

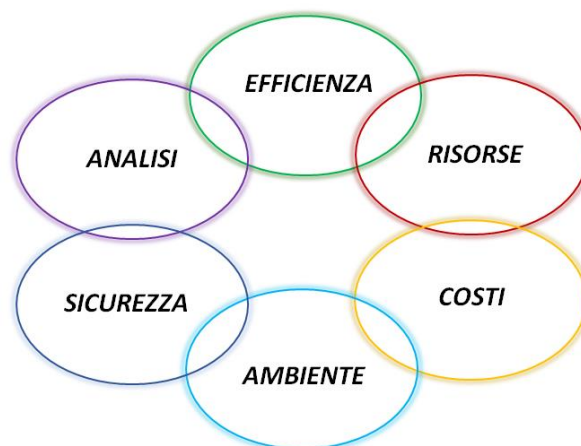
GLI SMART ENERGY SYSTEMS

Il lavoro di ricerca dell'università di Roma La Sapienza incentrato sulla valutazione dell'efficienza energetica degli Smart Energy Systems studia la possibilità di progettare strategie di ristrutturazione degli impianti attraverso l'utilizzo di sistemi energetici intelligenti. Le ricerche ruotano intorno all'adozione di sistemi innovativi di generazione dell'energia, altamente performanti e impiegabili per la riqualificazione del parco edilizio esistente. Le crescenti problematiche legate alle dimensioni energetiche e ambientali hanno motivato molti ricercatori, ingegneri, progetti internazionali e nazionali (tra cui il presente PRIN), a sviluppare ed integrare Smart Energy Systems per raggiungere un futuro più sostenibile. Attualmente, il processo di industrializzazione è fortemente dipendente dall'energia e richiede significative quantità di risorse materiali per ottenere i requisiti ambientali, di crescita economica e benessere collettivo. Inoltre, la domanda di energia negli edifici sta aumentando in modo proporzionale all'escalation globale e al miglioramento degli standard di vita della popolazione. Essendo pertanto gli edifici i principali responsabili tra i produttori di emissioni di carbonio, è fondamentale per la completa transizione energetica, ridurre l'impatto sull'ambiente abbattendo le emissioni climalteranti. La stessa commissione Europea, nella direttiva 2018/844 si sofferma sull'evoluzione in cui si trova il panorama energetico, focalizzandosi su due particolari aspetti, la digitalizzazione del sistema elettrico e la predisposizione degli edifici all'intelligenza, ovvero, lo Smart building.

...“Per digitalizzare il settore edilizio, gli obiettivi dell'Unione in materia di connettività e le sue ambizioni relative alla diffusione di reti di comunicazione ad alta capacità sono importanti per abitazioni intelligenti e per comunità dotate di buoni collegamenti. Si dovrebbero predisporre incentivi mirati per sistemi predisposti all'intelligenza e soluzioni digitali nell'ambiente edificato. Ciò offre nuove opportunità in termini di risparmio energetico, fornendo ai consumatori informazioni più precise sui loro modelli di consumo e consentendo al gestore di sistema di gestire più efficacemente la rete”...

Un sistema energetico intelligente quindi è tale perché combina e assicura contemporaneamente più aspetti fondamentali garantendo i più alti livelli di sostenibilità ed efficienza. Tali sistemi presentano vantaggi globali, integrando aspetti multidimensionali e pluridisciplinari, ottenendo i target futuri per la transizione energetica. Alcuni dei vantaggi dei sistemi energetici intelligenti possono essere riassunti in termini di sicurezza e benessere, ma anche occupazionali, economici, produttivi, infrastrutturali e sociali.[7]. Nel dettaglio, gli obiettivi raggiungibili dagli smart energy systems per un futuro sostenibile sono proposti da Dincer [00-01] e riassunti nella figura 1.

Figura 1 – Obiettivi per un futuro sostenibile



- *Migliore efficienza:* ottenibile minimizzando le perdite agendo ad esempio l'isolamento dell'involucro edilizio e minimizzando i rifiuti attraverso il recupero. Un altro modo per raggiungere una migliore efficienza potrebbe essere associato all'utilizzo di sistemi multi-generazione dell'energia.
- *Migliore utilizzo delle risorse:* sfruttando le fonti energetiche rinnovabili o le materie disponibili riducendo la dipendenza da risorse non disponibili localmente e gli impatti ambientali.
- *Migliore efficacia in termini di costi:* una maggiore efficienza e un migliore utilizzo delle risorse portano un altro aspetto importante della sostenibilità, che è l'efficacia in termini di costi. Riducendo perdite e sprechi,

generando più prodotti dalla stessa fonte di energia e utilizzando risorse affidabili, disponibili e abbondanti; i sistemi energetici intelligenti offrono una migliore efficacia dal punto di vista economico.

- *Ambiente migliore*: riducendo le emissioni globali di CO₂ così come imposto dalle attuali direttive, con una riduzione del settore energetico e dell'industria del 30-70% degli importi del 2000 prima del 2050. Dopo il 2050, l'obiettivo è avvicinarsi a zero emissioni da tutti gli aspetti della catena energetica.
- *Migliore sicurezza energetica*: significa accesso a livello mondiale a fonti energetiche, sistemi e trasportatori moderni a prezzi ragionevoli ed efficienza dell'uso finale. Una minore dipendenza dall'import/export di energia comporta più affidabilità, flessibilità, disponibilità e accessibilità dell'approvvigionamento, tra i principali obiettivi dei sistemi energetici intelligenti.
- *Migliore progettazione e analisi*: I sistemi energetici intelligenti sono progettati per ridurre al minimo perdite/sprechi, pertanto, permettono di soddisfare più esigenze contemporaneamente.

Proseguendo, il processo virtuoso che passa dall'utilizzo di questi sistemi permette di contare su edifici di nuova costruzione nZEB, a fabbisogno energetico quasi zero e su una sostenibilità energetica più ampia. Per quanto riguarda il parco edilizio esistente, l'utilizzo di impianti altamente performanti riveste la soluzione più efficace per il risparmio di energia primaria, in quanto le strutture sono spesso soggette a vincoli paesaggistici limitando gli interventi di miglioramento. Ad oggi ancora, la maggior parte del sistema energetico si basa sui combustibili fossili. Entro la metà del secolo, questo cambierà radicalmente con l'elettrificazione su larga scala, guidato dalla completa diffusione delle energie rinnovabili o dall'utilizzo di combustibili alternativi. Le grandi strategie di integrazione e controllo delle FER (fonti di energia rinnovabile) sono fondamentali per l'effettiva decarbonizzazione a livello internazionale, nazionale e urbano. L'integrazione e l'utilizzo di energia pulita permette di ridurre il consumo di energia primaria sostituendo gradualmente i combustibili fossili e allo stesso tempo facilitando la sicurezza energetica. Tuttavia, l'aumento della quota di FER nei mix energetici nazionali influisce negativamente sulla rete, sia in termini di efficienza, dovuta alla gestione delle attuali centrali a combustibile fossile a carico parziale (lo stress dei cavi elettrici a causa del cambiamento nella risposta temporale), sia in termini di composizione del mix energetico (a causa dello shock sul mercato fornito dagli schemi di incentivi feed-in-tariff). In questo senso, una soluzione per bilanciare l'offerta e la domanda di elettricità nel tempo, riguarda la possibilità di immagazzinare l'elettricità per brevi o lunghi periodi. I sistemi di accumulo a lungo termine rivestono un ruolo interessante per ovviare alla variabilità della generazione di elettricità da fonti energetiche rinnovabili rivestendo una priorità di mercato per l'Unione Europea. Nella tabella xx è riportata la produzione di energia elettrica lungo una serie temporale, distinta per fonte, riportata sulla base dei dati forniti dal gestore della rete nazionale (ENEL e TERNA). La presente tabella è un estratto del National Inventory Report 2020 del Sistema Informativo Nazionale Ambientale, in cui si descrive la comunicazione annuale italiana dell'inventario delle emissioni dei gas serra in accordo a quanto previsto nell'ambito della Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite (UNFCCC), del protocollo di Kyoto e del Meccanismo di Monitoraggio dei Gas Serra dell'Unione Europea [02]. Dal 2010 al 2014 si osserva un calo della produzione di elettricità da combustibili fossili in Italia, trainato sia dalla recessione economica sia dall'aumento delle fonti rinnovabili per la produzione di energia. In "altri carburanti" è inclusa una moltitudine di carburanti, come biomassa, rifiuti, biogas da residui agricoli e rifiuti e gas di sintesi provenienti da processi chimici o residui.

Tabella 1 - Produzione di energia elettrica da fonti 1990-2018 (GWh) - Fonte: TERNA

Source	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Hydroelectric	35,079	41,907	50,900	42,927	54,407	46,970	44,257	38,025	50,503
Thermoelectric	178,590	196,123	220,455	253,073	231,248	192,054	199,430	209,485	192,730
-Solid fuels	32,042	24,122	26,272	43,606	39,734	43,201	35,608	32,627	28,470
-Natural gas	39,082	46,442	97,607	149,259	152,737	110,860	126,148	140,349	128,538
-Derivated gases	3,552	3,443	4,252	5,837	4,731	2,220	2,832	2,501	2,520
-Oil products	102,718	120,783	85,878	35,846	9,908	5,620	4,127	4,083	3,289
-Other fuels	1,196	1,333	6,446	18,525	24,138	30,151	30,715	29,924	29,914
Geothermic	3,222	3,436	4,705	5,325	5,376	6,185	6,289	6,201	6,105
Eolic and Photovoltaic	0	14	569	2.347	11.032	37.786	39.793	42.120	40.370
Total	216,891	241,480	276,629	303,672	302,062	282,994	289,769	295,830	289,709

Più in generale, la quota del consumo totale di energia da fonti primarie nel periodo 1990-2018, riportata nella Tabella 3.3 [02], mostra un evidente cambiamento da prodotti petroliferi e combustibili solidi a gas naturale e rinnovabile mentre la percentuale di consumo di elettricità è variabile e guidata dal mercato.

Tabella 2 - Consumi energetici totali per fonte primaria 1990-2018 (%) - Source: Ministero dello sviluppo economico

Source	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Renewable	0.7	0.9	1.1	2.0	4.3	7.6	7.5	7.7	7.4
Solid fuels	9.6	7.9	6.9	8.6	8.0	7.7	7.0	6.1	5.4
Natural gas	23.7	25.7	31.4	36.0	36.2	32.6	34.6	36.3	34.7
Crude oil	56.2	54.9	49.5	43.1	38.5	34.6	34.4	34.0	34.7
Primary Electricity	9.8	10.5	11.1	10.3	13.1	17.6	16.5	15.9	17.8

La trasformazione dai tradizionali sistemi energetici a sistemi intelligenti è osservata in numerose ricerche e studi sperimentali su piccola e media scala nel settore energetico. L'obiettivo primario degli studi è di contribuire a una migliore comprensione di come disaccoppiare la crescita economica dal degrado ambientale, attraverso l'utilizzo degli Smart Energy Systems. Gli studi sperimentali consistono principalmente in miglioramenti tecnologici nella produzione e nell'uso finale richiedendo la riconfigurazione del modello di business e adeguamenti industriali dei sistemi energetici attuali. Le ricerche si concentrano anche su innovazioni tecnologiche che possono cambiare le interazioni tra fornitori di energia e consumatori, cambiando i ruoli dei giocatori nel campo dei sistemi energetici. Ad esempio, il surplus di energia prodotto dal consumatore potrebbe essere riversato nella rete nazionale diventando a sua volta una fornitura di energia per altri utenti. Al fine di fornire una base per le invenzioni che conducono ai sistemi di energia intelligente, è importante sostenere con successo le caratteristiche tecnologiche. In tal senso, tra i diversi studi ne troviamo alcuni che si concentrano sul raggiungimento di un'economia a base di idrogeno per ottenere una maggiore sostenibilità. A riguardo, il progetto PRIN2015 ha svolto e pubblicato numerose ricerche per il suo impiego come combustibile da cui ne deriva un inquinamento ambientale quasi nullo. L'odierna analisi energetica non può quindi essere orientata soltanto al costante miglioramento del rendimento dei processi (in termini di simulazioni termodinamiche), ma deve tendere conto soprattutto dell'individuazione di cicli che non consumino risorse non ripristinabili ed assicurino anche un impatto praticamente nullo sull'ecosistema. In questa prospettiva, l'opportunità di adozione diffusa dell'idrogeno come nuovo vettore energetico rappresenta un possibile contributo allo sviluppo sostenibile. Per cui, l'obiettivo rimane l'integrazione e la combinazione di diversi sistemi e fonti energetiche per raggiungere una migliore efficacia in termini di costi, risorse e ambiente. Più diffusi sono l'utilizzo di sistemi basati su CHP (combined heat and power) e l'uso delle pompe di calore recentemente considerate una potenziale opzione per bilanciare le fonti rinnovabili. Le pompe di calore, siano esse elettriche o a gas, ad aria o ad acqua, sono, tra le tecnologie per la produzione del calore per il riscaldamento più promettenti ed efficienti disponibili oggi sul mercato. Negli ultimi anni, queste apparecchiature hanno subito un notevole sviluppo tecnologico e prestazionale, grazie anche alla loro capacità di estrarre buona parte di energia dall'ambiente (energia rinnovabile). Il progetto PRIN2015 ha studiato e analizzato differenti opzioni tecnologiche e operative (quali la diversità di combustibili o gas refrigeranti impiegati per l'utilizzo delle pompe di calore (vedi idrogeno-metano o anidride carbonica). Avendo tenuto conto di tali tecnologie, il lavoro si propone di identificare algoritmi per la generazione e la gestione dell'energia investigando e creando sistemi edificio-impianti, accuratamente modellati in ambiente MATLAB-simulink. Inoltre, vengono utilizzate le simulazioni dinamiche di ausilio per la caratterizzazione di diversi scenari, realizzati attraverso l'uso di controlli automatici e iterativi per diversi indicatori, quali ad esempio i consumi di energia primaria. Tra le varie tecnologie studiate viene riportato il caso studio della risposta di una pompa di calore a CO₂ trans-critica con gas refrigerante R744. Nel dettaglio le pompe di calore sono state adottate su 4 villette unifamiliari posizionate all'interno di un singolo lotto, oltre all'utilizzo di pannelli fotovoltaici per le abitazioni esposte a sud, il sistema è costituito da una caldaia tradizionale e un cogeneratore per la produzione di acqua calda sanitaria ed elettricità a sostegno delle pompe di calore. Tale layout è stato confrontato con quello tradizionale basato su sistemi di generazione separati sulla base di diversi indicatori di prestazione energetica. Inoltre, è stata effettuata un'analisi di sensibilità sul risparmio di energia primaria, sui consumi di energia fossile primaria e sulla frazione di energia rinnovabile.

Il Caso Studio

La ricerca indaga il ruolo delle nuove applicazioni dei sistemi di energia ibrida per lo sviluppo di una nuova strategia di rinnovamento degli impianti per implementare sistemi di energia intelligenti su piccola scala. Il lavoro è stato svolto nel 2018 e ha visto la sua pubblicazione sulla rivista *Energies* nel 2019 [1]. Nel dettaglio, si occupa di simulare dinamicamente l'applicazione di una pompa di calore a CO₂ transcritica per potenziare le reti di distribuzione a bassa temperatura e per creare un sistema di condivisione del calore per le abitazioni. Il caso studio vede l'utilizzo di quattro pompe di calore trans-critiche ad anidride carbonica (CO₂-HP), pannelli fotovoltaici termici, combinati ad un sistema di cogenerazione (CHP) per la produzione di acqua calda sanitaria. Inoltre, per il suddetto sistema, è stata valutata l'adozione dei dispositivi di accumulo elettrici. Tale layout è stato confrontato con quello tradizionale basato su sistemi di generazione separati che utilizzano diversi indicatori di prestazione energetica. Inoltre, è stata effettuata un'analisi di sensitività sul risparmio di energia primaria, i consumi di energia fossile primaria, la frazione di energia rinnovabile e il calore rinnovabile, con cambiamenti nel rapporto potenza/riscaldamento dell'edificio. I risultati ottenuti hanno evidenziato che utilizzando il sistema ibrido con un dispositivo di archiviazione è possibile ottenere un risparmio del 50% circa. Di conseguenza, l'adozione di pompe di calore a CO₂ transcritica e di sistemi ibridi potrebbe essere un'opzione praticabile per conseguire la qualifica nZEB.

