



POLITECNICO
MILANO 1863

Progetto di Sostenibilità Ambientale ed Energetica della Basilica di San Pietro

Definizione dei possibili scenari di intervento finalizzati alla riduzione delle emissioni di CO₂

Niccolò Aste, Claudio Del Pero, Fabrizio Leonforte



«Ma ridurre l'uso dei combustibili fossili è sufficiente per risolvere i problemi che minacciano la sopravvivenza del pianeta, oltre che dei nostri figli e nipoti, che lo abitano e lo abiteranno?»

Federico M. Butera, «Affrontare la complessità. Per governare la transizione ecologica», 2021



Metodologia

Obiettivi

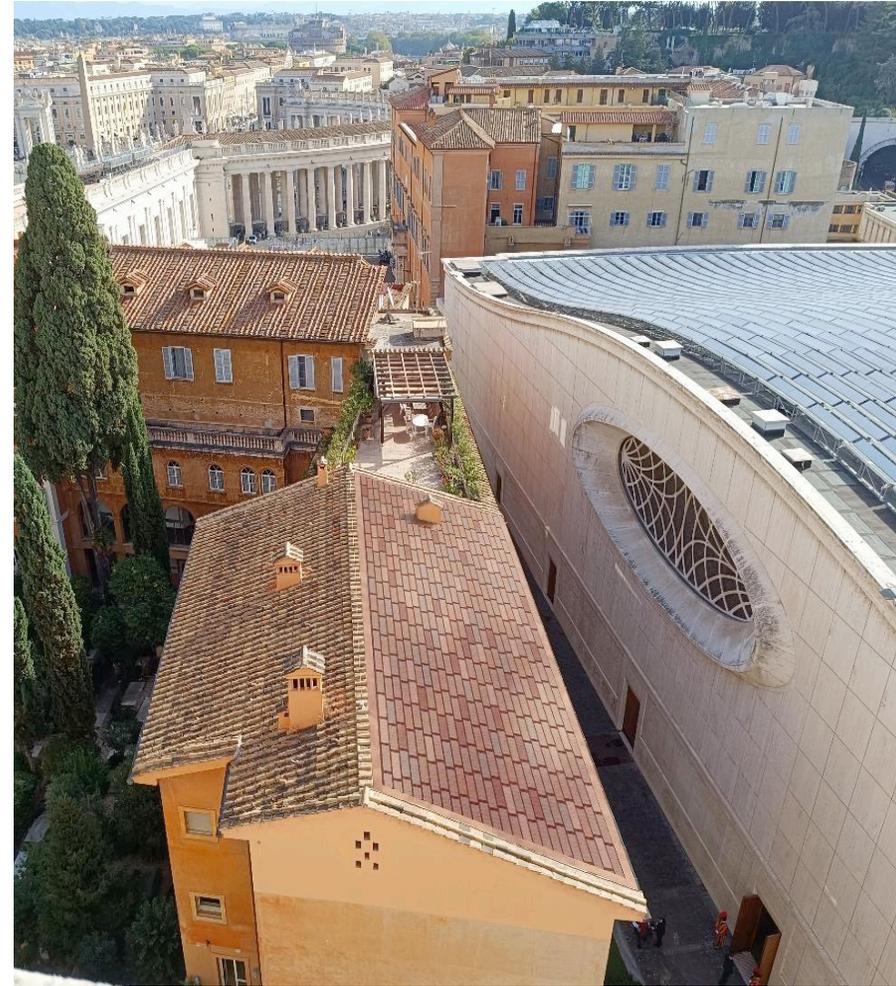
Descrivere i **possibili scenari di intervento** finalizzati alla riduzione delle emissioni di CO₂ in atmosfera (**decarbonizzazione**).

Più nel dettaglio, sono stati analizzati i **consumi energetici** del **Palazzo della Canonica**, dello **Studio del Mosaico** e della **Basilica di San Pietro** ed è stata poi elaborata una **strategia di compensazione delle emissioni**.

Sono state anche ipotizzate le possibili **soluzioni di efficientamento e mitigazione**, quantificandone i benefici in termini energetici, ambientali ed economici.

Misure di efficientamento

Nello studio sono stati presi in considerazione solamente **interventi migliorativi** dal punto di vista **impiantistico e bioclimatico**, escludendo a priori interventi di efficientamento dell'involucro, ritenuti impraticabili considerando il contesto storico-artistico di intervento.





Basilica di San Pietro in Vaticano

IN HONOREM PRINCIPIS APOST PAVLVS V BVRGHESIVS ROMANVS PONT MAX AN MDC XII PONT VII



Rilievo stato di fatto



Soluzioni proposte

Si sono studiate soluzioni per l'**efficientamento dell'impianto di illuminazione** delle navate laterali tramite lampade a LED e nello studio di un sistema di **ventilazione naturale** per il rinnovo dell'aria interna ed il raffrescamento estivo.



