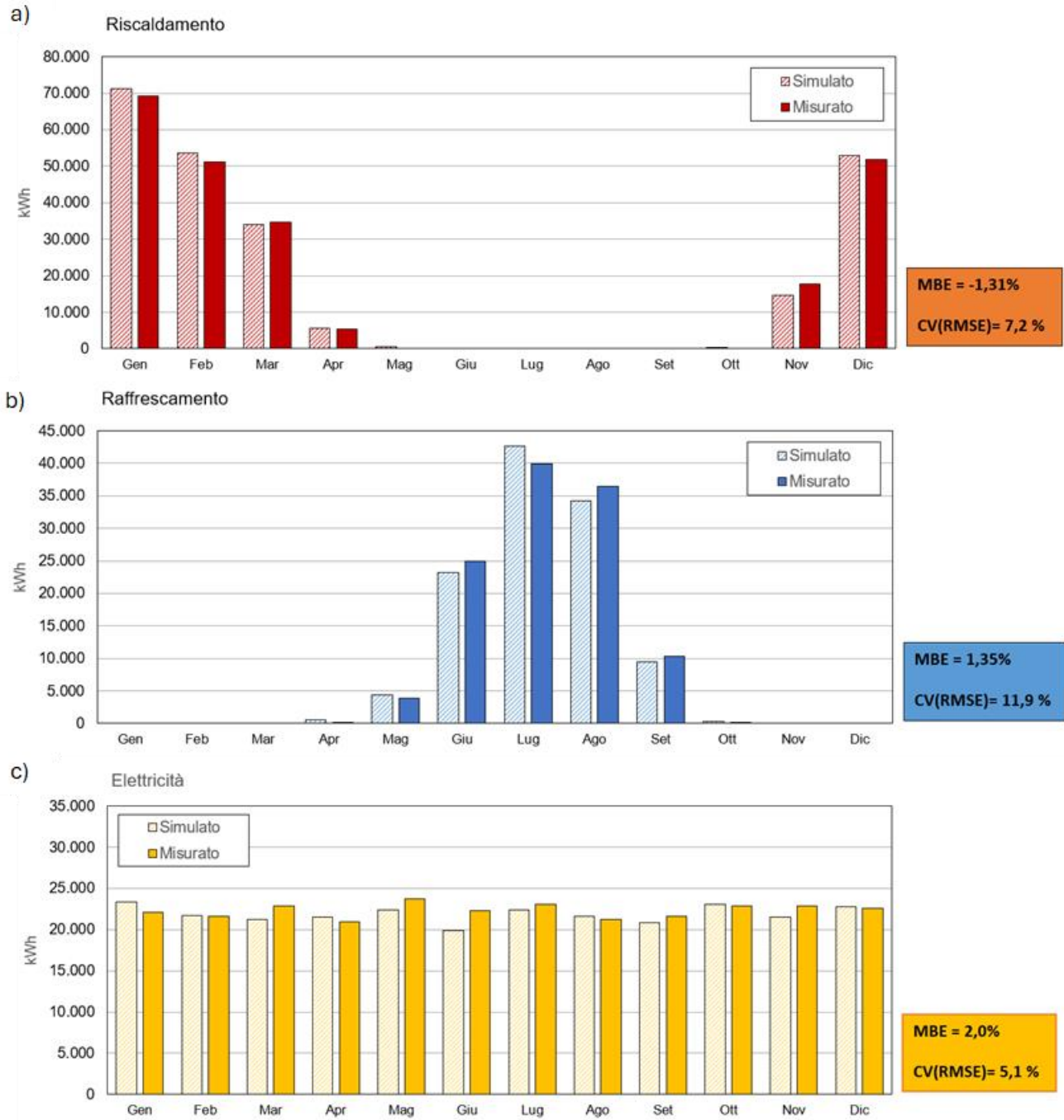


Figura 8 – Comparazione tra i consumi simulati e misurati del caso studio con il modello energetico dinamico per il a) riscaldamento, b) raffrescamento, c) elettricità e d) illuminazione artificiale.

Nel modello energetico sono stati implementati i dati climatici orari relativi alla città di Bari forniti dal CTI(UNI 10349), appositamente elaborati per creare un file climatico orario tramite il software Meteonorm v.8. La Figura 8 mostra il confronto tra i consumi simulati e misurati

rispettivamente per il riscaldamento, per il raffrescamento, per l'illuminazione e per l'elettricità. Tutti i valori risultano in linea con le prescrizioni.