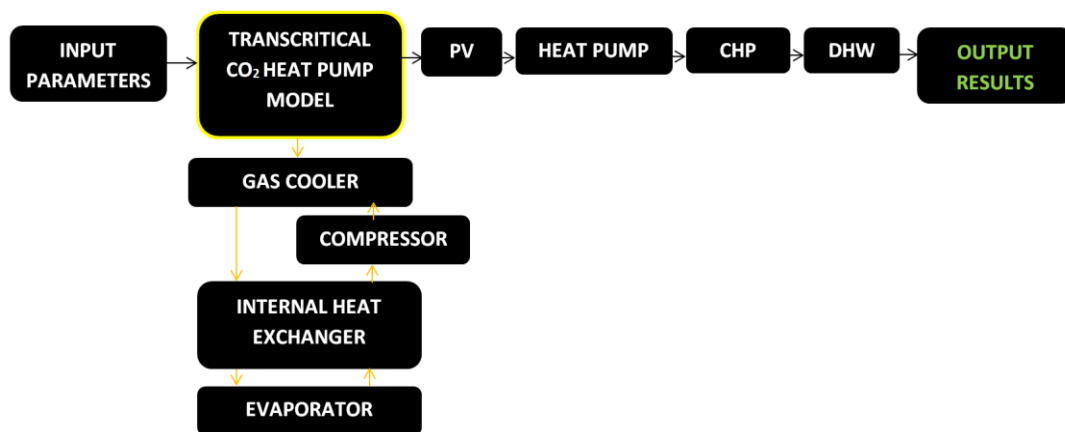
Introduzione

Oggigiorno, l'uso consapevole delle risorse energetiche costituisce un'importante questione di dibattito politico, grazie anche alle direttive emanate dall'Unione Europea. In particolare, l'inquinamento atmosferico, le emissioni di gas serra (GHG), le relative variazioni climatiche e la crescente frequenza delle catastrofi ambientali stanno rendendo necessarie nuove misure preventive e di recupero. Come precedentemente affrontato, una grande sfida riguarda l'aumento dell'efficienza energetica degli edifici esistenti, indagando le migliori misure al fine di abbinare gli obiettivi normativi restrittivi e le limitazioni architettoniche [2]. In questo contesto, sono in corso numerosi studi per trovare soluzioni innovative di ingegneria impiantistica a livello tecnologico, basate sullo studio di materiali efficienti [3] e sui più recenti sistemi di generazione di energia [4-7]. Secondo quanto riportato in letteratura, il periodo di ammortamento per questo tipo di interventi è di circa 25-30 anni [8,9]. L'integrazione delle energie rinnovabili nei sistemi energetici non è sempre possibile a causa del paesaggio o dei vincoli urbani [10,11] anche se l'impianto è tecnicamente fattibile. Per questo motivo, una soluzione alternativa potrebbe essere l'implementazione di nuovi impianti e tecnologie di riscaldamento e di elettricità [12]. Il caso studio affrontato mira a mediare tra il ruolo potenziale dei sistemi di energia ibrida e il concetto di condivisione del riscaldamento [13,14]. Inoltre, focalizzando l'attenzione della ricerca solo sull'efficienza della generazione di energia, è stata studiata la possibilità di progettare una nuova strategia di ristrutturazione degli impianti al fine di promuovere l'uso di sistemi energetici intelligenti su piccola scala. Di conseguenza, tale approccio può contribuire positivamente al conseguimento della qualifica NZEB a causa della riduzione delle emissioni di CO₂ [15-17] nel corso del processo di consumo. Per tale motivo, l'adozione di un sistema di energia ibrida in grado di combinare combustibili fossili con fonti di energia rinnovabile [18-20] può essere considerata una valida soluzione per il risparmio di energia primaria negli edifici esistenti. È degno di nota il modo in cui i sistemi ibridi basati su CHP e pompe di calore sono stati recentemente considerati in letteratura, come una potenziale opzione per bilanciare l'intermittenza delle fonti rinnovabili, specialmente in tutti quei luoghi in cui sono state sviluppate grandi reti di teleriscaldamento [21]. Avendo tenuto conto di tali tecnologie, è stata proposta la sinergia tra i dispositivi di produzione di riscaldamento ad alta e bassa temperatura e le energie rinnovabili elettriche. In tal modo, è stata concettualizzata una prevedibile modifica nel funzionamento comune delle pompe di calore a CO₂ trans-critica in modo da potenziare la rete di distribuzione a bassa temperatura per le abitazioni. La tipologia di pompe di calore è stata inoltre investigata da diversi autori soprattutto nel campo della refrigerazione [22-30]. Le applicazioni tipiche consistono nella generazione contemporanea di caldo e freddo o per il condizionamento dell'aria. Alcuni autori hanno inoltre proposto di modificare alcuni parametri operativi della pompa al fine di aumentare la temperatura di evaporazione per i cicli transcritici [31]. La ricerca mostra come è possibile condividere il calore per un piccolo gruppo di edifici attraverso l'uso di un innovativo sistema di energia ibrida confrontando i risultati con il tradizionale sistema di produzione di energia, individuando altresì vantaggi e svantaggi.

Metodologia

Sebbene i pannelli solari, i cogeneratori (CHP) e le pompe di calore siano considerati alcune delle soluzioni energetiche più efficienti [32], i più grandi apparecchi adottati per il riscaldamento nei paesi come l'Italia, sono caldaie a (GN) gas naturale. Il tipico sistema di generazione separata è stato confrontato con la nuova opzione basata sull'ibridazione dell'impianto per la generazione di elettricità e calore ad alta temperatura (ovvero, per una temperatura di approvvigionamento idrico pari a 65 °C o 70 °C). In particolare, è importante evidenziare che le abitazioni non sono dotate di ventilconvettori o pavimenti radianti per gestire i carichi termici durante l'inverno e l'estate; in effetti, lo scopo del documento è di studiare le possibili soluzioni innovative per migliorare gli edifici esistenti utilizzando i sistemi di emissione ad alta temperatura. Il layout di riferimento del caso studio consiste in un gruppo di quattro edifici, in cui la centrale elettrica è una combinazione di una pompa di calore ad aria (35 kWt), un micro CHP (6 kWe – 10 kWt), quattro pompe di calore elettriche a CO₂ trans-critiche (CO₂-HPs di 12,5 kWt) e pannelli fotovoltaici termici (7 kWp). La superficie utilizzabile è di circa 170 m² per ogni edificio disposta su due piani. La rete di distribuzione è stata progettata in una posizione centrale rispetto alle residenze, al fine di ridurre le perdite di calore e migliorare le sue prestazioni. Inoltre, due edifici sono stati dotati di pannelli fotovoltaici integrati sul tetto. La pompa di calore tradizionale è stata installata per fornire e distribuire acqua calda a bassa temperatura a circa 35 °C. Ciononostante, la pompa di calore ad aria potrebbe essere sostituita con una di origine geotermica, una pompa di calore ad acqua di mare o altre pompe di calore a bassa temperatura per produrre calore a bassa temperatura, a seconda della posizione e della disponibilità della fonte locale. Ciò garantisce l'interconnessione dei quattro edifici mediante un circuito idraulico in una rete di riscaldamento su piccola scala. Il CHP può fornire acqua calda sanitaria (ACS) 24 ore al giorno. Yang et al. [33] ha implementato con successo un modello trans-critico di pompa di calore a CO₂ che mostra come migliorare le prestazioni del sistema diminuendo la temperatura della rete di distribuzione all'interno delle tubazioni e aumentando la portata massica dell'acqua di raffreddamento, riducendo allo stesso tempo la pressione ottimale dei rifiuti di calore e ottenendo il COP massimo. La ricerca attuale si concentra principalmente sull'implementazione di un sistema energetico intelligente basato sull'impiego di pompe di calore a CO₂ trans-critiche, come riportato nella Figura 1.

Figure 1. Flowchart for the hybrid energy system model



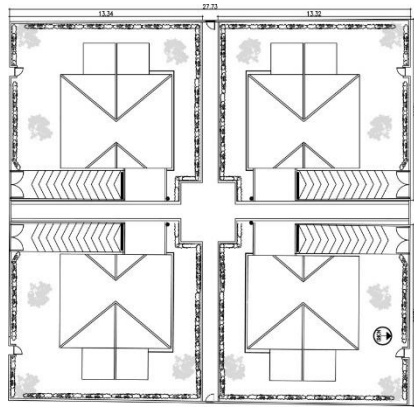
La prima parte della ricerca è stata pertanto incentrata sulla ricerca bibliografica per l'argomento di ricerca, a seguire, la possibilità di creare modelli matematici adeguati. I sistemi energetici intelligenti sono integrati con più settori (elettricità, riscaldamento, raffreddamento, industria, edifici e trasporti), consentendo l'identificazione di soluzioni più idonee per rendere possibile la trasformazione in un sistema energetico rinnovabile e sostenibile [34]

Descrizione del sistema di edifici

Il progetto è costituito da un complesso residenziale di quattro edifici disposti in un unico lotto in modo simmetrico ed equidistante nelle due direzioni. Il sistema di generazione di energia investigato, è posizionato centralmente fornendo una distribuzione del fluido in modo proporzionato, e in modo da ridurre al minimo le perdite di calore. Il lotto esaminato è riportato nella Figura 2.

Figure 2. Plan of the examined four residential dwellings

[Digitare qui]



Ogni edificio è composto da due livelli (piano terra e piano seminterrato) ed è caratterizzato da un'area calpestabile di circa 170 m². Il seminterrato comprende una camera per gli ospiti, un bagno, la hall e un garage esterno. La scala interna conduce al piano superiore dove si trovano le camere da letto matrimoniali, la cucina e il bagno. La Figura 3 mostra rispettivamente il piano terra e il layout del seminterrato per ciascun edificio, mentre i dati geometrici della struttura sono riportati nella Tabella 1. I carichi termici sono stati calcolati secondo le procedure della legge italiana 10/91 con il software certificato del Comitato Tecnico Termico Italiano (CTI), un'entità federata con UNI. Questi strumenti di calcolo devono garantire che i valori dell'indice di prestazione energetica abbiano una deviazione massima del 5% rispetto ai parametri stabiliti. La tabella 2 riassume i dati geometrici per l'analisi energetica del piano terra e del seminterrato, rispettivamente.

Figure 3: Level of examined buildings: (a) ground floor plan and (b) basement plan of each residential dwelling

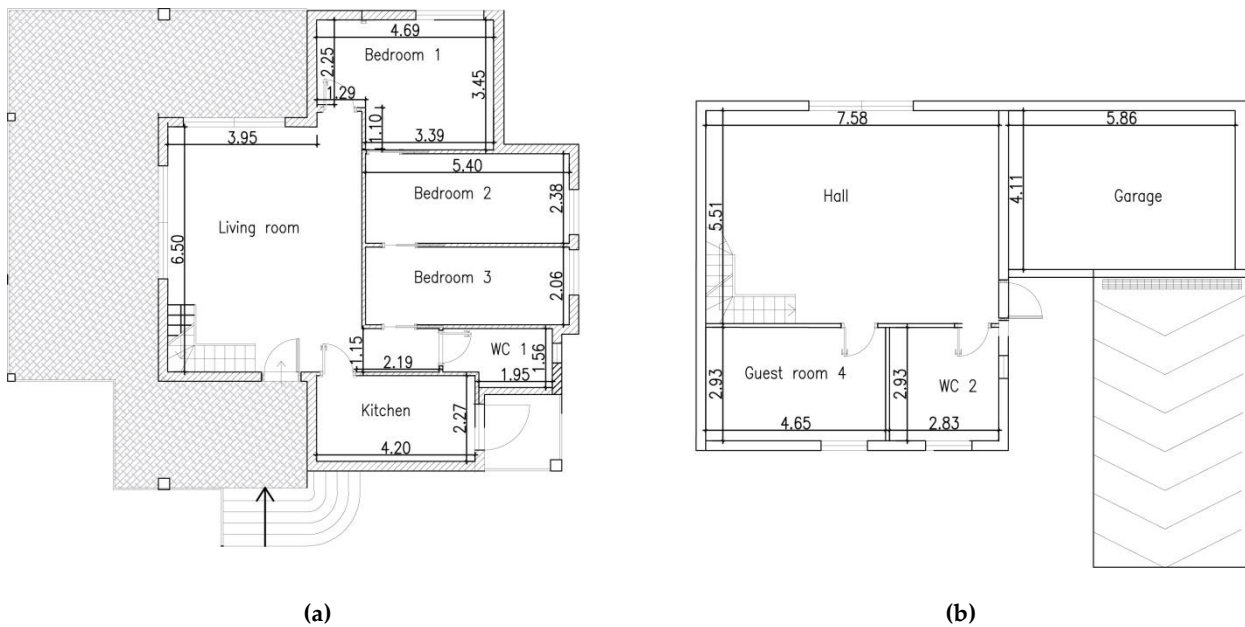


Table 1. Geometrical data of the dwellings inner spaces

Level	Spaces	Description	A [m ²]	H [m]	Vn [m ³]
Ground Floor	1	living room	36.26	3.30	119.66
Ground Floor	2	Bedroom 1	14.69	3.30	48.48
Ground Floor	3	Bedroom 2	12.83	3.30	42.34
Ground Floor	4	Bedroom 3	11.13	3.30	36.73
Ground Floor	5	WC 1	4.14	3.30	13.66
Ground Floor	6	Kitchen	9.53	3.30	31.45
Ground Floor		Total	88.58		292.31

Basement	7	Hall	41.72	2.50	104.30
Basement	8	Garage	24.08	2.50	60.20
Basement	9	guest room 4	13.65	2.50	34.13
Basement	10	WC 2	8.30	2.50	20.75
Basement		Total	87.75		219.37
		Dwellings' total	176.33		511.68

Table 2. Ground floor and basement geometrical data

	Ground floor	Basement
External surface area (S) - m ²	238.63	193.33
Gross volume heated (V) - m ³	369.86	288.05
ratio of form to volume (S/V) - m ² / m ³	0.65	0.67
Net heated surface - m ²	88.58	87.75
Net volume heated - m ³	292.31	219.37

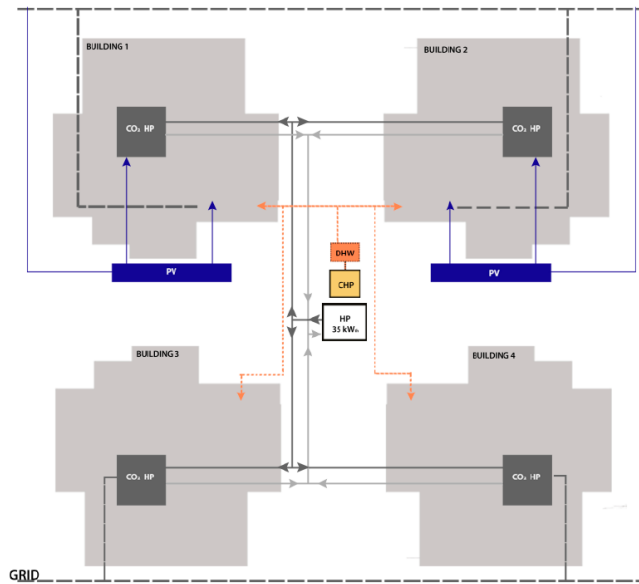
Analisi con Matlab Simulink

Tutti i componenti del sistema ibrido sono stati implementati e simulati da MATLAB SIMULINK (versione R2018) ed ogni scenario energetico è stato analizzato sulla base di quattro diversi indicatori energetici: consumo di energia primaria (PEC), risparmio di energia primaria (PES), frazione di energia rinnovabile (fRES) e calore rinnovabile consegnato all'utente finale. Infine, è stata eseguita un'analisi di sensibilità che varia i valori del rapporto potenza/calore dell'edificio (vedi Equazione (20)), da 0,1 a 0,8. Assemblando ogni modello matematico semplificato correlato ai generatori di energia (ovvero la tradizionale pompa di calore, la pompa di calore elettrica a CO₂ transcritica, la cogenerazione e il campo fotovoltaico) insieme ai conseguenti fabbisogni energetici dell'edificio, le prestazioni energetiche del sistema ibrido sono state determinate ed infine discusse. L'analisi di sensitività ha permesso di valutare in che modo gli indicatori di prestazione energetica sono influenzati dalle condizioni al contorno quando questi variano in +/- 15%.

Modellistica matematica

Il layout innovativo del sistema associato al sistema di energia ibrida è costituito da quattro pompe di calore elettriche a CO₂ transcritiche, per produrre acqua calda ad alta temperatura che alimentano i tradizionali sistemi di riscaldamento dell'edificio: una pompa di calore ad aria per la produzione di la temperatura dell'acqua è stata collegata al fine di tenere sotto controllo la differenza di temperatura al pozzo caldo-freddo; infine, un micro CHP è stato integrato al fine di fornire acqua calda sanitaria ed elettricità per le pompe di calore oltre ai fotovoltaici, come mostrato nella Figura 4.

Figure 4. Hybrid energy system layout



Grazie alle proprietà fisiche dell'anidride carbonica, il coefficiente di prestazione delle pompe a CO₂ può raggiungere valori elevati grazie alle sue buone proprietà di trasmissione del calore e alla possibilità di utilizzare piccoli compressori [35]. In ogni caso, la presente analisi non considera l'impronta di riscaldamento globale della pompa di calore, a seconda della perdita di refrigerante nell'ambiente, e l'impronta di energia elettrica o vapore utilizzata per il compressore. Ciò è dovuto al fatto che l'obiettivo del progetto è valutare il risparmio energetico ottenibile dall'adozione di una centrale energetica ibrida. Detto questo, vale la pena notare che ci sono tre fattori principali che richiedono particolare attenzione quando la CO₂ viene utilizzata come fluido di lavoro [36–38]: la prima riguarda l'alta pressione di esercizio, superiore a 73,75 bar; la seconda è la bassa temperatura critica poiché l'anidride carbonica raggiunge il suo punto critico ad una temperatura di 31 °C; infine, si deve considerare che i refrigeranti potrebbero fuoriuscire e necessitare di essere ricaricati, in questo caso la CO₂ molto spesso deriva da fonti fossili. Pertanto, rispetto ad altri refrigeranti, l'anidride carbonica richiede un sistema attentamente progettato per far fronte alle sue peculiari caratteristiche di temperatura e pressione. I costi di produzione e distribuzione dei sistemi di CO₂ sono relativamente bassi rispetto ad altri refrigeranti, poiché il suo uso non è soggetto a brevetti e di conseguenza non è limitato; inoltre, è una sostanza non tossica e non infiammabile, che ne rende sicuro l'uso. I cicli di CO₂ devono essere attentamente studiati perché, date le sue caratteristiche, non sono assimilati ai cicli tradizionali. Sebbene gli esperimenti sopra citati siano utili e forniscano dati preziosi, i tempi di valutazione e i costi di strumentazione rappresentano un ostacolo sempre presente alla ricerca, pertanto in questo caso, sono stati utilizzati approcci più immediati basati su simulazioni numeriche [36,37]. Utilizzando le analisi termodinamiche e lo studio delle caratteristiche di trasporto del refrigerante e del fluido secondario, è stato possibile modellare matematicamente tutti i componenti. Il modello semplificato di CO₂ è stato costruito all'interno dell'ambiente MATLAB (R2018) implementando l'equazione del bilancio energetico relativa ai seguenti cinque componenti: compressore del vapore, radiatore del gas, evaporatore, valvola di espansione e scambiatore di calore interno. Come si può vedere sia nel diagramma di entalpia (Figura 5) che nella Tabella 3, la pressione di progetto raggiunge 150 bar all'interno del refrigeratore di gas e 70 bar all'interno dell'evaporatore, con un rapporto di compressione calcolato (p_2 / p_1) pari a 2.143. La temperatura del gas scende da 134,2 °C a 60,85 °C nel refrigeratore, quindi da 60,85 °C a 33,67 °C nello scambiatore di calore interno e raggiunge un valore di 28,67 °C nell'evaporatore.

Figure 5. (a) P-h diagram carbon dioxide refrigerant [R744] and (b) T-S diagram (A: Inlet gas cooler; B: Inlet internal heat exchanger; C: Throttle valve; D: Inlet evaporator; E: Inlet internal heat exchanger; F: Inlet compressor).