A wide-angle photograph of the Palazzo della Canonica in Rome, Italy. The building is a large, multi-story structure with a classical facade, featuring a prominent dome and a balcony. The sky is blue with scattered white clouds. In the foreground, a paved square is visible, with a few people and cars. To the left, a portion of another building with a white statue is visible. To the right, there is a large green tree and a small black structure.

Palazzo della Canonica



Rilievo stato di fatto

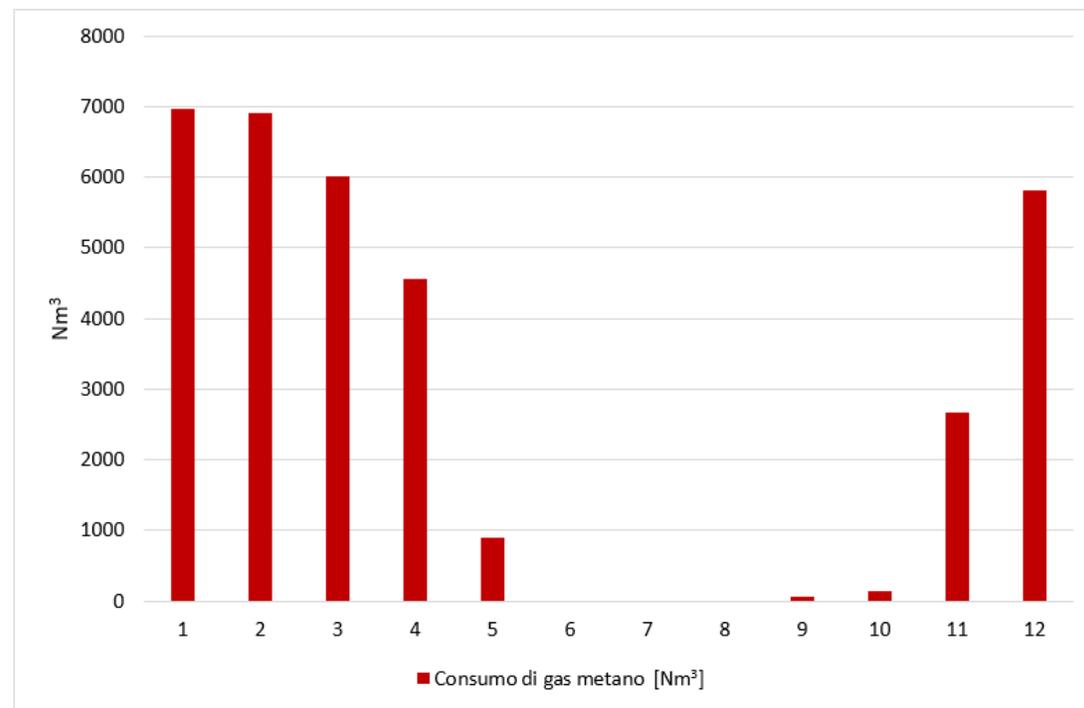


Analisi dei consumi attuali (riscaldamento)

Come anticipato, i consumi attuali per il riscaldamento dell'edificio sono stati ricavati sulla base delle **bollette** degli anni 2022 e 2023.

Mentre per l'anno 2022 i consumi fatturati mensilmente dal fornitore risultano prevalentemente stimati, quelli dell'anno 2023 sono stati acquisti mediante letture effettive dei contatori. Per tale ragione, nelle analisi riportate **si è fatto riferimento al solo anno 2023**.

In particolare, per il 2023 risulta un consumo totale di circa 34.000 Nm³, equivalenti a circa **380 MWh termici**, considerando un potere calorifico medio del gas naturale di 40 MJ/Nm³.



Analisi dei consumi attuali (energia elettrica)

La gestione dei carichi di raffrescamento è demandata ad **impianti delocalizzati ad espansione diretta**. Non essendo disponibile un inventario esaustivo di tali impianti ed un monitoraggio puntuale dei relativi consumi, quest'ultimi sono stati desunti calcolando la differenza degli assorbimenti elettrici riportati nelle fatture di fornitura dell'energia elettrica del secondo quadrimestre (maggio, giugno, luglio e agosto) rispetto a quelle del primo e del terzo quadrimestre.

Nel dettaglio, si riportano i dati riepilogativi, dai quali si può assumere un consumo medio per **raffrescamento** pari a circa **22.000 kWh elettrici** all'anno.

È possibile dunque desumere che i consumi legati a tutte le **altre utenze elettriche** (apparecchiature, illuminazione, ecc.), quindi ad esclusione di quelli imputabili alla climatizzazione estiva risultano pari a circa **104.000 kWh/anno elettrici**.