7.4 Ottimizzazione del funzionamento dei BACS attraverso MPC

7.4.1 Sviluppo dell'applicativo software

Costruito e validato il modello energetico, nella IV fase si è proceduto allo sviluppo di un applicativo software in grado di integrare l'intelligenza artificiale attraverso modelli di controllo predittivo nella gestione e ottimizzazione del comportamento energetico del gemello digitale del caso studio. Il MPC utilizza modelli matematici per prevedere il comportamento termico dell'edificio basandosi su dati storici, previsioni meteorologiche future, profili di occupazione e altri fattori. Ciò consente di anticipare i carichi termici e ottimizzare l'uso degli impianti. Attraverso le logiche di controllo predittivo, è possibile, quindi, ottimizzare le variabili di controllo (ad esempio, posizione delle schermature, temperatura di mandata degli impianti, velocità dei ventilatori) su un orizzonte temporale orario in base alle previsioni di variabili esterne ed interne quali ad esempio le condizioni climatiche o il livello di occupazione dell'edificio, in modo da soddisfare i seguenti criteri:

- Minimizzare un costo (energia, comfort...).
- Rispettare vincoli fisici e operativi (ad esempio, limiti di temperatura, limiti sulle posizioni delle schermature).

La Figura 9 sintetizza l'integrazione tra le diverse fasi del progetto fino all'introduzione dei modelli di controllo predittivo tramite l'ecosistema Python nel modello energetico del caso studio.

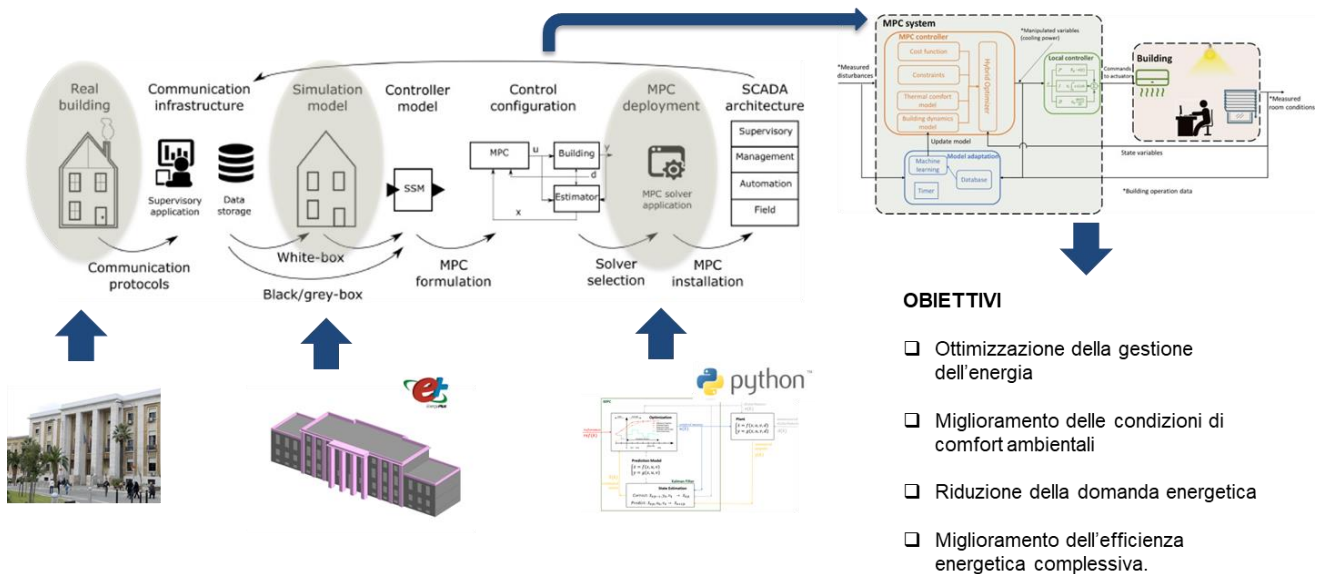


Figura 9 – Fasi di lavoro per l'introduzione di modelli predittivi di controllo per l'ottimizzazione dei consumi energetici del caso studio.