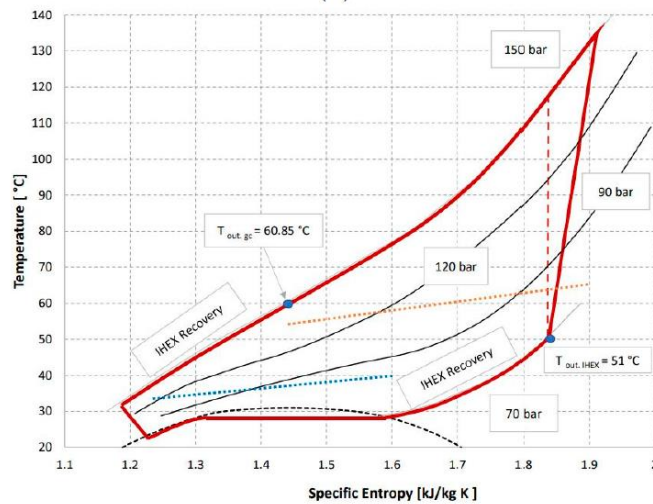
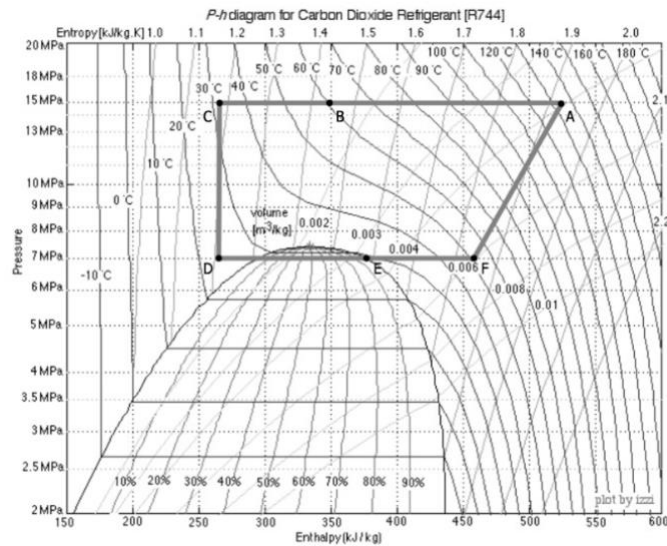


Table 3. Transcritical CO₂ heat pump parameters.

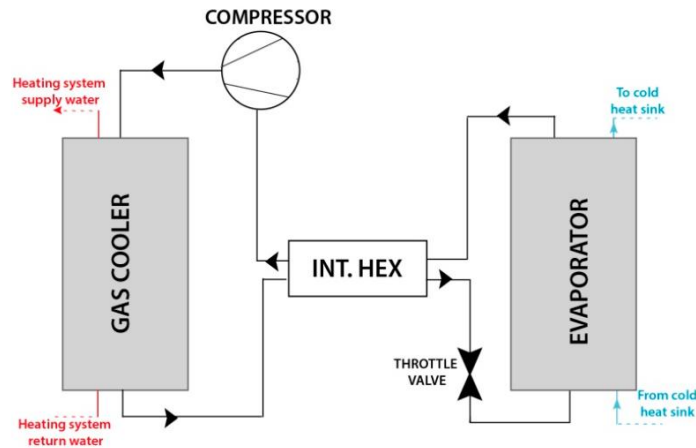
Component	CO ₂ Parameter		Water Parameter	
Gas cooler	T = 134.2 [°C]	P = 15 [MPa]	55 °C Inlet	65 °C Outlet
Internal heat exchanger	T = 33.67 [°C]	P = 15 [MPa]	-	-
	T = 28.67 [°C]	P = 7 [MPa]	-	-
Evaporator	T = 28.67 [°C]	P = 7 [MPa]	40 °C Inlet	35 °C Outlet
Compressor	T = 51 [°C]	P = 7 [MPa]	-	-
		P = 15 [MPa]	-	-

L'efficienza delle pompe di calore è misurata dal coefficiente di prestazione (COP) dato dal rapporto tra l'energia utile (calore trasferito nell'ambiente da riscaldare) e l'elettricità consumata. Il COP della pompa di calore a CO₂ è di circa 3,6 ed è influenzato da varie variabili operative, come la temperatura di uscita dell'acqua refrigerata o la temperatura di uscita dell'anidride carbonica dal refrigeratore.

Bilancio energetico HP trans-critico CO₂

La differenza di temperatura iniziale è stata ipotizzata e nella Figura 6 è riportato lo schema generale del sistema considerato.

Figure 6. Transcritical CO₂ heat pump layout.



Gas Cooler

Progettare un refrigeratore in un sistema a CO₂ è piuttosto difficile a causa delle sue differenze con il condensatore tradizionale. La pressione di esercizio massima è di 150 bar e la temperatura di esercizio è limitata a 134.2 ° C. Un altro problema che può essere riscontrato in un sistema a CO₂ è l'elevata influenza della temperatura di uscita del refrigeratore sull'efficienza del sistema (COP). Infatti, all'aumentare di tale temperatura, la pressione di scarico deve essere migliorata secondo Sarkar et al. [39] Tuttavia, tale miglioramento penalizza fortemente il coefficiente di prestazione della pompa a causa della maggiore potenza meccanica richiesta dal compressore. Per ovviare a tale inconveniente è stata aumentata la temperatura di evaporazione al fine di recuperare la cascata termica a bassa temperatura:

$$T_{out} + DT_{des} = T_{in,gc} \quad (1)$$

$$T_{in} + DT_{des} = T_{out,gc} \quad (2)$$

$$h_{in,gc} - h_{out,gc} = Dh_{gc} \quad (3)$$

$$\frac{Build.Load}{\Delta h_{gc}} = \dot{m}_{CO_2} \quad (4)$$

Compressore

Il refrigerante CO₂ naturale offre due caratteristiche: l'alta pressione di esercizio e la pressione differenziale; questi livelli di pressione sono fino a 10 volte superiori rispetto ai refrigeranti HFC. Durante lo sviluppo di compressori di CO₂ sono stati considerati due fattori: l'elevata efficienza e la resistenza all'alta pressione di esercizio, a causa della differenza di pressione che va da 70 a 150 bar nel sistema di CO₂ trans-critico esaminato. Le equazioni termodinamiche sono mostrate di seguito:

$$h_{out,comp} - h_{in,com} = Dh_{com} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta h_{com}}{\eta_{is}} = \Delta h_{com,real} = W \quad (6)$$

$$P_{CO_2} = W \cdot \dot{m}_{CO_2} \quad (7)$$

$$P_{el,com} = \frac{P_{CO_2}}{\eta_{el/mec}} \quad (8)$$

Evaporatore

Le equazioni del bilancio energetico per l'evaporatore e lo scambiatore di calore interno sono le seguenti:

$$Q_{ev} = Dh_{ev} \cdot \dot{m}_{CO_2} \quad (9)$$

$$\dot{m}_w = \frac{Q_{ev}}{c_{Ph_2O} (T_{in,w} - T_{out,w})} \quad (10)$$

$$L_h + Dh_{sub} = Dh_{ev} \quad (11)$$

Scambiatore di calore interno

$$h(T_{reg}) - h(T_{ev}) = Dh_{reg} \quad (12)$$

$$Q_{IHEX} = Dh_{reg} \cdot \dot{m}_{CO2} \quad (13)$$

$$Dh_{reg} + h_{out,IHEX} = h_{out,gc} \quad (14)$$

$$T_{ev,CO2} + DT_{cold,reg} = T_{out,IHEX} \quad (15)$$

Modelli di cogenerazione e caldaie

Il motore a combustione interna è stato considerato la tecnologia di riferimento per le applicazioni di cogenerazione. Il modello energetico del componente si basa sulle relazioni fondamentali della prima legge della termodinamica. In particolare, una volta fissate le dimensioni elettriche della cogenerazione, l'efficienza elettrica e l'efficienza di recupero del calore del motore, è possibile calcolare la potenza termica e i consumi di carburante. Inoltre, sempre con MATLAB, è stato possibile implementare la curva di efficienza elettrica tipica per piccoli CHP. In tal modo, è possibile valutare tutte le uscite di energia quando il CHP funziona in condizioni di carico parziale. Detto questo, la strategia di controllo della cogenerazione per la produzione di acqua calda sanitaria è il cosiddetto monitoraggio termico. In dettaglio, mantenendo sotto controllo la temperatura dell'acqua calda, l'unità di controllo riduce la velocità di rotazione del motore. In questo modo è possibile modulare sia l'energia elettrica che quella termica, per fare ciò in MATLAB è stato implementato un controller lineare. Allo stesso modo, lo stesso approccio è stato utilizzato per la caldaia convenzionale. Per quanto riguarda i valori di efficienza di recupero elettrico e termico della cogenerazione, sono stati assunti pari a 0,29 e 0,51, rispettivamente, alla potenza nominale. D'altra parte, l'efficienza termica della caldaia convenzionale è stata fissata a 0,85.

Risultati e discussioni

È stato condotto uno studio parametrico per studiare la risposta del ciclo trans-critico di CO₂ durante le diverse condizioni operative e in che modo il sistema ibrido ne è influenzato, se confrontato con una Prospettiva di edificio nZEB. In questa sezione sono stati presentati e discussi i principali risultati derivati dai calcoli. Considerando il sistema ibrido, l'energia termica totale è stata stimata dalla somma di quattro pompe di calore a CO₂, una cogenerazione e un'energia HP tradizionale. L'efficienza totale del sistema associata all'uso di combustibili fossili è di 0,8466, considerando l'elettricità acquistata dalla rete nazionale e l'elettricità venduta a causa dell'impiego di pannelli fotovoltaici e micro CHP. La richiesta elettrica e i profili di eccesso di elettricità sono riportati nella Figura 8. Secondo l'equazione del bilancio di energia elettrica (16), l'eccesso di elettricità è riportato con valori negativi nella Figura 9 poiché tale energia è stata scaricata nella rete. Fondamentalmente, tutti i consumi elettrici sono stati considerati valori positivi, mentre è negativa l'energia elettrica sbilanciata che viene rilasciata dal sistema energetico. Inoltre, quando viene implementata l'opzione di misurazione netta, quell'energia potrebbe essere gestita per ridurre il costo livellato dell'elettricità vendendola ai servizi locali. In alternativa, installando il banco batterie, potrebbe essere conservata per un uso spostato nel tempo.

Figure 8. Electrical demand and electricity excess (in red the amount of energy purchased in one year and in green the energy produced).

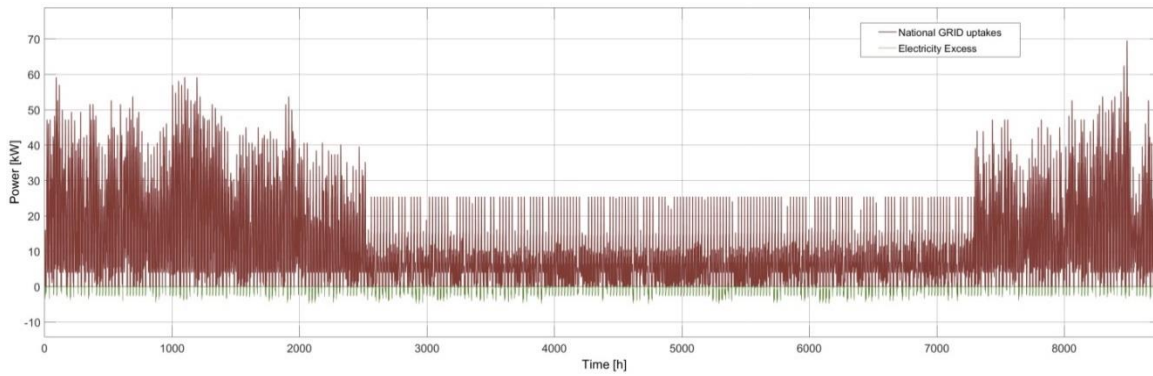
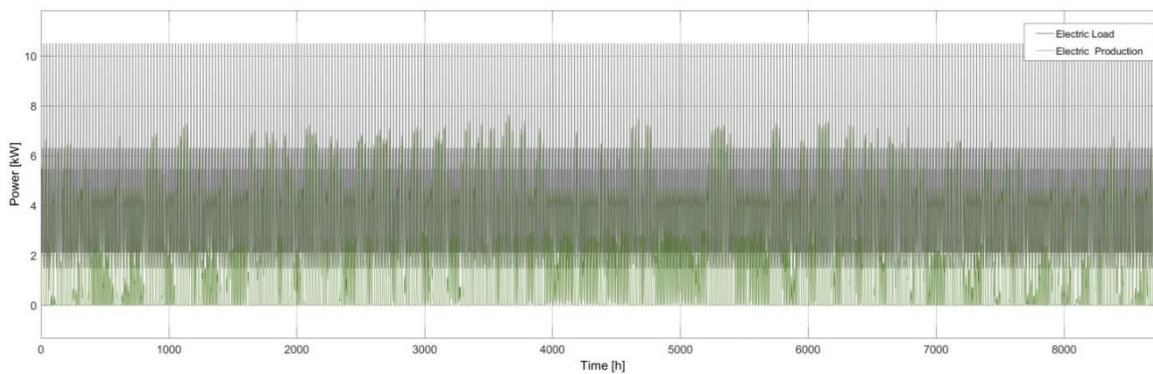
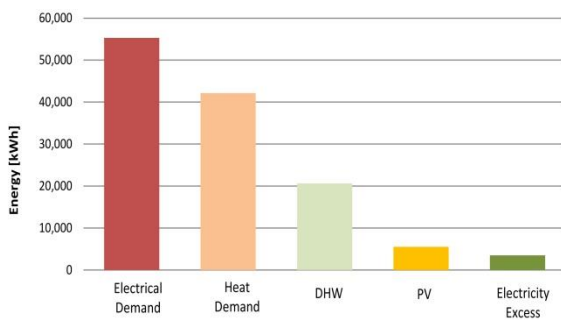


Figure 9. Electric load vs PV electricity production.

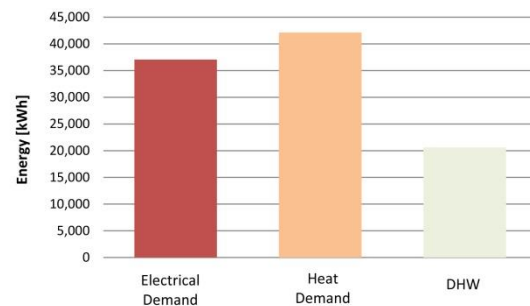


Il profilo di potenza in uscita dei pannelli fotovoltaici e il carico elettrico complessivo degli edifici sono sovrapposti sulla stessa tabella mostrata nella Figura 9. Tutta l'energia del sistema ibrido, ordinata per tipologia, è riassunta nella Figura 10a, mentre la Figura 10b mostra il fabbisogno elettrico, termico e sanitario del tradizionale sistema energetico.

Figure 10. Total energy produced in the hybrid energy system (a) and in the traditional energy system (b).



(a)



(b)

L'efficienza globale è stata stimata considerando gli indicatori di prestazione come precedentemente dettagliato. Confrontando gli scenari energetici, emerge come l'ibridazione porti a migliori prestazioni con conseguente efficienza rispetto a quella basata sull'uso di combustibili fossili, pari rispettivamente a 0,5528 e 0,8395 per il sistema energetico tradizionale e quello ibrido. Gli ulteriori indicatori di prestazione energetica sono stati riassunti nella tabella 5 e 6.

Table 5. Comparison between hybrid and traditional systems.

Energy performance indicators	Hybrid System	Traditional System
heating efficiency	2.31	0.67
DHW efficiency	0.52	0.80
RES fraction on electricity	0.10	-
renewable heat fraction	0.42	-

Table 6. Heat Transcritical hybrid and traditional systems performance indicators.

Performance Indicator	Hybrid System	Traditional System
PEC [kWh]	140,583	177,647
PES [kWh]	37,060	
f_{RES}	0.27	-
System efficiency	0.84	0.55

I risultati della simulazione hanno confermato che l'efficienza è maggiore nel sistema ibrido, dimostrando che l'obiettivo nZEB è più difficile da raggiungere con i combustibili fossili. In effetti, l'impiego di elettricità è facilitato dal sistema ibrido piuttosto che dai combustibili fossili (ad esempio, pompe di calore contro caldaie a combustibili fossili); inoltre, il rapporto di energia rinnovabile non è vicino allo zero perché include energia fuori sede prodotta da fonti rinnovabili [41]. Nel dettaglio, l'efficienza di riscaldamento viene calcolata come rapporto tra il calore totale prodotto e l'energia fossile primaria. Per tale motivo, l'efficienza di riscaldamento è superiore a 1. Infine, l'analisi di sensibilità è stata effettuata modificando i carichi elettrici e termici di -15% e + 15%, in modo da modificare il PTHR dell'edificio, come riportato nelle figure 11 e 12, insieme agli indicatori di prestazione valutati. Qui di seguito, i principali risultati associati ad entrambi i casi sono riassunti:

- Nel primo caso, a causa della maggiore domanda di elettricità, il PEC aumenta; l'energia elettrica aggiuntiva deve essere acquistata dalla rete nazionale. Al contrario, nel secondo caso, quando il carico termico aumenta, il PEC tende a ridursi.
- Quando l'edificio PTHR è più alto, la frazione rinnovabile f_{RES} diminuisce quasi in modo lineare a causa del fatto che l'energia complessiva richiesta è maggiore; Ciononostante, la produzione di elettricità rinnovabile rimane costante e la sua frazione sul consumo finale di elettricità diminuisce di conseguenza.
- Il PES tende ad aumentare leggermente man mano che l'edificio PTHR cresce, a causa della riduzione dell'eccesso di elettricità

Figure 11. Performance indicator values with changes in building electrical loads.