	2022	2023	Media
1° quadrimestre [kWh _{el}]	20.244	22.188	21.216
2° quadrimestre [kWh _{el}]	49.356	41.643	45.499
3° quadrimestre [kWh _{el}]	23.700	27.826	25.763

Consumi di energia elettrica per forza motrice (inclusi climatizzatori)

	2022	2023	Media
1° quadrimestre [kWh _{el}]	12.456	9.807	11.131
2° quadrimestre [kWh _{el}]	10.163	13.076	11.619
3° quadrimestre [kWh _{el}]	11.094	11.931	11.512

Consumi di energia elettrica per illuminazione

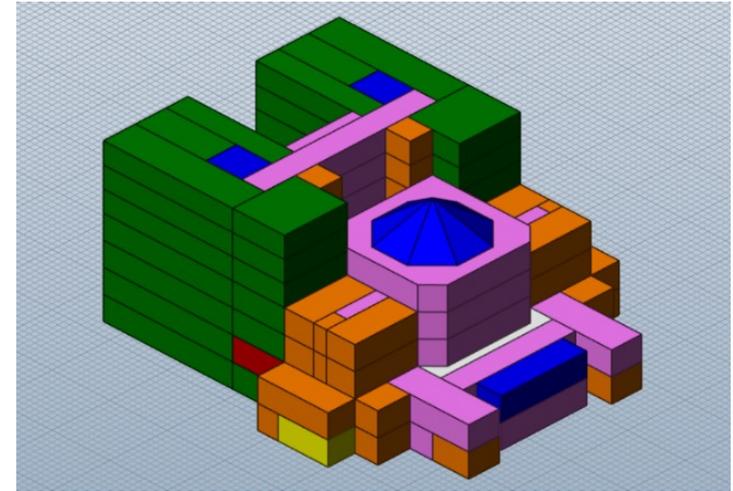


Modellazione energetica dell'edificio

Poiché i modelli di simulazione di tipo stazionario presentano una precisione molto minore (ovvero una maggiore variabilità rispetto ai consumi reali) rispetto a quelli dinamici, al fine di ottenere una stima il più possibile realistica della prestazione energetica ottenibile mediante gli scenari di intervento analizzati, si è creato **un modello di calcolo per la simulazione energetica in regime dinamico** attraverso il software EnergyPlus.

Fasi di lavoro:

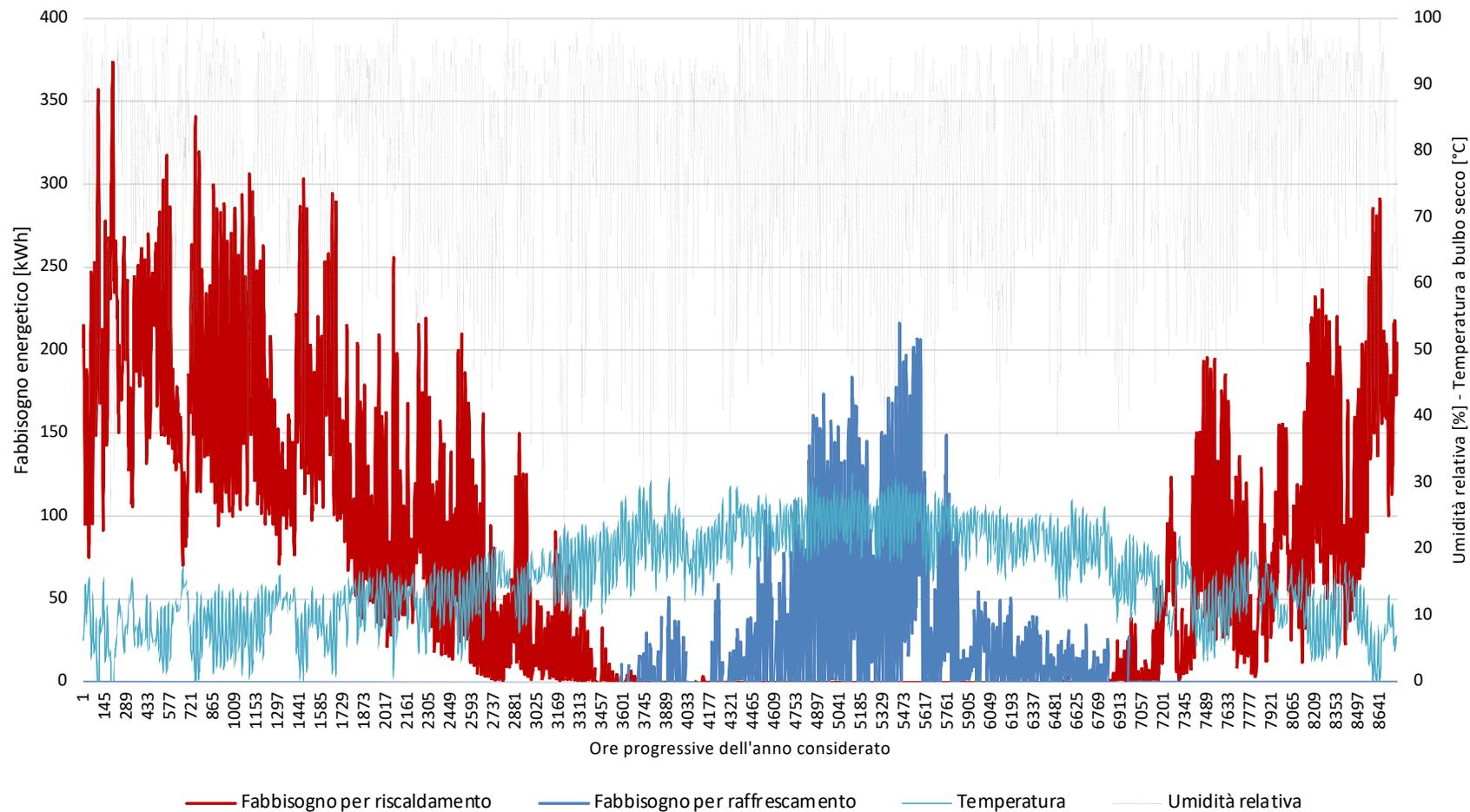
1. **realizzazione del modello** di calcolo virtuale dello stato di fatto;
2. **validazione e calibrazione** dei risultati rispetto ai dati reali;
3. **stima delle prestazioni energetiche** degli scenari di intervento;
4. **stima delle prestazioni economiche** degli scenari di intervento.