Per lo sviluppo del codice in Python sono state implementate diverse librerie open source già presenti nel database dell'applicazione (Figura 10). Nello specifico, l'API chiamata "pyEnergyPlus" che consente l'avvio della simulazione energetica dell'edificio inserendo il file .idf e .epw. e l'API "SciPy" che consente la risoluzione di problemi multi variabile di ottimizzazione attraverso il metodo di ottimizzazione SLSQP (*Sequential Least Squares Programming*).

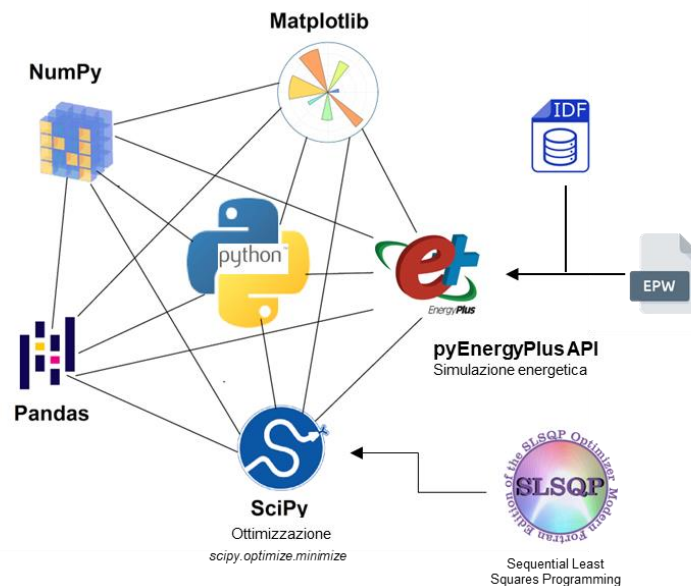


Figura 10 – Schema delle diverse librerie open source utilizzati nello sviluppo dell'applicativo software di integrazione di MPC nella gestione dei BACS.

Nello script (Figura 11) sviluppato sono state inserite come funzione obiettivo una funzione di minimizzazione dei costi (consumo energia); come vincoli il mantenimento del comfort interno nei limiti della categoria II della UNI EN 16798:1 o dell'illuminamento interno e in base alla strategia di ottimizzazione utilizzata, come variabili previsionali, la temperatura esterna, la radiazione solare o la velocità del vento e come variabili di sistema la temperatura di mandata del sistema di riscaldamento, la percentuale di superficie apribile delle chiusure trasparenti e la percentuale di attivazione delle schermature mobili presenti nell'edificio.

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
from pyenergyplus.api import EnergyPlusAPI

# Parametri generali
prediction_horizon = 12 # Orizzonte predittivo (ore)
time_step = 1 # Passo temporale (ore)
comfort_temp = 21 # Temperatura interna target (°C)
comfort_margin = 2 # Margine accettabile (±°C)

# Previsione delle condizioni esterne (esempio)
forecasted_ambient_temp = [30, 28, 27, 26, 25, 25, 24, 23, 22, 22, 21, 21]
forecasted_solar_radiation = [500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50, 20, 10]