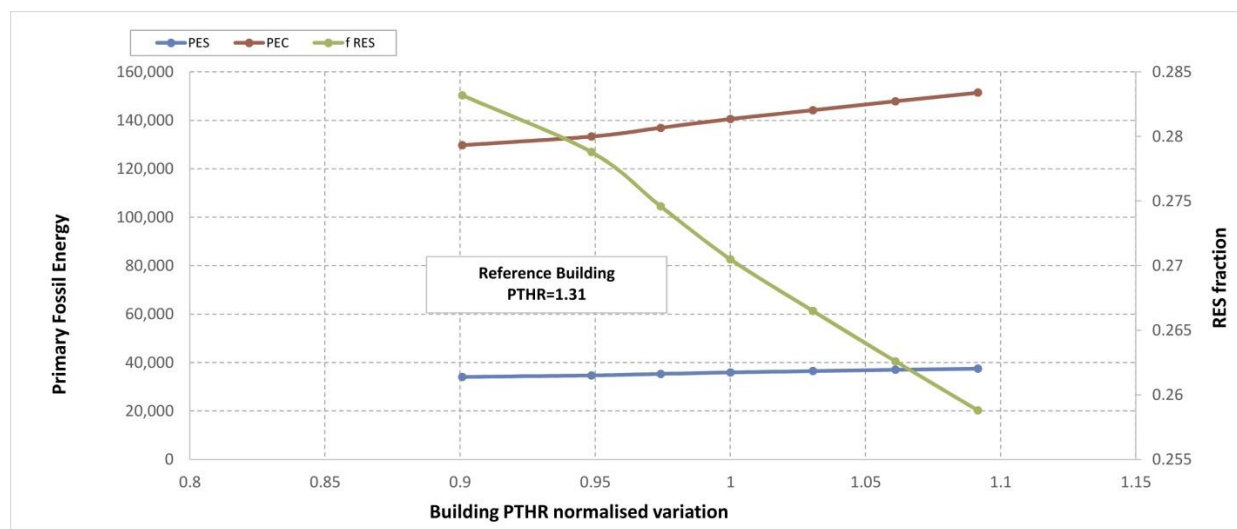
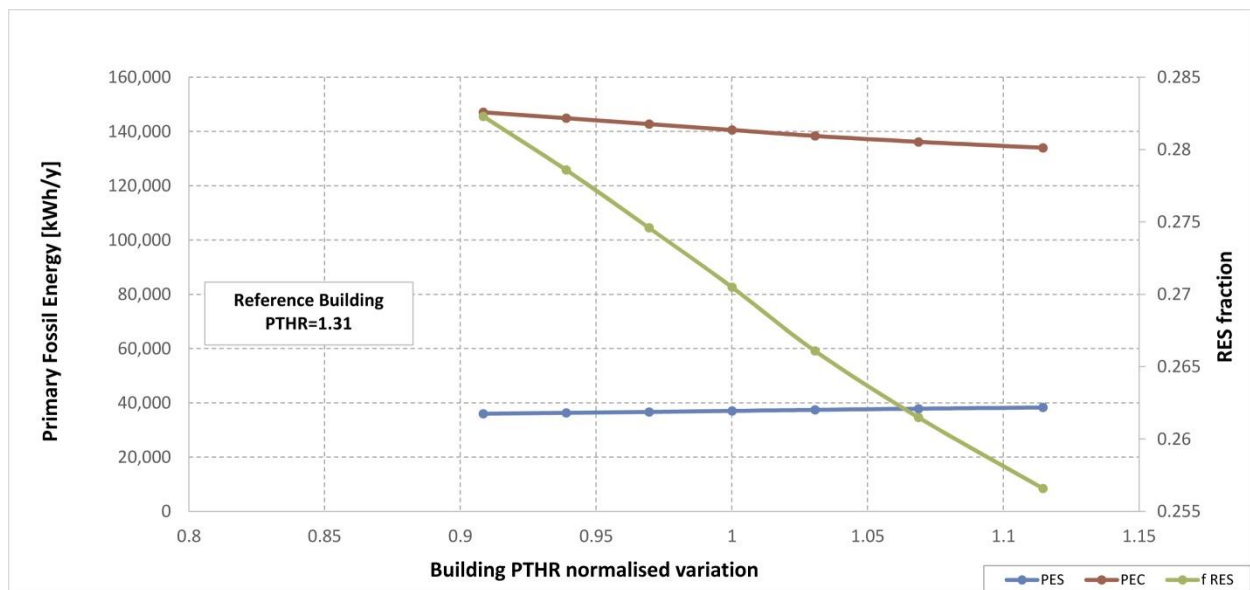


Figure 12. Performance indicator values with changes in building thermal loads.



I due grafici seguenti mostrano l'analisi della sensibilità dell'eccesso di elettricità con la variazione del PTHR dell'edificio, distinguendo anche le quantità rinnovabili e fossili. Vale la pena notare che maggiore è il carico elettrico, implicando un valore PTHR più elevato, minore è l'eccesso di elettricità; viceversa, quando il carico elettrico diminuisce, è disponibile più energia per essere convertita in calore dagli HP o per essere immagazzinata in dispositivi dedicati (vedere la Figura 13a). Lo stesso approccio è stato utilizzato per valutare come l'energia rinnovabile può contribuire all'eccesso di elettricità, modificando il carico termico come mostrato nella Figura 13b. Inoltre, le figure 14 e 15 mostrano l'analisi della sensibilità degli indicatori di prestazione con variazioni dei carichi termici ed elettrici rispettivamente quando è collegato un banco di batterie. In particolare, le figure 14 e 16, forniscono i risultati dell'analisi di sensibilità relativi agli indicatori di prestazione del sistema ibrido, una volta che è stato dotato di un dispositivo di memorizzazione. Per tali calcoli, l'efficienza di andata e ritorno per la banca di archiviazione è stata assunta pari a 0,8. Di conseguenza, dai dati riportati nella Figura 13 è stato possibile valutare immediatamente l'effettiva elettricità immagazzinabile, che è in grado di influenzare positivamente il consumo di energia fossile primaria dell'edificio e la frazione di RES. Confrontando gli scenari ibridi di riferimento (ovvero costruendo PTHR pari a 1), il sistema ibrido con il dispositivo di accumulo elettrico integrato mostra un'ulteriore riduzione del consumo di energia fossile primaria da 140.583 kWh a 133.909 kWh. Dato che l'eccesso di elettricità è pari a 3503 kWh, l'elettricità utilizzabile dalle batterie è di soli 2802 kWh, a causa delle perdite di energia per il processo di carica e scarica. Di conseguenza, è possibile affermare che l'implementazione di sistemi ibridi complessi insieme allo stoccaggio rappresenta un'opzione alternativa praticabile per ridurre il consumo di energia fossile primaria nelle abitazioni. In tal modo, è possibile ottenere un uso più efficace e razionale delle energie rinnovabili, favorendo il percorso verso la qualificazione NZEB associato agli edifici esistenti. Con riferimento alle figure 14 e 15 è degno di nota come la riduzione PEC associata all'applicazione del dispositivo di memorizzazione sia maggiore quando la creazione di PTHR è pari a 0,9. In effetti, in quel caso, il vantaggio calcolato è di 8163 kWh, mentre è pari a 5218 kWh quando il PTHR dell'edificio è 1,09. Inoltre, quando l'edificio PTHR cambia a causa delle variazioni del carico termico, la linea di tendenza PEC si sposta verso il basso e la sua pendenza è sostanzialmente costante. In ultima analisi, i 3 casi studio sono stati confrontati attraverso un istogramma, che mostra il fabbisogno di energia primaria dell'edificio nel caso del sistema tradizionale, del sistema ibrido e del sistema ibrido con accumulo. L'uso di un sistema di generazione di energia ad alte prestazioni riduce il fabbisogno energetico di quasi il 50%, come mostrato nella Figura 16. La Figura 16b rappresenta il fabbisogno di energia primaria in base al decreto legislativo 192/05 che attua la direttiva 2002/91 della Comunità europea [42]. Il sistema di certificazione energetica prevede che il contributo dell'illuminazione e della forza motrice non sia conteggiato nel consumo di energia, mostrando un fabbisogno di energia fossile primaria significativamente inferiore. Ai fini della certificazione energetica, vengono presi in considerazione i valori mostrati nella Figura 16b. nel caso del sistema di accumulo ibrido, il fabbisogno energetico primario dell'edificio è pari a 74 kWh / m²y, non ancora in linea con quanto riportato nei termini della classificazione NZEB.

Figure 13. Sensitivity analysis on electrical excess with changes in normalized PTHR, increasing Electrical Load (a) and Thermal Load (b).

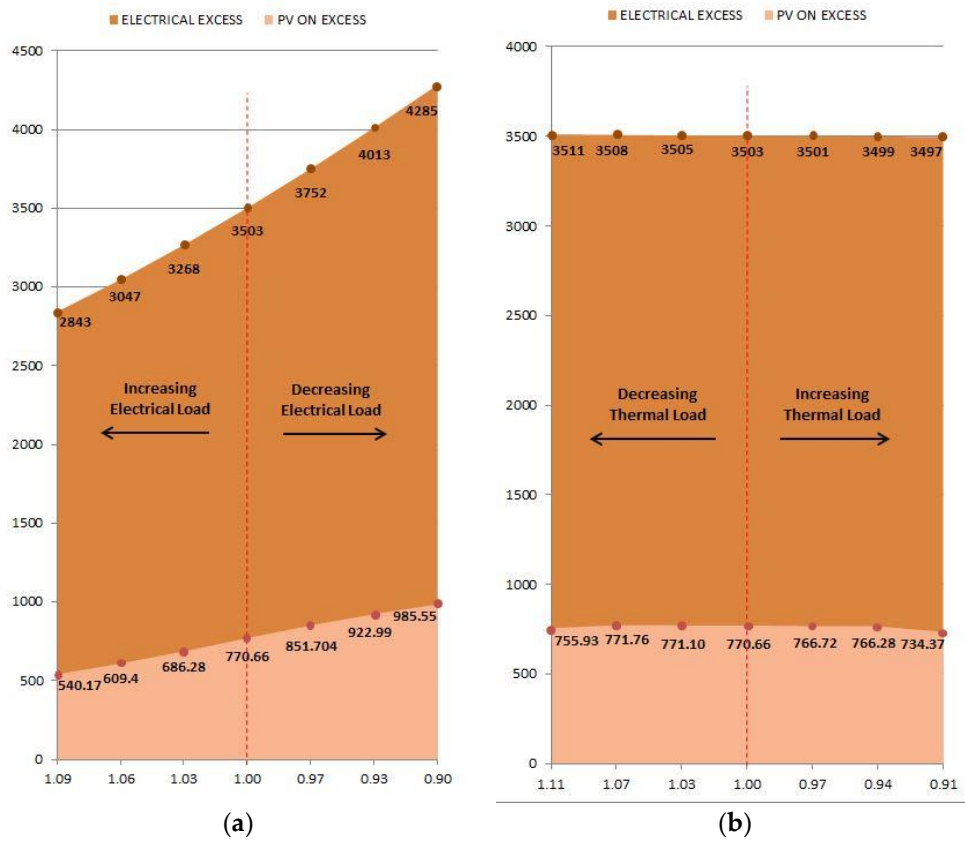


Figure 14 Sensitivity analysis on Performance indicators with changes in Thermal loads when a batteries bank is connected.

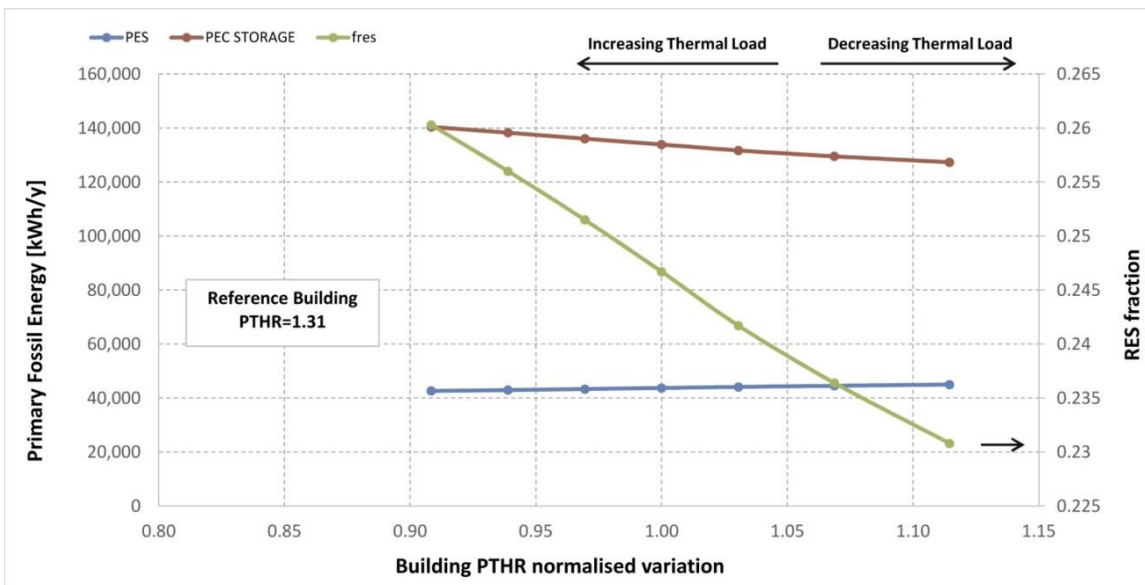


Figure 15. Sensitivity analysis on Performance indicators with changes in building Electrical loads, when a batteries bank is connected.

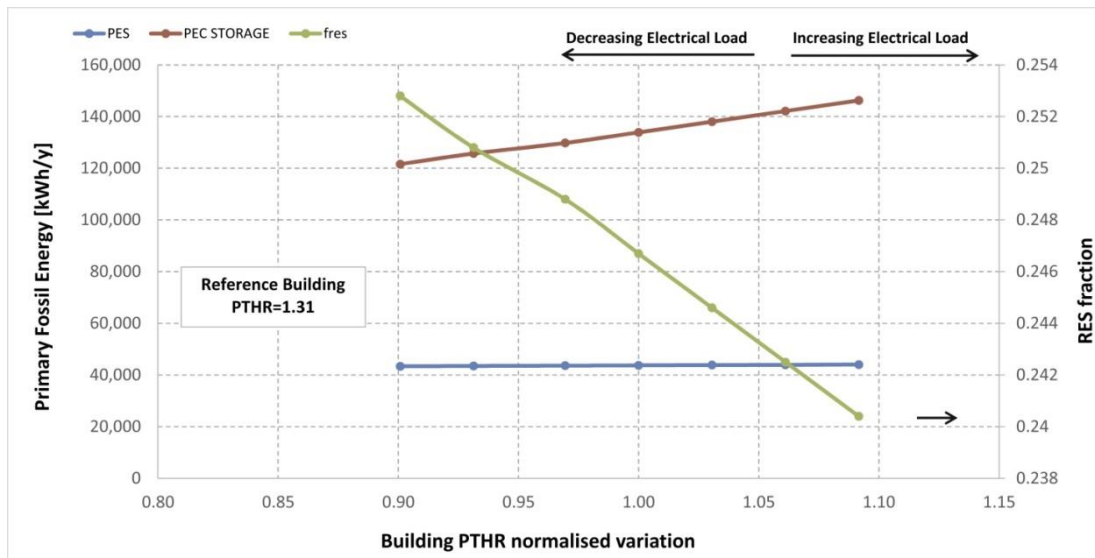
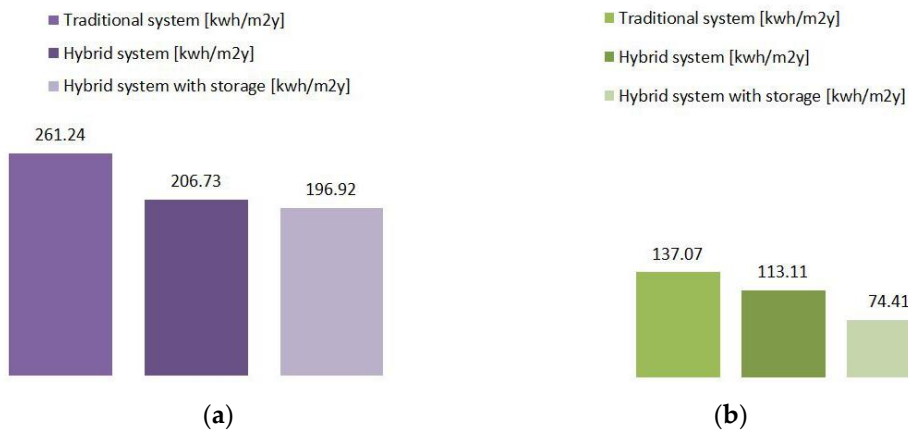


Figure 16. Normalized building primary fossil energy need over one year (a), normalized building primary fossil energy need over one year neglecting the electricity contribution (b).



1. Dynamic Simulation model of trans-critical carbon dioxide heat pump application for boosting low temperature distribution networks in dwellings. De Santoli, L., Lo Basso Gianluigi, Astiaso Garciaa D., Piras, G., Spiridigliozzi, G., energies 2019.
2. Deng, S.; Wang, R.Z.; Dai, Y.J. How to evaluate performance of net zero energy building— A literature research. *Energy* **2014**, *71*, 1–16. doi:10.1016/j.energy.2014.05.007.
3. Braulio-Gonzalo, M.; Bovea, M.D. Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimization. *Energy Build.* **2017**, *150*, 527–545. doi:10.1016/j.enbuild.2017.06.005.
4. Del Amo, A.; Martínez-Gracia, A.; Bayod-Rújula, A.A.; Antoñanzas, J. An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/ thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring. *Appl. Energy* **2017**, *186*, 140–151. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.011.
5. Dincer, I.; Acar, C. Smart energy systems for a sustainable future. *Appl. Energy* **2017**, *194*, 225–235. doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.058.
6. Castellani, B.; Gambelli, A.M.; Morini, E.; Nastasi, B.; Presciutti, A.; Filippini, M.; Nicolini, A.; Rossi, F. Experimental Investigation on CO₂ Methanation Process for Solar Energy Storage Compared to CO_c-Based Methanol Synthesis. *Energies* **2017**, *10*, 855. doi:10.3390/en10070855.
7. Noussan, M.; Nastasi, B. Data Analysis of Heating Systems for Buildings-A Tool for Energy Planning, Policies and Systems Simulation. *Energies* **2018**, *11*, doi:10.3390/en11010233.
8. Rosa, F.; Carbonara, E. An analysis on technological plant retrofitting on the masonry behaviour structures of 19th century traditional historical buildings (THB) in Rome. *Energy Procedia* **2017**, *133*, 121–134. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.378.