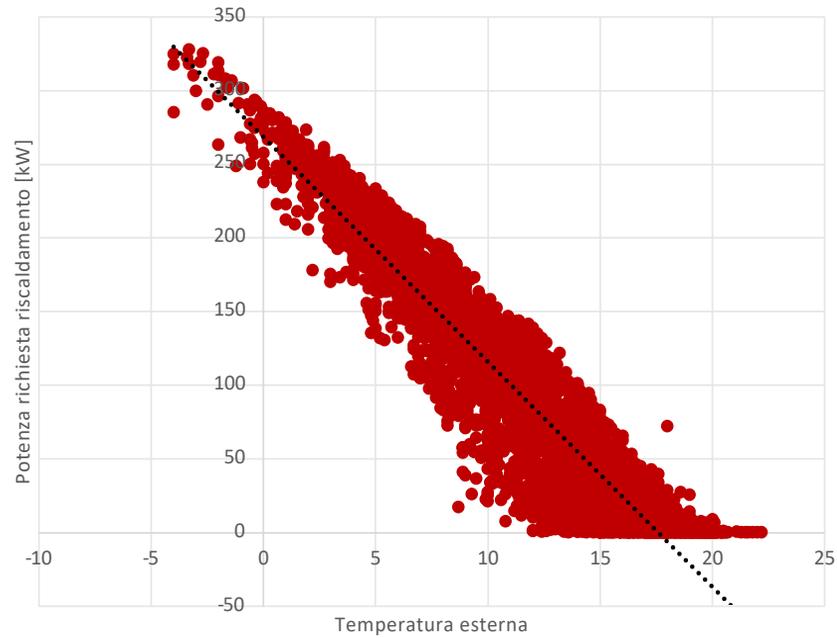
Il **modello energetico** è stato realizzato suddividendo i diversi ambienti in zone omogenee per funzione, impianto tecnologico a proprio servizio ed esposizione. In tal senso sono state create **144 zone termiche** rappresentative dei diversi ambienti dell'edificio.