# Wrapper per EnergyPlus
class EnergyPlusSimulation:
    def __init__(self, idf_file, weather_file):
        self.api = EnergyPlusAPI()
        self.runtime = self.api.runtime
        self.idf_file = idf_file
        self.weather_file = weather_file
        self.temperature_data = []
        self.energy_data = []
```

Figura 11 – Schermata esemplificativa dello script Python.

Sono stati sviluppati tre diversi script per tre diverse strategie di ottimizzazione della gestione dei BACS implementati nell'edificio grazie all'impiego dei termostati smart presenti. La prima strategia (S1) esplora l'ottimizzazione di attuatori meccanici sulle finestre per consentire l'automazione della loro apertura al fine di ridurre il carico di raffrescamento per mezzo della

ventilazione naturale. Questa strategia prevede la regolazione dell'angolo di apertura della finestra (max 30%) in risposta alle fluttuazioni della temperatura esterna e interna. La seconda logica (S2) si concentra sulla regolazione della temperatura di mandata dei fan coil. Simulando il timestep successivo con il file meteo previsionale (temperatura esterna, occupazione), si è valutata la riduzione della temperatura di erogazione del sistema di riscaldamento mantenendo il livello di comfort entro il range prestabilito. La terza logica (S3) valuta l'ottimizzazione della gestione automatica delle schermature mobili in base alla radiazione solare prevista nel timestep successivo, alla temperatura interna e all'illuminamento medio degli ambienti.

7.4.2 Scenari di ottimizzazione tramite MPC

La Figura 12 mostra i risultati di risparmio energetico su base mensile conseguibili attraverso la gestione ottimizzata dei BACS grazie all'impiego di logiche di controllo predittivo.

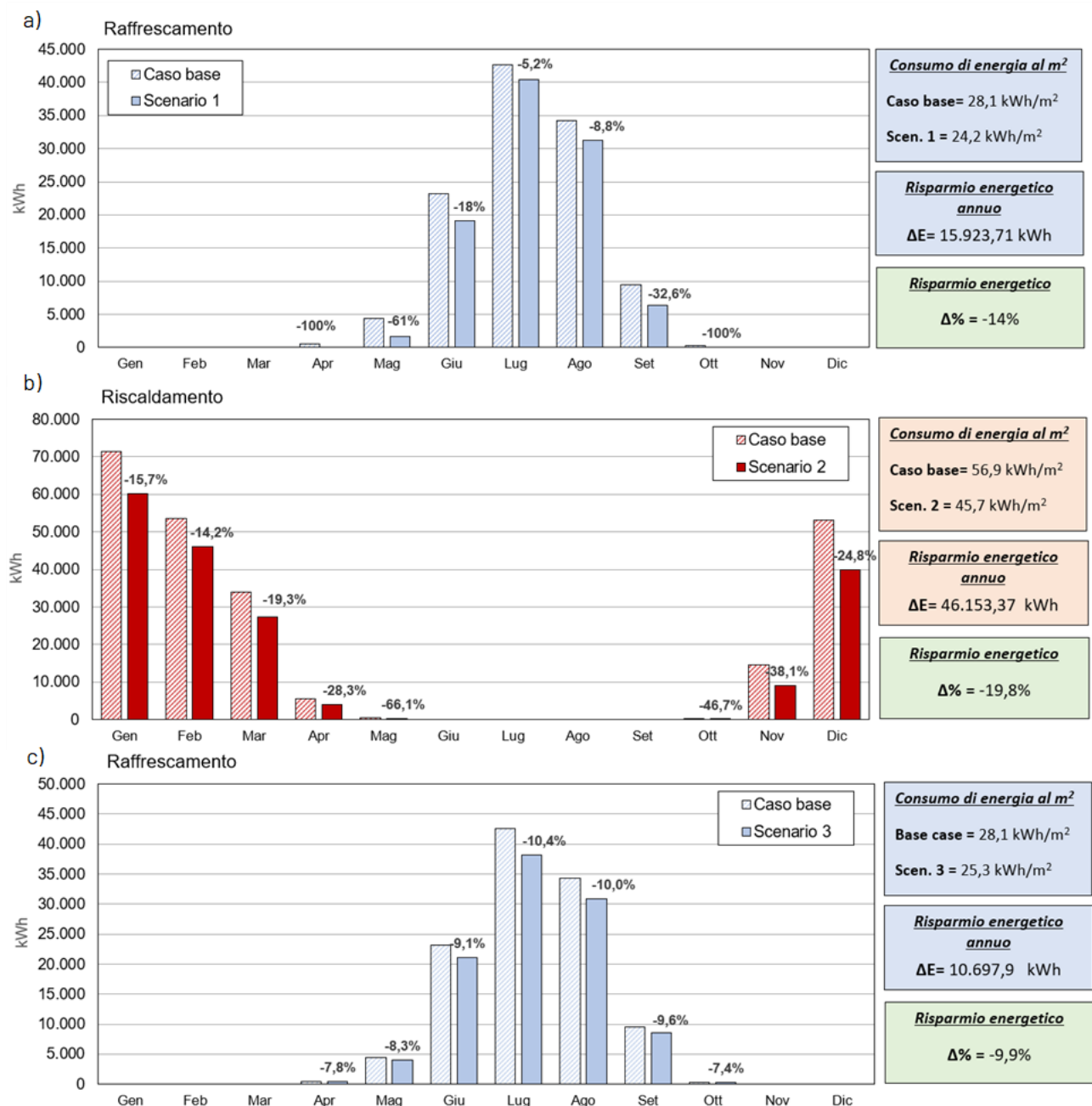


Figura 12 - Comparazione dei consumi energetici tra il caso base e lo scenario ottimizzato tramite MPC: a) Caso Base vs Scenario 1 (raffrescamento); b) Caso Base vs Scenario 2 (riscaldamento) e c) Caso Base vs Scenario 3 (raffrescamento).

Nello specifico l'ottimizzazione delle aperture dell'edificio per consentire il raffrescamento passivo tramite la ventilazione naturale genera una riduzione annuale di energia per il raffrescamento pari al 14% (15.923,7 kWh/anno).

L'ottimizzazione della temperatura di mandata dell'impianto di riscaldamento genera una riduzione del consumo per il riscaldamento pari al 19.8% (46.137,4 kWh/anno). L'ultima strategia che prevede l'ottimizzazione della gestione delle schermature mobili delle chiusure trasparenti genera una riduzione del 9.9% (10.697,89 kWh/anno) del consumo per il raffrescamento

7.5 Conclusioni