9. Albo, A.; Rosa, F.; Tiberi, M.; Vivio, B. High-efficiency and low-environmental impact systems on a historical building in rome: An InWall solution. *WIT Trans. Built Environ.* **2014**, *142*, 529–540. doi:10.2495/ARC140451.
10. Groppi, D.; de Santoli, L.; Cumo, F.; Astiaso Garcia, D. A GIS-based model to assess buildings energy consumption and usable solar energy potential in urban areas. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *40*, 546–558. doi:10.1016/j.scs.2018.05.005.
11. Lo Basso, G.; Rosa, F.; Astiaso Garcia, D.; Cumo, F. Hybrid systems adoption for lowering historic buildings PFEC (primary fossil energy consumption)—A comparative energy analysis. *Renew. Energy* **2018**, *117*, 414–433. doi:10.1016/j.renene.2017.10.099.
12. Groppi, D.; Astiaso Garcia, D.; Lo Basso, G.; Cumo, F.; De Santoli, L. Analysing economic and environmental sustainability related to the use of battery and hydrogen energy storages for increasing the energy independence of small islands. *Energy Convers. Manag.* **2018**, *177*, 64–76. doi:10.1016/j.enconman.2018.09.063.
13. Dominković, D.F.; Bačeković, I.; Sveinbjörnsson, D.; Pedersen, A.S.; Krajačić, G. On the way towards smart energy supply in cities: The impact of interconnecting geographically distributed district heating grids on the energy system. *Energy* **2017**, *137*, 941–960.
14. Dominković, D.F.; Bin Abdul Rashid, K.A.; Romagnoli, A.; Pedersen, A.S.; Leong, K.C.; Krajačić, G.; Duić, N. Potential of district cooling in hot and humid climates. *Appl. Energy* **2017**, *208*, 49–61. doi:10.1016/j.apenergy.2017.09.052.
15. Becchio, C.; Dabbene, P.; Fabrizio, E.; Monetti, V.; Filippi, M. Cost optimality assessment of a single family house: Building and technical systems solutions for the nZEB target. *Energy Build.* **2015**, *90*, 173–187. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.050.
16. Nastasi, B.; Di Matteo, U. Innovative use of Hydrogen in energy retrofitting of listed buildings. *Energy Procedia* **2017**, *111*, 435–441. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.205.
17. Bourrelle, J.S.; Andresen, I.; Gustavsen, A. Energy payback: An attributional and environmentally focused approach to energy balance in net zero energy buildings. *Energy Build.* **2013**, *65*, 84–92. doi:10.1016/j.enbuild.2013.05.038.
18. Zhao, Y.; Lu, Y.; Yan, C.; Wang, S. MPC-based optimal scheduling of grid-connected low energy buildings with thermal energy storages. *Energy Build.* **2015**, *86*, 415–426. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.019.
19. Mitra, S.; Sun, L.; Grossmann, I.E. Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices. *Energy* **2013**, *54*, 194–211. doi:10.1016/j.energy.2013.02.030.
20. Al-Sharafi, A.; Yilbas, B.S.; Sahin A.Z.; Ayar, T. Performance assessment of hybrid power generation systems: Economic and environmental impacts. *Energy Convers. Manag.* **2017**, *132*, 418–431. doi:10.1016/j.enconman.2016.11.047.
21. Levihn, F. CHP and heat pumps to balance renewable power production: Lessons from the district heating network in Stockholm. *Energy* **2017**, *137*, 670–678. doi:10.1016/j.energy.2017.01.118.
22. Aprea, C.; Maiorino, A. An experimental evaluation of the transcritical CO₂ refrigerator performances using an internal heat exchanger *Int. J. Refrig.* **2008**, 1006–1011. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.12.016.
23. Cabello, R.; Sanchez, D.; Llopis, R.; Torrella, E. Experimental evaluation of the energy efficiency of a CO₂ refrigerating plant working in transcritical conditions. *Appl. Therm. Eng.* **2008**, 1596–1604.
24. Cavallini, A.; Cecchinato, L.; Corradi, M.; Fornasieri, E.; Zilio, C. Two-stage transcritical carbon dioxide cycle optimisation: A theoretical and experimental analysis. *Int. J. Refrig.* **2008**, *28*, 1274–1283. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.09.004.
25. Cecchinato, L.; Corradi, M.; Fornasieri, E.; Zamboni, L. Carbon dioxide as refrigerant for tap water heat pumps: A comparison with the traditional solution. *Int. J. Refrig.* **2005**, *28*, 1250–1258. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.05.019.
26. Cho, H.; Lee, M.Y.; Kim, Y. Numerical evaluation on the performance of advanced CO₂ cycles in the cooling mode operation *Appl. Therm. Eng.* **2009**, *29*, 1485–1492, doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.06.030.
27. Kauf, F. Determination of the optimum high pressure for transcritical CO₂ refrigeration cycle. *Int. J. Therm. Sci.* **1999**, *38*, 325–330.
28. Kim, M.H.; Pettersen, J.; Bullard, C.W. Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2004**, *30*, 119–174, doi:10.1016/j.peccs.2003.09.002.
29. Liao, S.M.; Zhao, T.S.; Jakobsen, A. A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles. *Appl. Therm. Eng.* **2000**, *20*, 831–841.
30. Wang, H.; Maa, Y.; Tian, T.; Li, M. Theoretical analysis and experimental research on transcritical CO₂ two stage compression cycle with two gas coolers (TSCC + TG) and the cycle with intercooler (TSCC + IC). *Energy Convers. Manag.* **2011**, *52*, 2819–2828. doi:10.1016/j.enconman.2011.02.003.
31. Kim, S.C.; Kim, M.S.; Hwang, I.C.; Lim, T.W. Heating performance enhancement of a CO₂ heat pump system recovering stack exhaust thermal energy in fuel cell vehicles, *Int. J. Refrig.* **2007**, 1215–1226. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.02.002.
32. Scoccia, R.; Toppi, T.; Aprile, M.; Motta, M. Absorption and compression heat pump systems for space heating and DHW in European buildings: Energy, environmental and economic analysis. *J. Build. Eng.* **2018**, *16*, 94–105. doi:10.1016/j.job.2017.12.006.

33. Lan Yang, J.; Tai Ma, Y.; Li, M.X.; Hua, J. Modeling and simulating the transcritical CO₂ heat pump system. *Energy* **2010**, *35*, 4812–4818. doi:10.1016/j.energy.2010.09.007.
34. Lund, H.; AlbergØstergaard, P.; VadMathiesen, B. Smart energy and smart energy systems. *Energy* **2010**, *137*, 556–565. doi:10.1016/j.energy.2017.05.123.
35. Sarkar, J.; Bhattacharyya, S.; Gopal, M.S. Natural refrigerant-based subcritical and transcritical cycles for high temperature heating. *Int. J. Refrig.* **2007**, *30*, 3–10. doi:10.1016/j.ijrefrig.2006.03.008.
36. Hepbasli, A.; Kalinci, Y. A review of heat pump water heating systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 1211–1229. doi:10.1016/j.rser.2008.08.002.
37. Xie, Y.; Wang, Z.; Cui, K.; Zhang, X. The Exergy Analysis of Gas Cooler In CO₂ Heat Pump System. *Procedia Environ. Sci.* **2011**, *11*, 1555–1560. doi:10.1016/j.proenv.2011.12.234.
38. CO₂ As Refrigerant: The Transcritical Cycle. Available online: <https://www.achrnews.com/articles/94092-co2-as-refrigerant-the-transcritical-cycle> (accessed on 15 November 2018).
39. Sarkar, J.; Bhattacharyya, S.; Gopal, M.R. Optimization of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications, *Int. J. Refrig.* **2004**, 830–838, doi:10.1016/j.ijrefrig.2004.03.006.
40. Evoplus-B 120/220.32 M product specifications. Available online: <https://www.dabpumps.com/it/evoplus-small> (accessed on 15 November 2018).
41. Oliveira Panão, M.J.N. The overall renewable energy fraction: An alternative performance indicator for evaluating Net Zero Energy Buildings. *Energy Build.* **2016**, *127*, 736–774, 10.1016/j.enbuild.2016.06.057.
42. Desideri, U.; Proietti, S.; Arcioni, L.; Leonardi, D.; Sdringola, P. Comparative analysis of three methodologies for the energy certification applied to residential buildings, developed in Italy in conformity with European directive EPBD 2002/91. In Proceedings of the ECOS 2007—Proceedings of the 20th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Padua, Italy, 25–28 June 2007; p. 1495.

Lo sviluppo di tecnologie di combustione avanzate di idrocarburi a base di miscele di idrogeno dimenticate nelle applicazioni con turbina a gas è un'area di grande interesse [12]. [13] hanno anche trovato una correlazione lineare della velocità del laminar laminare con la concentrazione di idrogeno nella miscela di carburanti mediante simulazioni numeriche sulla combustione premiscelata con aria idrogeno-metano. Imteyaz et al. [14] ha condotto indagini sperimentali sulle caratteristiche delle fiamme arricchite con idrogeno in un combustore premiscelato stabilizzato a turbolenza. Dinesh et al. [15] inoltre, confronta la differenza tra le caratteristiche della fiamma vorticoso non premiscelata del syngas di arricchimento di H₂ and CO. Indicava che il combustibile arricchito di idrogeno brucia per formare una fiamma molto più densa con una bolla di rottura del vortice più grande rispetto al syngas magro di H₂ ma ricco di CO. Rajpara et al. [16] ha studiato le caratteristiche di emissione del combustibile CH₄ / H₂ blend in un turbino può bruciare e ha sottolineato che l'aggiunta di idrogeno può aumentare la temperatura della fiamma, ridurre le dimensioni della fiamma e quindi ridurre le emissioni di CO con un aumento marginale delle emissioni di NO. Oltre agli studi sperimentali e computazionali sulle velocità di combustione delle miscele metano-aria [17], sono stati inoltre condotti progetti di ricerca sulle velocità di combustione delle miscele aria-idrogeno [18,19]. Altri studi di ricerca [20] sono stati incentrati sulla valutazione termoeconomica di un nuovo sistema integrato di cogenerazione che incorpora tecnologie basate sull'energia solare, il reforming del biogas-vapore con produzione di metanolo e idrogeno. Oltre al GN, altri combustibili gassosi caratterizzati da un LHV (valore di riscaldamento inferiore) relativamente basso, sono diventati l'oggetto dell'indagine in tutti i paesi del mondo [21e23]. Pertanto, alcuni lavori, come [24,25], hanno condotto l'analisi sull'ottimizzazione del motore idrogeno-diesel a doppio combustibile per i sistemi di cogenerazione, mentre Schefer et al. [26] ha studiato sperimentalmente e numericamente la combustione del metano arricchito con idrogeno in condizioni di combustione premiscelate magre. Inoltre, risultato della riduzione simultanea delle emissioni di NO_x nel funzionamento di un motore a doppia alimentazione con idrogeno di oltre il 70% quando un ricircolo dei gas di scarico del 40% (EGR) è stato applicato il tasso, mentre i tempi di iniezione diesel controllavano il rapporto di equivalenza locale [27e29]. Un'impressionante recensione [30] ha studiato l'idrogeno come combustibile per i motori ad accensione spontanea (CI). Gli autori concludono che l'idrogeno è un combustibile promettente, ma sono necessarie ulteriori ricerche approfondite per valutare se le tecniche di combustione a bassa temperatura possono aiutare nella riduzione degli NO_x [31]. Altri autori hanno studiato l'aggiunta di idrogeno per la combustione provocata dai motori diesel. In tal caso, quando il motore funziona a basso carico, con un rapporto di condivisione di energia all'idrogeno estremamente elevato, si è registrata una riduzione delle emissioni di carbonio e NO_x di oltre il 90%. Inoltre, le emissioni di fuliggine sono diminuite dell'85% rispetto all'alimentazione diesel convenzionale [32]. S. Ouchikh et al. [33] ha studiato l'effetto dell'arricchimento del gas naturale con le caratteristiche di combustione dell'idrogeno di un motore diesel a doppia alimentazione. Bing Ge et al. [34] erano focalizzati sull'effetto dell'arricchimento di gas tonaturale che turbina la fiamma a condizioni di pressione atmosferica utilizzando un bruciatore DLE (Dry Low Emission) a radiazione. Zhang et al. E Wang et al. [35,36] ha condotto lo studio sperimentale sulla ciclicvariazione in un motore a scintilla alimentato a biogas e miscele di idrogeno; il risultato mostra che alle frazioni di idrogeno del 15% e 35% nelle miscele, la stabilità operativa del motore aumenta e le variazioni cicliche diminuiscono. Halter et al. [37] ha fornito la caratterizzazione degli effetti dell'aggiunta di idrogeno nelle fiamme / metano premiscelate. Gli esperimenti e le analisi mostrano che una piccola quantità di addizione di idrogeno in turbolente premiscelato metano-air flames introduce cambiamenti nelle caratteristiche sia istantanee che della fiamma media. Altre opere [38,39] studiate, con approcci numerici ed sperimentali, sugli effetti del potenziale idrogeno, quando i motori di accensione del parco sono alimentati con diverse frazioni di CNG, CO₂, H₂ blend. I risultati hanno mostrato che con l'aumento della frazione di CO₂, l'effetto del vortice sulla grinza della fiamma si indebolisce e aumenta il periodo di sviluppo della fiamma. Hu et al. [40] ha condotto uno studio sperimentale sulle prestazioni e le emissioni del motore alimentato con miscele di gas e idrogeno a bassa LHV. I risultati mostrano che l'influenza del rapporto di equivalenza sulla velocità laminare che brucia in fiamme è piuttosto complessa. Con l'aumento della frazione non idrocarbureica, il flusso di gas a densità energetica diminuisce, la velocità della fiamma laminare diminuisce; al contrario, con l'aumentare della frazione di idrogeno, aumenta la velocità della fiamma laminare della combustione del gas miscelato con idrogeno; maggiore è la frazione di idrogeno, maggiore è il tasso di infiammabilità, aumentando anche l'instabilità della fiamma. Chiesa et al. [41] ha studiato la possibilità di bruciare idrogeno in una turbina a gas di grandi dimensioni e per impieghi gravosi progettata per funzionare con gas naturale come misura a breve termine possibile per ridurre le emissioni di gas serra del settore energetico. il lavoro di di Gaeta et al. [42] si occupa dello sviluppo di un modello dinamico di una turbina MicroGas commerciale (MGT) da 100 kW alimentata con miscele di gas naturale o metano e carburanti alternativi (ovvero l'idrogeno). Attualmente, i MGT più installati possono essere alimentati con basse concentrazioni di idrogeno miscelate con gas naturale [43]. Cappelletti et al. [44] ha descritto la progettazione numerica del combustore MGT da 100 kW per il 100% di idrogeno, concludendo che generalmente il combustore alimentato a idrogeno produce più NO di un carburante CH₄, ma funziona in condizioni molto magre con campo di temperatura molto basso. Al contrario, Lee et al. [45] ha lavorato sulle prestazioni di combustione delle turbine a gas, testando idrogeno e

monossido di carbonio di gas sintetico come combustibile per MGT. Quindi, deSantoli et al. [46] si sono concentrati sul potenziale utilizzo delle miscele di H₂NG nelle tecnologie ben collaudate, come i motori a combustione interna, per valutare i punti di forza e di debolezza di tale applicazione. In altri progetti di ricerca le conclusioni principali, provenienti dalla campagna sperimentale eseguita su un pre -la versione commerciale dimicro CHP (60 kWel), sono state presentate tenendo conto dei requisiti relativi all'applicazione delle abitazioni [47]. Inoltre, LoBasso et al. [48,49] ha studiato gli effetti della dipendenza da idrogeno sull'efficienza di recupero di elettricità e calore, nonché sulle emissioni inquinanti di un micro-CHP a condensazione. L'idrogeno offre la possibilità di lavorare anche con miscele molto magre [50]. Pertanto, l'efficienza enginesthermal può essere aumentata e le emissioni di gas di scarico ridotte con l'aggiunta di idrogeno [51,52]. Lounici et al. [53] ha riferito che la trasformazione dell'idrogeno in GN è un metodo promettente per migliorare la modalità a doppia alimentazione, specialmente a bassi carichi del motore. I risultati hanno mostrato che le emissioni di THC e CO sono generalmente ridotte di H₂enrichment a seguito del miglioramento dell'utilizzo del combustibile gassoso. Da quel sondaggio della letteratura emerge che l'idrogenazione era ampiamente considerata per alimentare gli ICE che erano dedicati alle applicazioni di trasporto. Pertanto, solo alcuni progetti di ricerca riguardanti MGT in modalità CHP e con i loro componenti principali possono essere trovati nella letteratura recente. Per questo motivo, gli autori hanno deciso di fornire valori di riferimento che potrebbero essere interessanti per scienziati e gestori energetici. È degno di nota il modo in cui le prestazioni MGT sono fortemente correlate alle condizioni locali del sito di installazione e dell'ambiente, in cui i valori di pressione e temperatura sono di grande importanza. Quindi, questo lavoro consiste essenzialmente nella valutazione delle prestazioni ambientali e energetiche di tali dispositivi, quando sono alimentati da una miscela di gas naturale e idrogeno nelle operazioni estive e invernali. Dal punto di vista ambientale, altri autori hanno indagato sul calcolo delle emissioni di inquinanti relativi all'energia sistemabile per produrre più uscite. Inoltre, la maggior parte degli studi scientifici, riferendosi ad esempio alla valutazione delle emissioni di CO₂, considera solo quelli dovuti alla produzione di elettricità, trascurando la valutazione e la quantificazione di quelli relativi all'energia termica [54,55]. Pertanto, per valutare meglio le emissioni del sistema energetico con più prodotti e input, come nel caso della cogenerazione, sarebbe opportuno tener conto anche del diverso metodo di assegnazione [56]. Quindi lo scopo finale di questo documento è discutere come le emissioni specifiche debbano essere corrette per soddisfare i vincoli ambientali locali. Poiché le emissioni specifiche possono essere calcolate come il rapporto tra la portata del flusso di massa di inquinanti emessi e la produzione di energia, il loro cambio di valore cambia in diverse stagioni. In effetti, il derating ambientale influenza, da un lato il rapporto aria / carburante all'interno della camera di combustione, dall'altro l'energia prodotta da MGT. Ciò comporta valori di emissioni specifici più brevi quando la produzione di energia diminuisce durante l'estate.

[12] Ruscica G, Badami M, Portoraro A, Mura M. Di pietra B of the Ministry of economic development and ENEA, electrical system research. Report RSE; 2009.

[13] Sarlia VD, Benedetto AD. Laminar burning velocity of hydrogenemethane air premixed flames. *Int J Hydrogen Energy* 2007;32:637e46.

[14] Imteyaz BA, Nemitallah MA, Abdelhafez AA, Habib MA. Combustion behavior and stability map of hydrogen-enriched oxy-methane premixed flames in a model gas turbine combustor. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43:16652e66.

[15] Dinesh KKJR, Luo KH, Kirkpatrick MP, Malalasekera W. Burning syngas in a high swirl burner: effects of fuel composition. *Int J Hydrogen Energy* 2013;38:9028e42.

[16] Rajpara P, Shah R, Banerjee J. Effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of methane fuelled upward swirl can combustor. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43.

[17] Le Corre O, Saikaly K, Rosen MA. Effects on CHP plant efficiency of H₂ production through partial oxidation of natural gas over two group VIII metal catalysts. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37(13):10380e9.

[18] Wei L, Geng P. A, review on natural gas/diesel dual fuel combustion. emissions and performance *Fuel Process Technol* 2016;142:264e78.

[19] Menter FR, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model *Turbulence, Heat*. 2003.

[20] Pontecorvo Antonino, "reportStudy of a gas microturbine for cogeneration and hybrid systems", PhD Thesis, University of Naples, [Chapter 1].

[21] Marco Penzo. "Gas microturbines characteristics and use as energy sources for residential use", vol. 160; 2015. p. 750e9. 1 October.

[22] Valentini Elisa. Energy-environmental performance of cogeneration systems

[Digitare qui]

advanced and analysis of application cases. PhD Thesis. University of Bologna; 2014. p. 38e51.

[23] Kreuter W, Hofmann H. Electrolysis: the important energy transformers in a world of sustainable energy. *Int J Hydrogen Energy* 1998;661e6.

[24] Dimitriou Pavlos, TakuTsumijura YasumasaSuzuki. Hydrogen-diesel dual-fuel engine optimization for CHP systems *Energy* Volume, vol. 160; 2018. p. 740e52.

[25] Villante Carlo, Genovese Antonino. «Hydromethane: a bridge towards the hydrogen economy or an unsustainable promise». *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:11541e8.

[26] Sc hefer RW, Wicksall DM, Agrawal AK. Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner. *Proc Combust Inst* 2012;(1):843e51.

[27] Xiao Sen HouXin, ZhangZhun, QingHu. Experimental and numerical study on engine fueled with different fractions of natural gas/carbon dioxide/hydrogen blends. *Int J Hydrogen Energy* 26 February 2019;44(11):5599e606.