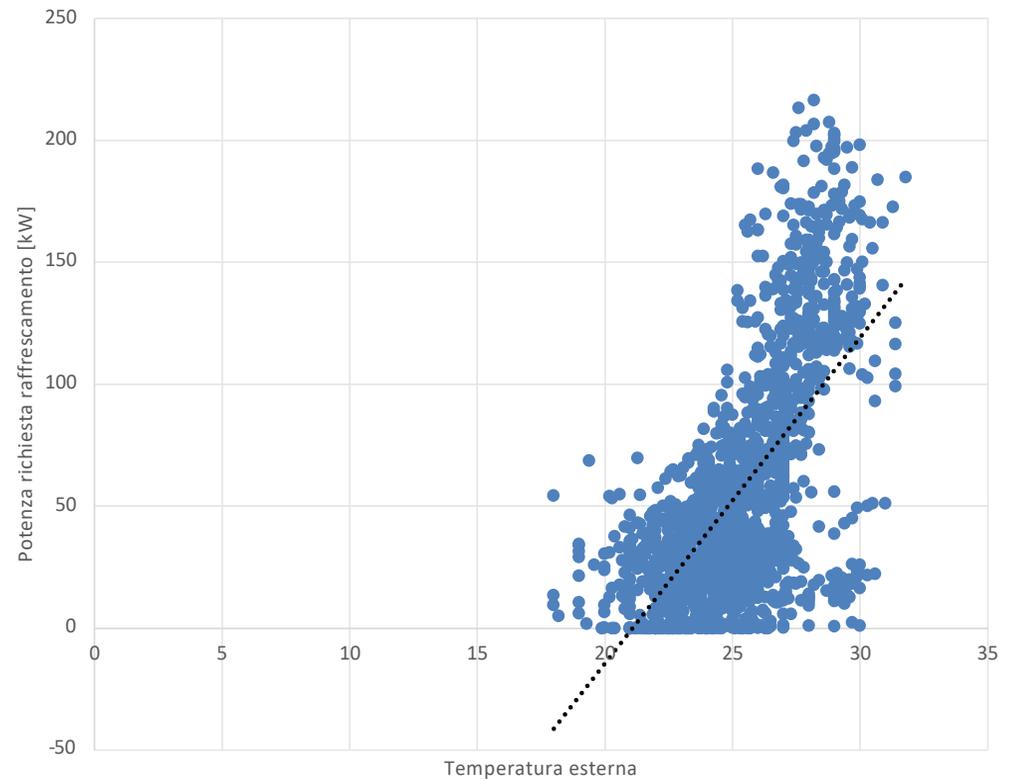
Andamento orario dei fabbisogni termici



Stima dei carichi termici di picco



Riscaldamento



Raffrescamento



Proposta di intervento – Terminali in ambiente

Si prevede la **sostituzione** di tutti i terminali idronici esistenti (termosifoni e fan coil) con **terminali di tipo “waterloop”**, costituiti da pompe di calore del tipo acqua-aria delocalizzate e connesse alla medesima **rete idronica attualmente presente nell’edificio**.

Mediante i terminali proposti è possibile fornire **riscaldamento, raffrescamento e deumidificazione** in tutti gli ambienti in modo totalmente autonomo.

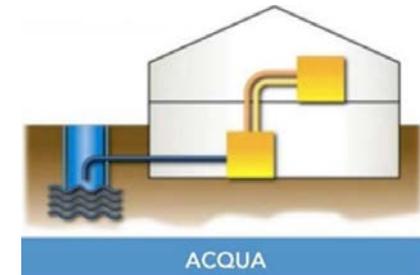
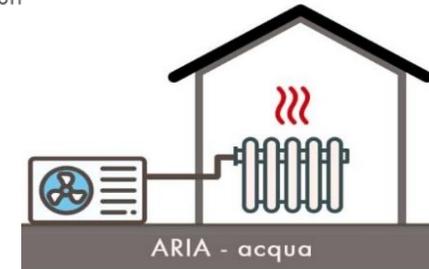
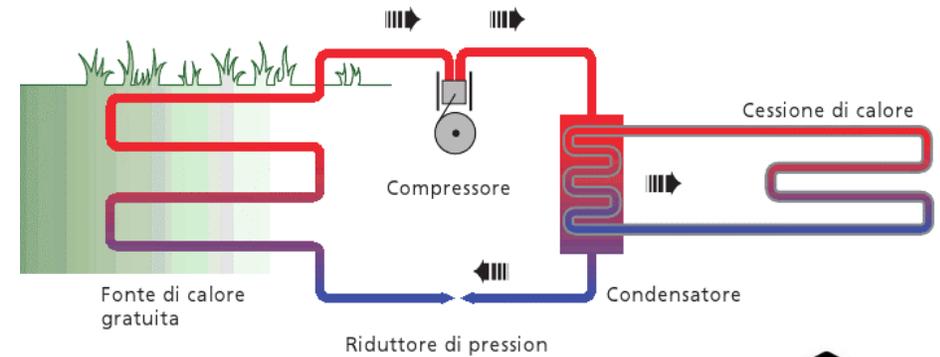
Ciascun terminale è in grado di prelevare energia termica (nel periodo invernale) dal circuito idronico ed immetterla nel medesimo circuito (nel periodo estivo), il quale viene mantenuto ad una temperatura neutra, pari a circa 20°C durante tutto l’anno, **evitando quindi dispersioni termiche o fenomeni di condensa anche in assenza di coibentazione delle tubazioni**. Ciò consente quindi di non dover sostituire l’attuale impianto idronico di distribuzione, che implicherebbe interventi abbastanza invasivi. Tale ipotesi prevede tuttavia una verifica sull’integrità e sullo stato di manutenzione delle tubazioni esistenti.



Proposta di intervento – Sistema di generazione

Le attuali caldaie a gas naturale a servizio dell'impianto di riscaldamento saranno sostituite con pompe di calore reversibili a compressione di vapore, secondo 2 scenari:

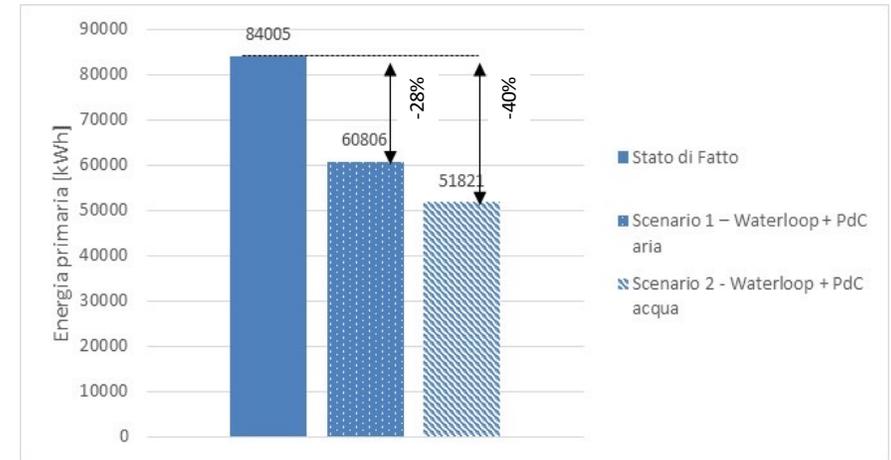
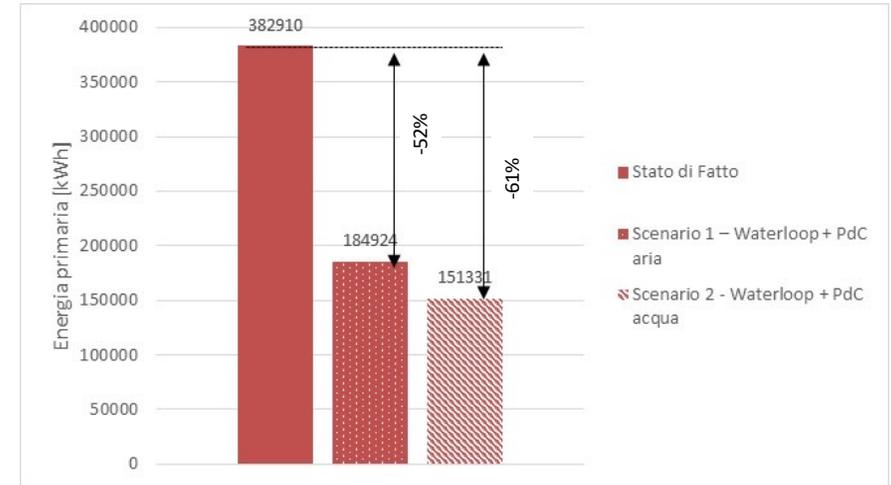
1. **Pompe di calore condensate ad aria**, quindi con scambio diretto con l'aria prelevata dall'ambiente → hanno un impatto acustico non trascurabile e sono caratterizzate da prestazioni inferiori rispetto a pompe di calore condensate ad acqua.
2. **Pompe di calore condensate ad acqua**, con scambio termico, mediante appositi scambiatori di calore, con l'acqua di falda presente nel sottosuolo → opzione tecnicamente più complessa, a causa della necessità di realizzazione di appositi pozzi, ma con ridotto impatto acustico e massimi livelli prestazionali. In questo scenario, una volta noti i profili stagionali di temperatura dell'**acqua di falda**, si potrebbe valutare la realizzazione di un impianto ad un singolo stadio, ovvero **evitando la presenza delle pompe di calore centralizzate** e facendo condensare i terminali waterloop direttamente con l'acqua di falda.



Stima del risparmio energetico

Il modello energetico è stato utilizzato per analizzare la prestazione energetica degli scenari di intervento ipotizzati, ovvero considerando la sostituzione di tutti i sistemi di emissione esistenti con terminali di tipo *waterloop*, in abbinamento alla sostituzione delle caldaie a gas con un sistema di generazione basato su pompe di calore ad aria (Scenario 1) o ad acqua di falda (Scenario 2).

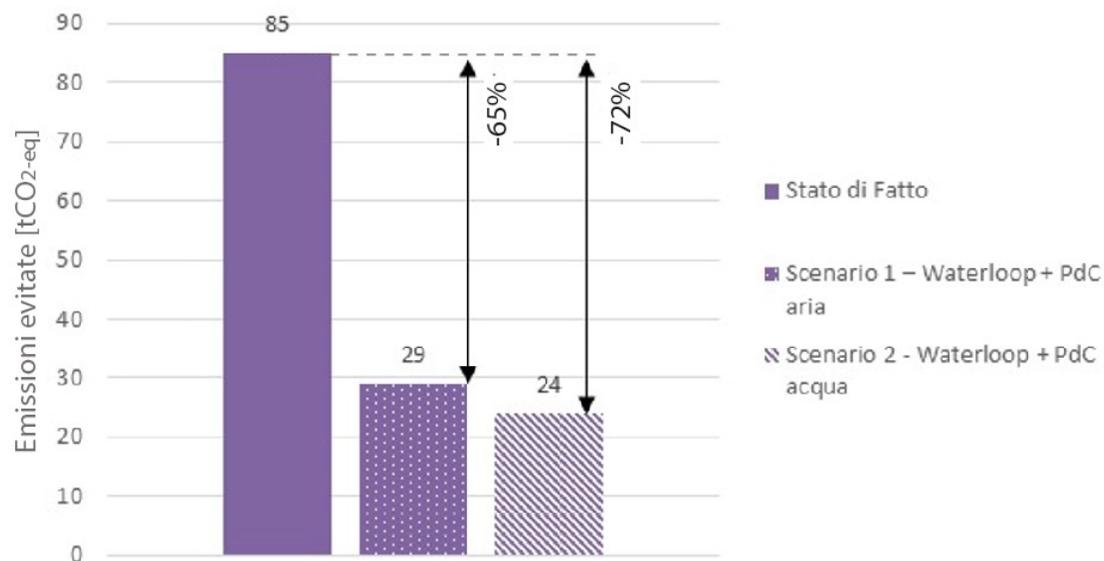
Complessivamente il **consumo di energia primaria** non rinnovabile dello **Scenario 1** sarebbe pari a circa 245.000 kWh mentre quello dello **Scenario 2** di circa 203.000 kWh, ovvero rispettivamente il **48% e il 57% in meno rispetto allo stato di fatto**.