Il presente lavoro attraverso un modello di calcolo validato da dati di consumo reali di un edificio storico vincolato dimostra la significativa potenzialità del patrimonio edilizio storico di poter migliorare le proprie prestazioni energetiche in ottica degli obiettivi di neutralità climatica dell'Unione europea. Come dimostrato dall'audit energetico attraverso interventi di riqualificazione tradizionali l'obiettivo della neutralità energetica per gli edifici storici vincolati risulti essere ancora molto complessa da raggiungere. In questo contesto, l'uso dei BACS negli edifici storici rappresenta una soluzione tecnologica efficace per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio, non richiedendo interventi invasivi e rispettando il valore culturale e architettonico e storico degli edifici vincolati. Strategie di gestione dei BACS attraverso l'intelligenza artificiale e i modelli di controllo predittivo consentono di ottimizzare il loro funzionamento incrementando fino al 20% il risparmio energetico conseguibile dall'edificio.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state previste consulenze per lo svolgimento delle attività descritte.

9 Pubblicazioni scientifiche

- R. Stasi, F. Ruggiero and U. Berardi, "Assessing the Energy Saving Potential of Historical Buildings Heritage in Mediterranean Climate," 2024 IEEE International Humanitarian Technologies Conference (IHTC), Bari, Italy, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/IHTC61819.2024.10855102.
- S. Semeraro, F. Vecchi, R. Stasi, U. Berardi, "Physics-Informed Neural Networks for Thermal Comfort Optimization in Historic Buildings: Development of a User-Friendly Web Tool", Energy and Building, Elsevier (under review).

10 Eventi di disseminazione

- International Conference on Construction, Energy, Environment and Sustainability - CEES 2025 - Bari, Italy, 11 -13 June 2025. Titolo memoria : *"Optimizing Energy Efficiency in Historical Buildings Using Model Predictive Control for Building Automation and Control Systems"* - Relatore: R.Stasi.
- 2024 IEEE International Humanitarian Technologies Conference (IHTC), 27-30 November 2024, Bari, Italy, 2024. Titolo memoria : *"Assessing the Energy Saving Potential of Historical Buildings Heritage in Mediterranean Climate."* - Relatore: R.Stasi.
- Convegno ENEA- "Piano Triennale di Realizzazione della Ricerca di Sistema elettrico nazionale | I risultati dei progetti 1.5 e 1.6", 26-28 Novembre 2024, Roma. Titolo memoria : *"Edifici monumentali vincolati: riqualificazione energetica e intelligenza artificiale- Risultati finali"* - Relatore R.Stasi.
- 19th SDEWES conference. Roma, 8-12 Settembre 2024. Titolo memoria : *"Energy simulation and refurbishment proposals for modelling archetypes of Italian historical buildings: enhancing UBEM analysis"* - Relatore: Simona Semeraro
- Convegno ENEA "Progettare la riqualificazione energetica degli edifici storici", 19 Ottobre 2023, Fiera delle Costruzioni SAIE, Bari. Titolo memoria : *"Edifici monumentali vincolati: riqualificazione energetica e intelligenza artificiale. Il caso studio del Policlinico di Bari"* - Relatore R.Stasi.
- 39° Convegno Nazionale AiCARR -"Riqualificazione energetica del patrimonio edilizio: soluzioni tecniche e finanziarie". Napoli, 8 Settembre 2023. Titolo memoria : *"Valutazione energetica ed economica della riqualificazione di un edificio storico nel sud Italia: il caso del Padiglione dei servizi amministrativi del Policlinico di Bari."* - Relatore R.Stasi.