[28] Riccio G, Marini A, Martelli F. Numerical investigations of gas turbine combustion chamber Hydrogen fired. 2009. ISABE-2009-1112.

[29] Marini A, Cappelletti A, Riccio G, Martelli F. Cfd re-design of a gas turbine cantype combustion chamber hydrogen fired. Lisbon, Portugal: ECCOMAS CFD; 2010. 2010, June 14-17.

[30] Shih Hsin-Yi, Liu Chi-Rong. A computational study on the combustion of hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbine. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:15103e15.

[31] Cadorin M, Pinelli M, Vaccari A, Calabria R, Chiariello F, Massoli P, Bianchi E. Analysis of a micro gas turbine fed by natural gas and synthesis gas: MGT test bench and combustor CFD analysis. *J Eng Gas Turbines Power* 2012;134(7): 071401.

[32] panel, Mosaffaa AH, Ghaffarpourb Z, Farshic LGarousi. Thermo-economic assessment of a novel integrated CHP system incorporating solar energy based biogas-steam reformer with methanol and hydrogen production. *Sol Energy* 15 January 2019;178:1e16.

[33] Ouchikha S, Lounicia MS, Tarabetb L, Tazeroutc KLoubarcM. Effect of natural gas enrichment with hydrogen on combustion characteristics of a dual fuel diesel engine. *Int J Hydrogen Energy* 2016;142:264e78.

[34] BingGe YongbinJi, ZilaiZhang ShushengZang, YinshenTian HaiYubMingminChen, GuangyunJiao DongfangZhang. Experiment study on the combustion performance of hydrogen-enriched natural gas in a DLE burner. *Int J Hydrogen Energy* 21 May 2019;44(26):14023.

[35] Xu, J., Zhang, X., Zheng, S.-Z., Liu, J.-H., Experimental on combustion stability in an engine fueled with biogas and hydrogen blends, *Neiranji Xuebao/Trans CSICE (Chin Soc Intern Combust Engines)* 29(3), pp. 236-240.

[36] Wang Y, Zhang X, Li C. Experimental and modeling study of performance and emissions of SI engine fueled by natural gas/hydrogen mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 2010;7:2680e3.

[37] Halter F, Chauveau C. Gokalp, Characterization of the effects of hydrogen addition in premixed methane/air flames. *Int J Hydrogen Energy* 2008;32(13): 2585e92.

[38] Shih Hsin-Yi, Liu Chi-Rong. A computational study on the combustion of hydrogen - methane blended fuels for a micro gas turbine. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:15103e15.

[39] Altantzis C, Frouzakis CE, Tomboulides AG. Detailed numerical simulations of intrinsically unstable two-dimensional planar lean premixed hydrogen/air flames. *Proc Combust Inst* 2011;1:1261e8.

[40] Hu Zhunqing. Xin Zhang Study on laminar combustion characteristic of low

- calorific value gas blended with hydrogen in a constant volume combustion bomb. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:487e93.
- [41] Chiesa P, Lozza G, Mazzocchi. Using hydrogen as gas turbine fuel. *J Eng Gas Turbines Power* 2005;127(1):73e80.
- [42] di Gaeta A, Reale, Massoli P. A dynamic model of a 100 kW micro gas turbine fuelled with natural gas and hydrogen blends and its application in a hybrid energy grid. *Energy* 2017;129:299e320.
- [43] Hu Zhunqing, Zhang Xin. Experimental study on performance and emissions of engine fueled with lower heat value gas-hydrogen mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:1080e3.
- [44] Cappelletti A, Martelli F, Bianchi E, Trifoni. Numerical redesign of 100kw MGT combustor for 100% H₂ fueling, vol. 45. *Energy Procedia*; 2014. p. 1412e21.
- [45] Lee MC, Seo S Bin, Chung JH, Kim SM, Joo YJ, Ahn DH. Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas. *Fuel* 2010;89(7):1485e91.
- [46] de Santoli Livio, Lo Basso Gianluigi, Bruschi Daniele. Preliminary experimental analysis of a CHP hydro methane system. *J Energy Power Eng* 2013;7:1681e90.
- [47] Lo Basso Gianluigi, de Santoli Livio, Angelo Albo, Nastasi Benedetto. H₂NG (hydrogen-natural gas mixtures) effects on energy performances of a condensing micro-CHP (combined heat and power) for residential applications: an expeditious assessment of water condensation and experimental analysis. *Energy* 2015;84:397e418. *Energy* 84.
- [48] Lo Basso Gianluigi, Nastasi Benedetto, Garcia Davide Astiaso, Cumo Fabrizio. How to handle the Hydrogen enriched Natural Gas blends in combustion efficiency measurement procedure of conventional and condensing boilers. *Energy* 2017;123:615e36 (energy) 123.
- [49] Gianluigi Lo Basso, Livio de Santoli, Angelo Albo, Benedetto Nastasi. H₂NG (hydrogen-natural gas mixtures) effects on energy performances of a condensing micro-CHP (combined heat and power) for residential applications: an expeditious assessment of water condensation and experimental analysis.
- [50] Lo Basso Gianluigi, Nastasi Benedetto, Garcia Davide Astiaso, Cumo Fabrizio. How to handle the Hydrogen enriched Natural Gas blends in combustion efficiency measurement procedure of conventional and condensing boilers. *Energy* 2017;123:615e36 (energy) 123.
- [51] Nastasi Benedetto, Lo Basso Gianluigi. Hydrogen to link heat and electricity in the transition towards future Smart Energy Systems. *Energy* 2016;110:5e22.
- [52] Khan AR, Ravi MR. AnjanRay Experimental and chemical kinetic studies of the effect of H₂ enrichment on the laminar burning velocity and flame stability of various multicomponent natural gas blends. *Int J Hydrogen Energy* 8 January 2019;44(2):1192e212.
- [53] Lounici MS, Boussadi A, Loubar K, Tazerout. Experimental investigation on NG dual fuel engine improvement by hydrogen enrichment. *Int J Hydrogen Energy* 2014;36:21297.
- [54] Do Nascimento Marco Antonia Rosa, De Oliveira Rodrigues Lucilene, Cruz dos Santos Eraldo, Batista Gomes Eli Eber. Micro gas turbine engine , A review. www.intechopen.com.
- [55] Parente A, Galletti C, Riccardi J, Schiavetti M, Tognotti L. Experimental and numerical investigation of a micro-CHP flameless unit. *Appl Energy* January 2012;89(1):203e14. 0306-2619.
- [56] Magri Guglielmo, Di Perna Costanzo. Giorgio Serenelli Analysis of electric and thermal seasonal performances of a residential microCHP unit. *Appl Therm Eng* April 2012;36:193e201. 1359-4311.

GESTIONE E CONTROLLO DELL'ENERGIA DEGLI EDIFICI IN OTTICA NZEB

Stato dell'arte

1- Modellazione

La creazione di un modello di simulazione energetica consiste nell'elaborazione di una rappresentazione delle proprietà fisiche dell'edificio di riferimento, di tutti gli aspetti impiantistici e di quanto ancora ne caratterizza i guadagni interni (attrezzature e utenti).

I modelli di simulazione sono dunque strumenti multidisciplinari: vi confluiscono aspetti propri dell'ingegneria, dell'architettura, della fisica, delle scienze ambientali ed addirittura del comportamento.

Data la complessità della modellazione, le rappresentazioni degli edifici sono sempre soggette ad un margine di incertezza che, seppur non ripresentando l'esatto comportamento dell'edificio di riferimento, portano a simulare un risultato in linea con lo scenario reale.

In funzione delle semplificazioni adottate nella rappresentazione e soprattutto dell'unità temporale di simulazione, si distingue tra: simulazione stazionaria, simulazione quasi-stazionaria, simulazioni dinamica

1.1 Simulazione stazionaria

Il bilancio energetico viene eseguito come un confronto tra le temperature interne ed esterne medie stagionali, avendo una parete di separazione dotata di trasmittanza termica costante nel tempo, senza considerare inerzia termica o sfasamento. Gli input si limitano a scarse indicazioni geografiche, ad una sommatoria modellazione geometrica e spesso una indicazione del tutto indicativa degli impianti presenti. L'impiego di questa metodologia è approssimato, ma risulta semplice da eseguire e utile ad ottenere un riscontro rapido per un confronto tra diversi edifici (interessante a livello di mercato) o per ottenere dati preliminari nelle fasi iniziali della progettazione.[1]

1.2 Simulazione quasi-stazionaria

Il bilancio termico viene condotto sulla base di temperature medie mensili ed i fabbisogni totali vengono calcolati come somma dei fabbisogni mensili. L'analisi presenta globalmente le stesse caratteristiche e le stesse possibilità di impiego della precedente ma risulta leggermente più raffinata.[1]

1.3 Simulazione dinamica

L'analisi viene condotta con riferimento temporale orario o sub-orario. La raffinatezza dei dati consente una descrizione minuziosa del comportamento dell'edificio. Il dettaglio degli input cresce richiedendo una precisa collocazione (geografica e contestuale) e informazioni climatico-ambientali adeguate all'unità di simulazione. È possibile integrare parametri variabili nel tempo relativi al controllo e all'occupazione e tenere in conto gli effetti dovuti all'inerzia termica.

La complessità di questo tipo di strumento richiede una conoscenza approfondita di ogni elemento dell'edificio e una modellazione estremamente scrupolosa, per cui l'impiego deve essere giustificato dall'intento di utilizzarlo all'interno di un processo progettuale profondo e innovativo, che ne valorizzi e ne utilizzi le potenzialità in tutte le fasi, da quella preliminare a quella dettagliata. Nell'ottica di un impiego di un programma di simulazione all'interno di operazioni di ottimizzazione, saranno proprio i software dotati di queste capacità ad essere interpellati.[1]

2 - Metodi di ottimizzazione automatica

Il generico concetto di ottimizzazione si riferisce al processo che consenta di far sì che un problema sia decifrato nel modo più funzionale ed efficiente possibile. In ambito più stretto di ottimizzazione matematica, l'ottimizzazione si riassume in quel processo che porti alla migliore risoluzione di un problema all'interno di un set di alternative possibili. In questo tipo di problemi esistono:

$x = (x_1, \dots, x_n)$	variabili di input
$g_j(x) = 0$ con $(j = 1; \dots; m)$	vincoli
$f_i(x)$ con $(i = 1; \dots; k)$	funzioni obiettivo

dove, in generale, il vettore x può essere di natura continua, discreta o mista nello spazio n -dimensionale, $g_j(x)$ e $f_i(x)$ sono non lineari, $g_j(x)$ possono essere sia vincoli di uguaglianza che di disuguaglianza, $f_i(x)$ è l'obiettivo da minimizzare e se $k > 1$ l'ottimizzazione risulta multi-obiettivo.[2]

[Digitare qui]

2.1 Ottimizzazione multi-obiettivo

La maggior parte dei problemi di ottimizzazione legati alla progettazione edilizia sono ad obiettivo singolo, ciononostante risulta sempre crescente, visto il rilievo maggiore della soluzione risultante, l'impiego di approcci ad obiettivo multiplo (ad esempio minimo consumo energetico e massimo comfort termico). Il metodo più semplice per la risoluzione di questo tipo di problemi risulta la scalarizzazione. In accordo con questa strategia, viene assegnato un fattore-peso $w_i > 0$ ad ognuna delle funzioni costo $f_i(x)$ e il problema multi-obiettivo viene ricondotto per mezzo della scalarizzazione lineare ad un problema ad obiettivo singolo risultando:

$$\min \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (1)$$

In alternativa occorre risolvere il problema considerando parallelamente l'insieme delle funzioni obiettivo. Allo scopo si ricorre a metodi di ottimizzazione (come algoritmi genetici - GA) che portino ad ottenere un insieme di soluzioni ottime (un fronte di Pareto, o set di soluzioni non dominate che presentino un compromesso tra i differenti obiettivi). La soluzione ultima va poi selezionata in base alle priorità dell'operatore o, più oggettivamente, secondo il metodo del punto utopico (soluzione a minor distanza da quella utopica dotata delle coordinate minime assolute del fronte paretiano).[2]

2.2 Ottimizzazione basata su simulazioni

Questa metodologia prevede l'accoppiamento di un programma di simulazione delle performance energetiche di un edificio e di un motore di ottimizzazione, il quale consiste in uno o più algoritmi o strategie di ottimizzazione.

In un generico processo, vengono fornite delle impostazioni di ottimizzazione (variabili e relativa natura, vincoli, algoritmi da impiegare) e delle funzioni obiettivo all'interno del programma di ottimizzazione. Questi è in grado di lanciare il programma di simulazione per la creazione di uno scenario, valutando poi i risultati di output. Se questi dovessero soddisfare i criteri di arresto dell'algoritmo, la soluzione ottima sarebbe stata trovata e il processo si arresterebbe, altrimenti il motore di ottimizzazione elaborerebbe una nuova serie di dati di input da suggerire al sistema fintanto che non riscontri l'ottima soluzione ricercata (Fig. 1).[12]

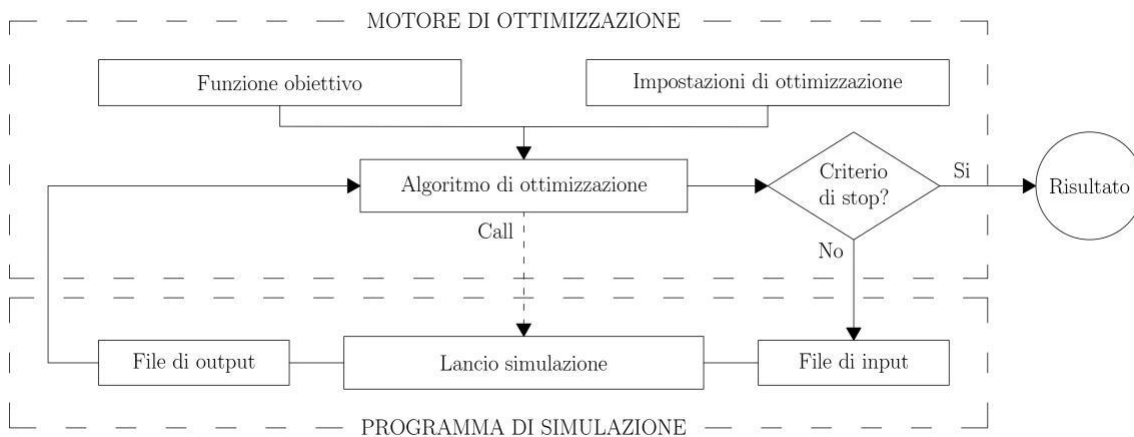


Figura 1: Schematizzazione del funzionamento accoppiato di un programma di simulazione e un motore di ottimizzazione

2.3 Algoritmi di ottimizzazione

A seconda del numero, della natura e del tipo delle variabili di progetto, del numero e della natura delle funzioni obiettivo, della presenza della natura dei vincoli si individuano differenti tipi di problema di ottimizzazione. Nel tentativo di far fronte al complesso di questa varietà sono stati sviluppati diverse strategie di ottimizzazione.[1]

Algoritmi di ricerca diretta

Mentre diversi metodi più tradizionali di ottimizzazione utilizzano informazioni riguardanti il gradiente o derivate superiori per cercare un punto di ottimo, l'algoritmo di ricerca diretta mira ad un insieme di punti intorno a quello corrente, cercando uno dove il valore della funzione obiettivo risulti minore.

Il suo punto di forza consta nell'impiego di un metodo privo di derivate e quindi nella possibilità di essere confrontato con problemi caratterizzati da funzioni obiettivo non differenziabili o addirittura discontinue. Per contro, si rischia di non giungere all'esatto punto di minimo, rimanendo attratti da soluzioni locali.

Vengono inclusi in questa categoria i metodi di tipo General Pattern Search (GPS), l'algoritmo di forza bruta e l'algoritmo di ricerca esaustiva di Hooke-Jeeves (HJ).[1]

Algoritmi basati sul gradiente

Gli algoritmi basati sul metodo del gradiente risolvono i problemi di minimizzazione di una generica funzione sfruttando una direzione di ricerca definita dal gradiente della stessa funzione calcolato nel punto corrente della valutazione.

La positività derivante dall'applicazione di questo metodo risiede in una rapida convergenza, dal momento che un punto di stazionarietà è sempre garantito. Si incorre però nel problema dovuto al fatto che il metodo è sensibile alle discontinuità della funzione obiettivo e in generale alle funzioni multi-modali. Esempi di algoritmi basati sul gradiente sono l'algoritmo legato di BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), l'algoritmo di Levenberg-Marquardt, l'algoritmo del gradiente di Armijo.[1]

Algoritmi basati su popolazione stocastica

Nei classici metodi di ottimizzazione emerge una singola soluzione per ogni iterazione, il risultato finale dunque è unico. Al contrario, questo metodo adotta una popolazione di soluzioni ad ogni iterazione, dando luogo a un risultato che offra una popolazione di soluzioni.

In questo modo, nel momento in cui il problema presenti un'unica soluzione, ci si aspetta che i membri della popolazione convergano verso quell'ottimo. Nel caso in cui invece le ottime configurazioni siano molteplici, la popolazione finale sarà in grado di catturare la pluralità delle ottime soluzioni presenti nello spazio di ricerca. Questo tipo di algoritmi di natura meta-euristica risulta quindi particolarmente adatto alla risoluzione di problemi che debbano gestire contemporaneamente più obiettivi.

I punti di forza di questi metodi riguardano la loro necessità di poche o addirittura alcune assunzioni sulla funzione obiettivo, la capacità di spaziare in ambienti di ricerca molto ampi e la mancata attrazione verso ottimi locali. Per contro, la natura meta-euristica di questa metodologia, non garantisce il riscontro di una soluzione di minimo globale. Fanno parte di queste strategie gli algoritmi di tipo evolutivo e quelli che impiegano un ingegno di tipo a sciame.

Fra gli algoritmi evolutivi, che mimano il concetto darwiniano dell'evoluzione, spiccano gli algoritmi genetici (Genetic Algorithms, GAs). Secondo i GAs, gli elementi della popolazione (vettori di parametri di progetto) si ricombinano su successive generazioni con meccanismi di cross-over e mutazioni. Le soluzioni migliori sono mantenute nelle generazioni grazie ad un parametro di idoneità che consente la sopravvivenza degli elementi più adatti. Tra i diversi GAs si ricordano il NSGA e il NSGA-II.