Stima della riduzione delle emissioni di CO₂

I **consumi di energia** dei due scenari sono stati successivamente convertiti in **emissioni di CO₂ equivalente**, utilizzando come fattore di conversione un valore pari a 236 g/kWh per l'energia elettrica e 199 g/kWh per il gas naturale.

Si riportano di seguito i dati riepilogativi, dai quali emerge che entrambe le soluzioni permettono di ridurre in modo considerevole le emissioni equivalenti di CO₂ rispetto allo stato di fatto ed in particolare del **65%** e del **72%**, rispettivamente per gli **Scenari 1 e 2**.



Stima economica

Sulla base delle simulazioni effettuate in regime dinamico, le **spese annuali attuali (stato di fatto) ed attese (Scenari 1 e 2) per la climatizzazione dell'edificio** sono state stimate considerando un prezzo del gas naturale pari a 1 €/Nm³ (IVA esclusa) ed un prezzo dell'elettricità pari a 0,3 €/kWh (IVA esclusa, altri oneri accessori inclusi). Tali valori si ritengono infatti mediamente rappresentativi delle attuali condizioni economiche delle utenze analizzate, considerando la situazione di mercato corrente e le previsioni nel medio termine.

Scenario	Costo di investimento [€]	Spesa annua per climatizzazione invernale [€]	Spesa annua per climatizzazione estiva [€]	Spesa totale annua per climatizzazione [€]	Risparmio [%]
SDF	-	34.900	12.923	46.942	/
Scenario 1	850.000	28.200	9.354	37.554	20%
Scenario 2	980.000	22.500	7.856	30.356	36%

Le stime effettuate mostrano un **risparmio annuo ottenibile compreso tra il 20 ed il 36%**. Si sottolinea che, in entrambi gli scenari d'intervento proposti, l'investimento stimato consente di dotare tutti gli ambienti di un impianto di climatizzazione estiva, che in molti spazi attualmente non risulta presente.

Si ribadisce infine che, qualora le indagini geologiche dimostrassero idonei valori di portata e temperatura dell'acqua di falda, lo Scenario 2 potrebbe essere realizzato **anche senza l'installazione delle pompe di calore centralizzate**, evitando quindi un costo pari a circa 350.000 €.





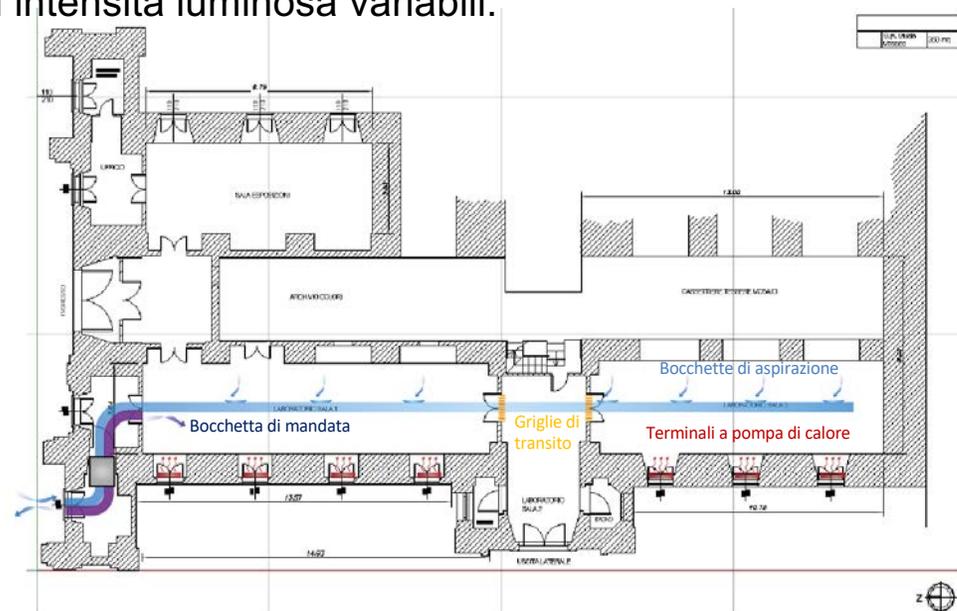
Rilievo stato di fatto



Proposta di intervento – Sistema di aerazione ed illuminazione artificiale

Si prevede la sostituzione dei radiatori con **terminali di emissione a pompa di calore** del tipo *waterloop* per riscaldamento e raffrescamento. Completerà il sistema uno **speciale impianto di ventilazione meccanica controllata**, in grado di aspirare l'aria interna in prossimità delle postazioni di lavoro, asportando le micropolveri delle lavorazioni. Il flusso d'aria prelevato dagli ambienti sarà bilanciato da un canale di mandata collegato all'unità di ventilazione, dotata di **recuperatore di calore termodinamico**.

Per quanto riguarda l'illuminazione artificiale, se ne prevede l'efficientamento tramite l'installazione di nuove **lampade a LED**, riducendo i consumi di più del 60%. In particolare, i faretto di precisione usati dai mosaicisti saranno ad alta fedeltà cromatica con focalizzazione ed intensità luminosa variabili.



Misure di compensazione

CO₂

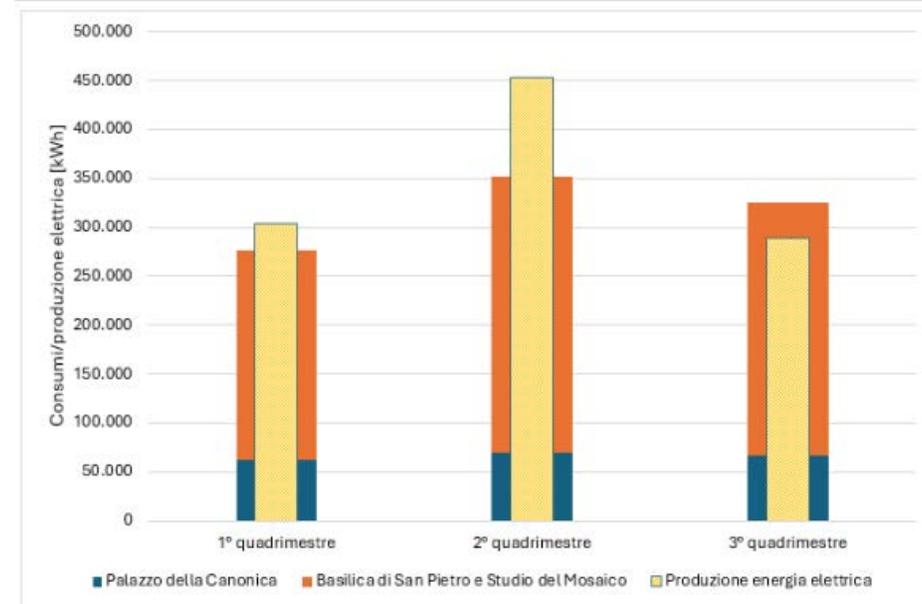
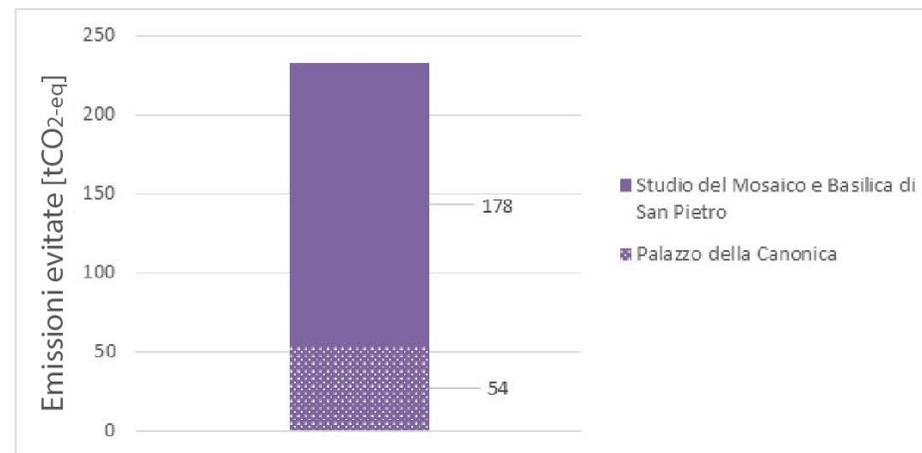


Stima delle misure di mitigazione

Sulla base delle precedenti valutazioni e delle misure di efficientamento energetico-ambientale proposte, è stato stimato l'impatto, in termini di **emissioni di anidride carbonica equivalente**, dei consumi totali dei 3 edifici considerati, applicando le misure proposte.

Si noti che le emissioni assunte per la nuova climatizzazione del Palazzo della Canonica sono quelle riferite allo Scenario 1 (pompe di calore condensate ad acqua e pozzi di emungimento da falda), di più facile applicazione nel breve periodo.

Al fine di compensare tali emissioni, pari in totale a circa **230 t/anno di CO₂ equivalente**, occorrerebbe installare nel medesimo contesto climatico **impianti fotovoltaici BIPV o agrivoltaici** con potenza pari a circa **700 kW_p**, che richiederebbero circa 4.000 m² di superficie attiva.



A detailed architectural cutaway drawing of St. Peter's Basilica in Rome, showing the interior structure from the dome down to the ground level. The drawing is rendered in a fine-line, etched style. The central dome is the most prominent feature, with its ribs and internal structure clearly visible. Below the dome, the nave is supported by a series of columns, and the floor is shown with various levels and platforms. The drawing is centered on a white background.

Grazie per l'attenzione