Fra gli algoritmi che impiegano un ingegno a sciame, che fanno riferimento al comportamento collettivo di un sistema naturale di tipo decentralizzato ed organizzato autonomamente come avviene appunto all'interno di sciami o stormi di uccelli, si ricorda l'ottimizzazione a sciami di particelle (Particle Swarm Optimization, PSO).[1]

Algoritmi ibridi

Gli algoritmi di tipo ibrido sono ottenuti come combinazione di due o più algoritmi appartenenti alle categorie finora descritte. Essi sono in grado di sommare i punti di forza dei soprannominati metodi di ricerca, limitandone invece le debolezze. Esempi di funzionali combinazioni note sono PSO-HJ e GA-GPS. [1]

3 Sistemi di controllo

I sistemi di controllo degli edifici (Building Control System - BCS) o sistemi di gestione degli edifici (Building Management Systems - BMS), sono generalmente costituiti da un insieme di hardware e software, locali o centralizzati, che sfruttano le informazioni ricevute da sensori di zona per monitorare e controllare le condizioni climatiche interne.

Lo scopo principale dei BCS è quello di conseguire un'elevata valutazione in termini di indici di comfort adottando delle strategie che parallelamente garantiscano il risparmio energetico.

A prescindere dall'adozione di una strategia di controllo, è già una prassi più diffusa quella dell'indagine mediante ottimizzazione automatica relativa al progetto di riqualificazione; in modo più ampio in termini di ricerca, più timidamente nella realtà realizzativa. L'intera varietà di BCS può essere ricondotta alla semplice classificazione in due categorie: sistemi di controllo di tipo convenzionale e sistemi di controllo intelligenti.

3.1 Sistemi di Controllo Convenzionali

I controllori di tipo convenzionale fanno uso di elementi relativamente semplici (sensori di zona, misuratori di energia, . . .) che possano registrare le informazioni sull'ambiente interno da comunicare ai sistemi di controllo locale perché reagiscano ed elaborino delle misure di gestione.

Sistemi di controllo di tipo standard come i termostati, dispositivi automatici di accensione e spegnimento, controllori PI (Proportional-Integral) e controllori PID (Proportional-Integral-Derivative), sono largamente impiegati all'interno delle presenti costruzioni.

I dispositivi di accensione e spegnimento, ad esempio, vengono utilizzati per la regolazione della temperatura interna. Questi presentano però frequentemente lo svantaggio di un elevato consumo energetico dovuto alla difficile impostazione di set-point precisi, o meglio, in grado di fronteggiare tutta la gamma di condizioni esterne cui l'ambiente sarà sottoposto.[4]

Controllori PI e PID sono dei sistemi di controllo che constano di un meccanismo di feedback costituito da un processo ad anello chiuso. Con la loro azione retroattiva, ricevuto in input il valore attuale di temperatura, lo confrontano con un parametro di riferimento e reagiscono ad un eventuale errore, suggerendo la correzione all'impianto.[5]

Il controllo gestito da questi elementi risulta però grezzo e caratterizzato da un significativo ritardo se utilizzati singolarmente. L'impiego di più elementi a cascata può tuttavia migliorare le prestazioni del sistema.[6]

3.2 Sistemi di Controllo Intelligenti

I sistemi di controllo avanzato sono in grado di confrontarsi con le incertezze relative alle strutture della cui gestione sono incaricati attraverso dei meccanismi di adattabilità che, sfruttando la loro natura dinamica, consentono loro di apportare precise e costanti migliorie al sistema. I sistemi intelligenti includono infatti metodi basati sull'apprendimento, tecniche di controllo predittivo basate sui modelli (Model Predictive Control, MPC) e sistemi di controllo basati su agenti intelligenti. Qui la raccolta dei dati dovuta al monitoraggio costante viene accompagnata dalla capacità del controllore di elaborare una conseguenza delle proprie azioni in tempo reale, svincolando il controllo dalla rigidità della precedente impostazione manuale.

Metodi basati sull'apprendimento

I metodi basati sull'apprendimento fanno uso di intelligenze artificiali: sistemi a logica fuzzy e reti neurali artificiali. Questo tipo di controllori sono sfruttati per la loro rappresentatività della struttura reale a dispetto della ridotta complessità rispetto ai modelli completi.

Sistemi a logica fuzzy hanno permesso di impiegare un tipo di controllo multicriterio. In alcuni casi sono stati accoppiati con controllori PI e PID, ampliando le possibilità di controllo di entrambi i metodi e colmandone gli aspetti lacunosi.[7]

Reti neurali artificiali sono impiegate invece a monte del controllo per la predizione di parametri ambientali (temperatura interna, umidità relativa, illuminazione, . . .) e in alcuni casi del comportamento degli occupanti.[8][9]

Controllo predittivo basato su modelli

Il controllo predittivo basato su modelli sfrutta la simulazione, attraverso adeguati modelli dinamici, delle prestazioni energetiche di un edificio dovute alle condizioni esterne e all'occupazione (disturbi) previste per questo all'interno di un certo orizzonte temporale. Lo scenario previsto viene utilizzato come informazione in ingresso al sistema di controllo.

Il MPC fornisce diversi aspetti vantaggiosi per un controllo energetico efficiente, visto il suo carattere dinamico e la sua natura predittiva in totale contrasto con i sistemi di controllo basati su regole fisse. Il metodo è poi in grado di gestire vincoli su segnali in ingresso e in uscita in sistemi multi-input e multi-output (aspetto particolarmente significativo per il controllo termico, vista la possibilità di imporre dei limiti di temperatura). In aggiunta è in grado di integrare l'incertezza direttamente nel processo di ottimizzazione e di considerare la massa termica dell'edificio, migliorando la previsione del microclima. Le qualità indiscutibili della presente metodologia devono però arginare i problemi derivanti dagli importanti requisiti computazionali richiesti. [10] [11]

Sistemi di controllo basati su agenti intelligenti

Sistemi di controllo di questa tipologia fanno uso di agenti, generalmente entità virtuali o fisiche in grado di cooperare razionalmente in un ambiente e prendere iniziativa su di esso in quanto dotati di qualità sia percettive che attuative. Nel sistema, gli agenti sono organizzati su più livelli di competenza in accordo con la propria funzione. Nonostante i singoli agenti possiedano un comportamento distinto, questi condividono alcune proprietà e cooperano per il conseguimento di determinate funzioni.

Il controllo con tecnologia a sistema multi-agente consente di apprendere gli andamenti dell'occupazione dell'edificio e la coordinazione delle risorse energetiche, ma possiede anche l'abilità di rispondere in tempo reale in termini di condizioni ambientali interne.[3]

Metodologia

La strategia proposta può essere applicata sia per il retrofit che per il controllo predittivo. Sono previsti quattro livelli: campagna di misura, modellazione, retrofit e/o controllo, attuazione (Fig. 2).

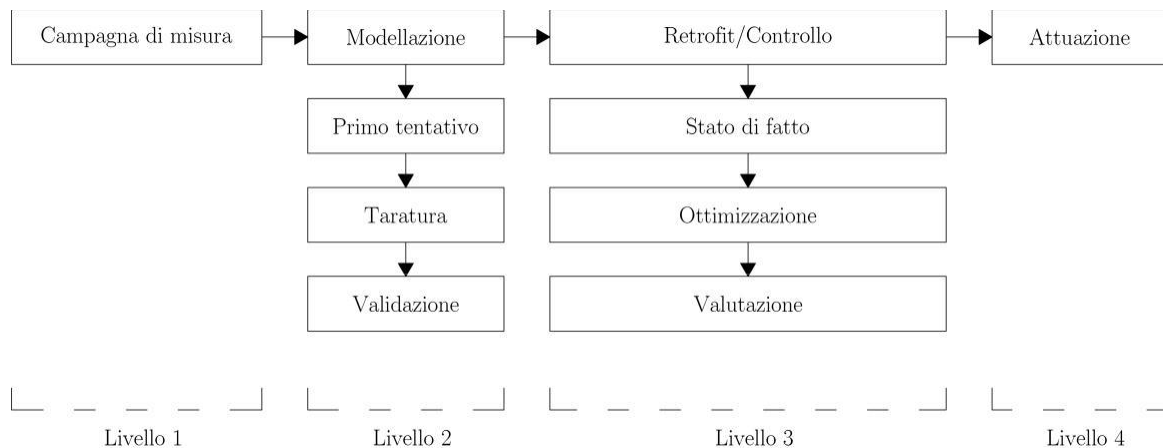


Figura 2: Schema logico della metodologia

4.1 Campagna di misura

Mediante i sensori di zona e i misuratori di energia distribuiti in modo da coprire l'intera struttura, sono raccolti tutti i dati rilevanti per la descrizione del comportamento termico ed energetico dell'edificio. Allo stesso modo saranno rilevati tutti i dati metrici di cui non si disponga da un'eventuale cartografia e la composizione stratigrafica dello stabile. In aggiunta occorre reperire, allo scopo di supportare la simulazione, i dati relativi alle condizioni meteo contestuali al periodo della campagna di misura. Saranno infine svolte delle indagini sulle abitudini relative all'occupazione.

4.2 Modellazione

L'integrale processo di modellazione è composto da una serie di step che prevedono la costruzione di un modello di primo tentativo, la taratura dello stesso e la successiva validazione di detto processo di taratura.

4.2.1 Prima modellazione

A partire dalle informazioni sull'edificio di cui si è in possesso viene sviluppato in un ambiente software dinamico (IDA-ICE 4.7.1 nel caso in esame) un modello di primo tentativo. Dalla cartografia è possibile definire il contesto, la geometria e la divisione in zone termiche dell'edificio. In accordo con le proprietà dei materiali sono specificate la stratigrafia delle murature e dei solai, nonché le aperture. Infine, i dati relativi agli impianti e agli utenti permettono l'impostazione del sistema HVAC (in termini di set-point ma anche di schedule di funzionamento) e dei guadagni termici.

Il modello così definito viene successivamente tarato in modo da ottenere una rappresentazione ragionevole e robusta dell'edificio reale.

4.2.2 Taratura automatica

La taratura viene condotta impiegando un algoritmo di ottimizzazione automatica che miri a ridurre la differenza tra la temperatura rilevata all'interno degli ambienti e quella simulata dal modello nelle zone termiche corrispondenti. Si utilizza un processo multi-fase con periodi di monitoraggio a breve termine in cui si tara prima il solo involucro e poi il sistema di impianti.

La strategia di taratura può essere suddivisa in tre livelli: pre-processo, processo e post-processo (Fig. 3).

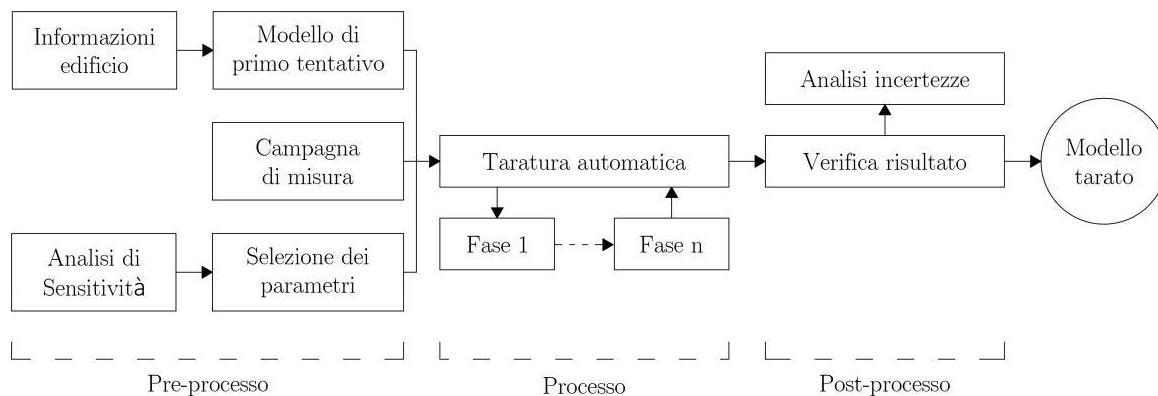


Figura 3: Strategia di taratura

Pre-processo

Per ridurre il costo computazionale, prima di ogni fase di taratura viene svolta un'analisi di sensitività (Sensitivity Analysis, SA), così da selezionare i parametri più influenti del problema di ottimizzazione. Si applica il Metodo degli Effetti Elementari (Elementary Effects Method, EEM) basato sul Metodo di Morris.[14]

Accoppiando una serie di script e funzioni elaborate in MatLab e IDA-ICE, il EEM viene eseguito in modo automatizzato considerando la temperatura simulata con intervallo orario (T) per l'arco di tempo relativo ad ogni fase dell'intera taratura. In accordo con il metodo, vengono eseguite r simulazioni per ognuno dei k parametri, dove solo uno dei parametri di input è libero di variare in modo casuale (all'interno di un definito intervallo di incertezza) e tutti gli altri rimangono fissi al precedente valore. Sono dunque eseguite $N = r(k + 1)$ simulazioni e l'errore tra la temperatura simulata corrente e la temperatura simulata con il modello di primo tentativo viene espresso in termini di Errore Medio Assoluto (Mean Absolute Error, MAE). Il singolo Effetto Elementare (Elementary Effect, EE) viene definito come una funzione del MAE e della variazione del parametro di input (x) come segue:

$$EE(x) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x, \dots, x_k) - f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)}{\Delta x} \quad (2)$$

Vengono infine calcolati il valore assoluto della media (μ^*), la deviazione standard (σ) della distribuzione degli EE e il rapporto $\frac{\mu^*}{\sigma}$. La rilevanza di un parametro è legata al valore di (μ^*), mentre il rapporto $\frac{\mu^*}{\sigma}$ esprime la natura della dipendenza dell'effetto di ogni parametro (lineare, monotono, non lineare,..).[15]

Processo

Nella singola fase di processo, il modello viene tarato utilizzando la temperatura interna rilevata nel corrispondente periodo della campagna di misura, adottando un metodo di ottimizzazione automatica (Fig. 4). La funzione obiettivo consiste nella Cumulata dell'Errore Quadratico (Cumulative Quadratic Error, CQE) dei dati simulati (s) e misurati (m):

$$CQE = \sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2 \quad (3)$$

La funzione viene costruita in IDA-ICE (Fig. 4) inserendo: un Source-File, contenente i dati di temperatura interna misurati in un determinato ambiente dell'edificio per il corrispondente periodo della campagna di misura; un Zone-Sensor, riferito alla zona termica cui corrisponde l'ambiente interno di misura, in modo da estrarre i dati di temperatura simulata da confrontare con quelli misurati; un insieme di operatori matematici, per costruire la funzione.

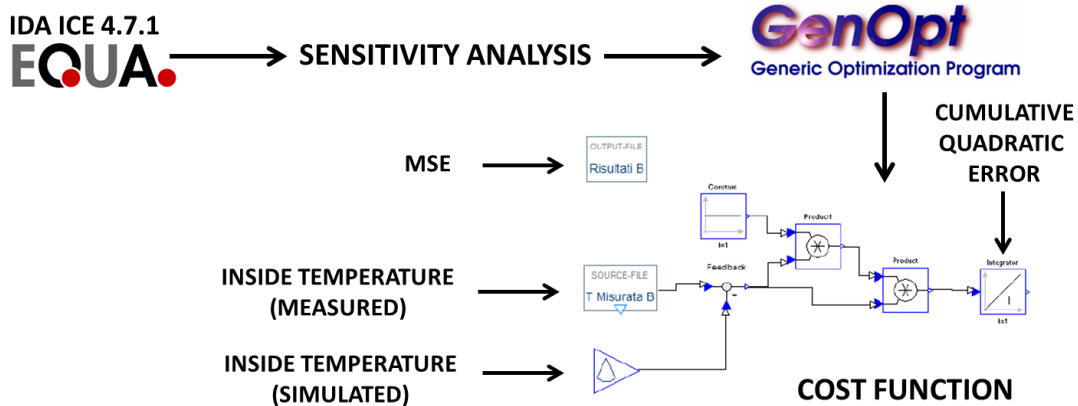


Figura 4: Schema del processo di taratura automatica.

Utilizzando GenOpt attraverso Parametric-runs come motore di ottimizzazione, la funzione obiettivo viene minimizzata mediante un algoritmo ibrido (una combinazione di PSO, per una prima ricerca globale, e un algoritmo di HJ, per una seconda ricerca locale). La taratura viene dunque effettuata come un problema di ottimizzazione ad obiettivo singolo, considerando solo i parametri di input ottenuti dall'analisi di sensitività.

Post-processo

Una volta concluso il processo, la qualità del risultato può essere valutata in termini di errore quadratico medio (Root Mean Square Error - RMSE), coefficiente di variazione dell'errore quadratico medio (Coefficient of Variation of RMSE - CV(RMSE)) ed errore quadratico medio normalizzato (Normalized Root Mean Square Error - NRMSE), rispettivamente definiti come:

$$RMSE = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(s_i - m_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{m_{med}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$N(RMSE) = \frac{RMSE}{(m_{max} - m_{min})} \quad (6)$$

4.2.3 Validazione

In aggiunta alla possibilità di valutare la qualità del modello risultante in termini di parametri statistici, può essere sfruttato, a titolo di strumento di validazione, un confronto tra i consumi del modello ottenuto e quelli realmente registrati per l'edificio.

I dati relativi al consumo del sistema di riscaldamento dell'edificio e del modello-risultato sono confrontati (mensilmente e per l'intera stagione) in modo da stabilire l'entità dell'errore commesso.

Qualora tanto i parametri statistici relativi alla differenza di temperatura misurata-simulata quanto l'errore relativo al dispendio energetico confermino la buona qualità del risultato così ottenuto, il modello potrà definirsi tarato.

4.3 Retrofit

La modellazione e la successiva taratura consentono di ottenere uno strumento robusto di analisi e progettazione. Il modello risultante dalla taratura è infatti inizialmente impiegato per uno studio delle condizioni del fabbricato e successivamente coinvolto nel progetto di retrofit svolto con ottimizzazione automatica.

4.3.1 Stato di fatto

Attraverso la simulazione dinamica, viene presa coscienza delle attuali condizioni dell'edificio e delle relative carenze. In particolare, possono essere valutate la dispersione dell'involucro e le capacità operative dell'impianto: si stabiliscono quali siano gli elementi che ne penalizzano le prestazioni, sui quali dunque operare nell'ottimizzazione di un progetto di riqualificazione.

Per generalizzare i risultati dell'analisi, le condizioni climatiche esterne sono determinate da un file climatico del tipo Test Reference Year (TRY), vale a dire rappresentativo delle condizioni tipo sperimentate nell'arco di un anno.

[Digitare qui]

4.3.2 Retrofit automatico

La proposta di un progetto di retrofit viene avanzata utilizzando l'ottimizzazione automatica basata su simulazioni (Fig. 5).

Il problema di ottimizzazione viene definito attraverso l'individuazione delle variabili decisionali, delle funzioni obiettivo, dell'algorithm di ottimizzazione e delle relative impostazioni.

Variabili

Le variabili di input del problema (x) vengono desunte una volta individuati i punti deboli nella valutazione dello stato di fatto dell'edificio. In generale, queste sono sia di tipo continuo (come le impostazioni dell'impianto) che discreto (come gli elementi sostitutivi dell'involucro legati alla disponibilita di mercato per costi e prestazioni)

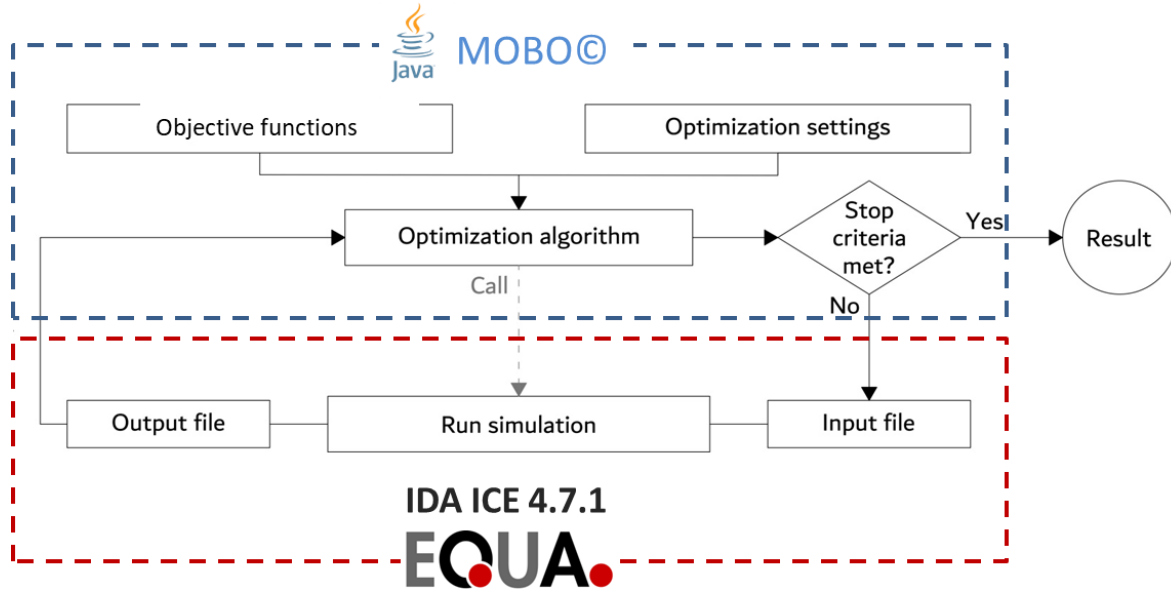


Figura 5. Schema del processo di ottimizzazione automatica

Funzioni obiettivo

Il retrofit viene condotto impiegando un algoritmo di ottimizzazione automatica che miri a ridurre contemporaneamente tre obiettivi: il consumo di energia totale $E_{tot}(x)$, il numero totale di ore di discomfort $PDH(x)$, il costo dell'intervento $P_{tot}(x)$. [16]

In particolare, l'energia totale viene ottenuta da IDA-ICE come somma dell'energia di ri-scaldamento $E_{heating}(x)$ e di raffrescamento $E_{cooling}(x)$ durante un intero anno di simulazione; il $PDH(x)$ (di nuovo ottenuto direttamente da IDA-ICE) come la somma del $PPD(x)$ di ogni ambiente occupato, moltiplicato per il numero degli utenti n_{occ} e per le ore di occupazione h_{occ} ; l'investimento è definito come la somma dei prezzi per unità di misura p_{xi} dei k elementi scelti per l'intervento, moltiplicati per la propria dimensione d_{xi} :

$$E_{tot}(x) = E_{heating}(x) + E_{cooling}(x) \quad (7)$$

$$PDH(x) = PPD \cdot n_{occ} h_{occ} \quad (8)$$

$$P_{tot}(x) = \sum_{i=1}^k p_{xi} \cdot d_{xi} \quad (9)$$

Algoritmo

Utilizzando MOBO come motore di ottimizzazione, le funzioni obiettivo, vengono minimizzate mediante un algoritmo genetico (NSGA-II). Il particolare algoritmo viene scelto per la capacità di gestire molteplici obiettivi e la possibilità di operare tanto con variabili continue quanto con variabili discrete.

Non essendo previsto uno strumento di dialogo predefinito, la comunicazione tra IDA-ICE e il tool di ottimizzazione avviene attraverso la configurazione di una serie di file di testo esterni, compatibili per lo scambio di informazioni con entrambi i programmi.

In particolare, MOBO è in grado di comunicare con IDA-ICE utilizzando uno script del programma di simulazione dinamica (un file descrittivo delle proprietà del modello elaborato in IDA-ICE, ma dotato di una maggiore semplicità e dunque rapidità esecutiva) ed i relativi file di risultato, rispettivamente come file di input e di output.

Nelle diverse iterazioni del processo, il motore di ottimizzazione lancia le simulazioni attraverso IDA-ICE in batch mode, valutando dunque gli scenari risultanti, fintanto che non si raggiunga un criterio di arresto (ad esempio il massimo numero di generazioni).

Il processo restituisce un fronte pareto di soluzioni ottime tra le quali l'operatore dovrà selezionare quella definitiva.

4.3.3 Valutazione

Lo scenario ottenuto dalla selezione di un risultato consente di prendere atto: dell'effettivo risparmio energetico conseguente la riqualificazione proposta, delle variazioni in termini di comfort e del tempo di rientro dall'investimento.

4.4 Controllo

La medesima strategia adottata per il retrofit può essere applicata alla gestione ottimizzata degli impianti, individuando un profilo di controllo ottimo in funzione dei parametri ambientali.

4.4.1 Stato di fatto

Una serie di simulazioni approfondisce la conoscenza dello stato di fatto, mettendo in luce carenze che possano essere risolte con variabili di controllo.

4.4.2 Controllo automatico

La gestione dell'impianto sarà oggetto di un problema di ottimizzazione automatica che sfrutti la logica del MPC.

Oltre alle variabili, agli obiettivi e alle informazioni relative all'algoritmo di ottimizzazione, lo specifico problema necessita di un metodo di previsione per i dati relativi al meteo e all'occupazione e della definizione di una serie di tempi di ottimizzazione.

Dati climatici e occupazione

Sebbene la metodologia di questo controllo si rifaccia alle strategie analizzate in letteratura per il MPC, non sono stati approfonditi metodi di previsione.

L'occupazione viene interpretata come un dato certo sulla base di quelle che sono le attuali abitudini lavorative degli utenti, ipotizzate e confermate nel processo di taratura.

I dati meteo sono ottenuti da un file climatico di tipo TRY, utilizzando dunque (per lo scopo dimostrativo di questa relazione) informazioni certe piuttosto che previste.

Tempi di ottimizzazione

Differentemente dal precedente problema, il cui risultato consiste in un unico valore ottimo, l'obiettivo di un'ottimizzazione del controllo è quello di fornire un profilo di valori delle variabili di input nell'arco del tempo in cui si svolge la valutazione. Occorre dunque distinguere tra orizzonte e blocchi di ottimizzazione (Fig. 5).

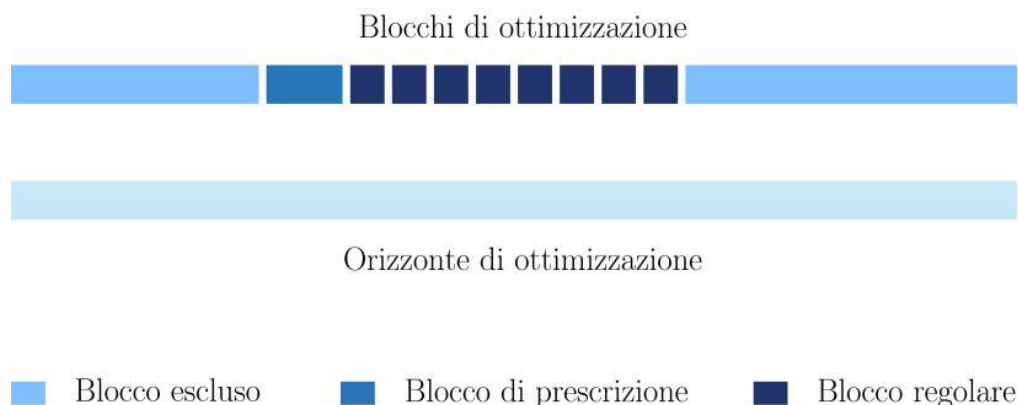


Figura 5: Orizzonte e blocchi di ottimizzazione

[Digitare qui]

L'orizzonte di ottimizzazione consiste nella durata dell'intero processo di minimizzazione. Dipende dalla capacità predittiva dei dati meteo e di occupazione: tanto più la previsione è accurata a lungo raggio, tanto più ampio potrà essere l'orizzonte.

I blocchi di ottimizzazione sono gli intervalli di tempo minimi per la determinazione di un profilo di set-point ottimi.[17]

In funzione dell'inerzia termica dell'edificio si stabilisce quale sia il tempo minimo per cui il cambiamento di un parametro di impianto sortisca un effetto concreto sul microclima del fabbricato. Successivamente si suddivide l'intero orizzonte temporale in un determinato numero di blocchi per i quali verrà elaborato il profilo di soluzioni. I blocchi non sono necessariamente di egual misura né possiedono lo stesso ruolo strategico. Si possono infatti individuare blocchi esclusi dall'ottimizzazione (in cui ad esempio l'impianto è inattivo e che non rientrano pertanto nella determinazione del profilo di set-point), blocchi di prescrizione (nei quali, oltre a quelli generali, si regola un parametro particolare, come l'accensione dell'impianto) e blocchi regolari (ai quali sono legati i parametri ordinari di ottimizzazione).

Variabili

Le variabili (x) del problema sono dedotte dall'analisi dello stato di fatto e comprendono parametri dell'impianto gestibili con appositi controllori.

Funzioni obiettivo

L'ottimizzazione automatica viene qui sfruttata per minimizzare due obiettivi: il consumo di energia totale $E_{tot}^c(x)$ e le ore di discomfort PDH(x).

Se il PDH(x) è definito come per il retrofit, dal momento che il controllo viene svolto solo per la fase invernale, $E_{tot}^c(x)$ (ottenuto sempre da IDA-ICE) si rifà al solo contributo dell'heating:

$$E_{tot}^c(x) = E_{heating}(x) \quad (10)$$

Algoritmo

Si utilizza ancora MOBO come motore di ottimizzazione, interfacciandosi con IDA-ICE attraverso file di testo e sfruttando il NSGA-II per ottenere un fronte pareto di soluzioni non dominate.

4.4.3 Valutazione

Terminato il processo, a scopo di indagine, si valutano gli effettivi benefici ottenuti dal profilo di soluzioni determinato dall'ottimizzazione. In particolare, si considerano sia l'effetto di un controllo esercitato sull'edificio originale che quello relativo all'edificio già sottoposto all'intervento di riqualificazione.

4.5 Attuazione

Concluso il processo di ottimizzazione, le nuove configurazioni del modello dovranno essere attuate in un progetto di ristrutturazione o nella comunicazione al BMS delle impostazioni di controllo. Per il secondo caso, la comunicazione potrebbe avvenire utilizzando una trasmissione dati online tra il modello di simulazione e il sistema di gestione, di modo da ottenere un controllo di tipo dinamico del sistema.

5 Casi studio

La metodologia illustrata è stata applicata nella sua interezza al caso studio di una palazzina adibita ad uso uffici in Roma mentre l'efficacia delle singole parti del processo è stata verificata sul caso studio di una palazzina residenziale (Trento) (in collaborazione con UO5 e UO6) e su un edificio storico ad uso di museo (Priverno).

5.1 Edificio uso ufficio

L'edificio in questione coincide con la sede dell'ente CIRM situata nel quartiere EUR di Roma, realizzato nel 1962 (Fig. 6).



Fig. 6. La palazzina del CIRM in zona EUR, Roma.

Destinato prevalentemente ad uso uffici ma dotato anche di una piccola componente ambulatoriale, il complesso è costituito da una palazzina strutturata su tre livelli: un piano seminterrato, un piano rialzato ed un piano primo. I tre livelli si articolano attraverso superfici ottenute mediante la giustapposizione di due rettangoli sfalsati lungo il lato minore, che creano giochi di vuoto e pieno alternando spazi aperti e spazi chiusi nel susseguirsi dei piani. La copertura è dotata di una terrazza calpestabile, dove viene lasciata proseguire la maglia in cemento armato.

Il rivestimento, diversificato nei piani è, a seconda dell'esposizione, realizzato mediante tamponatura in laterizi a faccia a vista al piano rialzato e al piano primo, blocchi di tufo o lastre di marmo bianco rispettivamente nelle regioni sud-est e nord-ovest del seminterrato.

La superficie utile dell'edificio consta di circa 650 m², distribuiti sui tre piani. La cubatura lorda riscaldata comprende invece all'incirca 2400 m³, al fronte di un totale di superficie disperdente pari a 1160 m².

L'impianto di riscaldamento invernale, inserito in un locale tecnico esterno all'edificio, è costituito da una caldaia a metano che serve un insieme di radiatori ad acqua. Un regolatore climatico e programmato per gestire (tramite una valvola di miscelazione a tre vie) l'impianto di riscaldamento: in inverno, è impostato un orario di funzionamento (dalle 8.00 alle 17.00) valido per tutti i giorni della settimana che permetta di raggiungere la temperatura di 25 °C all'interno degli ambienti (il set-point è volutamente maggiorato perché, date le condizioni obsolete dell'impianto e dell'involucro, il sistema non riuscirebbe a garantire un livello di comfort sufficiente).

Il raffrescamento è invece differenziato per piani: garantito solo in alcuni uffici dei piani rialzato e primo attraverso condizionatori indipendenti a parete e centralizzato per il piano seminterrato, con un impianto a soffitto.

L'acqua calda sanitaria viene garantita mediante boiler elettrici.

Il piano seminterrato è stato ristrutturato alla fine degli anni 90. L'intervento ha comportato, oltre ad interventi sulla disposizione degli ambienti, l'inserimento di nuovi radiatori e finestre e il sistema centralizzato di condizionamento. Il piano rialzato e primo rimangono invece allo stato originale.

5.2 Edificio residenziale

L'edificio residenziale utilizzato come secondo caso studio è riportato in figura 7. È situato a Trento nel Nord d'Italia (lat. 46° 6' 14.32", long. 11° 6' 41.82") ed è una palazzina di cinque piani, di recente costruzione.



Figura 7. Palazzina di recente costruzione nella zona di Trento.

L'edificio presenta una struttura a telaio, vano scale in cemento rinforzato e finestre ad alte prestazioni in triplo vetro, basso emissivo. L'impianto di riscaldamento è costituito da una caldaia centralizzata a condensazione che alimenta un sistema di riscaldamento radiante a pavimento, controllato da un termostato interno. Aria di rinnovo è fornita da un sistema di ventilazione meccanica con recupero di calore con una portata di aria costante di 0.5 ACH durante il periodo di riscaldamento. Nel periodo di "free floating" la ventilazione fornisce la medesima portata ma è possibile a livello di appartamento, bypassare il recuperatore. Durante l'estate non è previsto sistema di condizionamento. Gli occupanti sono liberi di impostare il termostato interno ed aprire le finestre.

La palazzina è equipaggiata con un sistema di monitoraggio che misura temperatura dell'aria ed energia termica fornita dal pavimento radiante in ogni appartamento, mentre solo in alcuni appartamenti sono stati installati più sensori che permettono di misurare le temperature superficiali ed i flussi termici delle murature esterne, la temperatura dell'aria in più stanze, la portata di ventilazione e l'apertura e chiusura delle finestre. Una stazione meteorologica è installata all'esterno dell'edificio [18].

L'analisi effettuata su questo caso studio ha avuto lo scopo di valutare più software di simulazione dinamica e diversi approcci di taratura del modello in sinergia con le Unità 5 e 6. Per questa attività la UO1 ha modellizzato un piano intermedio della palazzina considerato come un unico ambiente, i dati sono stati forniti dalla UO6 (Università di Trento).

5.3 Edificio Storico

Il Palazzo Valeriani-Guarini-Antonelli situato a Priverno (Latina), nell'Italia Centrale, a circa 70 km SE dalla città di Roma (Lat. 41.5° and Long. 13.2°) è stato utilizzato come caso studio di edificio storico per ottimizzare il controllo in temperatura ed umidità relativa al fine di ridurre il degrado, minimizzare i consumi e massimizzare il comfort degli occupanti. L'analisi effettuata ha riguardato la tesi di Dottorato in Scienze dei Beni Culturali di Sapienza Università di Roma della dott.ssa Francesca Frasca di cui la responsabile è stata co-tutor.

L'edificio ospita il Museo archeologico di Priverno, si sviluppa su tre piani ed è parte di un complesso architettonico insieme con la cattedrale del dodicesimo ed il municipio del tredicesimo secolo, che racchiudono la piazza del paese. La prima costruzione risale al tredicesimo secolo (Figura 8) per volere della famiglia Valeriani.



Figura 8. Esterni ed interni della Palazzo Valeriani-Guarini-Antonelli, Priverno (LT).

Successivamente la famiglia Guarini (quindicesimo secolo) ampliò il palazzo aggiungendo il secondo piano e le ali laterali. Nel 1924 il palazzo fu acquistato dalla famiglia Antonelli che restaurò la facciata e le decorazioni degli interni. Il restauro durò due anni. All'interno i soffitti ligneo furono decorati in stile tardo liberty da Giulio Sordani e Pietro Campeggi. Nel 2012 l'edificio è stato acquistato e restaurato per ospitare il Museo Archeologico di Priverno. L'edificio è orientato nella direzione SO-NE rispetto all'entrata principale. Il piano terra ospita la biglietteria, un bookshop ed i servizi. Nel primo e secondo piano sono collocate le sale del museo che ospita sculture, elementi architettonici, ceramiche, ecc. La maggior parte delle sale presenta finestre con infissi in legno con scuri in legno e tende oscuranti nere. Il sistema di condizionamento è costituito da fan coils che vengono accesi durante le ore di apertura sia nella stagione fredda che in quella calda. Tutti i fancoils sono collocati sotto le finestre ed alcuni sono ricoperti da grate metalliche nere. Il setpoint di temperatura è fissato a 18 °C e 26 °C rispettivamente per inverno ed estate. Nonostante l'impianto di condizionamento i visitatori lamentano temperature rigide in inverno e troppo alte in estate. I soffitti lignei hanno subito danni nel corso del tempo e sono stati restaurati nel 2012. Lo studio si è focalizzato sul monitoraggio del microclima interno e della variazione delle fessurazioni presenti sul soffitto ligneo e sulla conseguente individuazione di strategie di condizionamento che minimizzassero tali deformazioni garantendo minimi consumi energetici e buone condizioni di comfort interno.

6 Risultati

6.1 Edificio uso ufficio

Il caso studio dell'edificio adibito ad ufficio è stato utilizzato per testare la strategia di ottimizzazione e controllo automatico nel suo complesso, nei paragrafi successivi sono riportati i principali risultati ottenuti.

6.1.1 Campagna di misura

La campagna di misura utilizzata per lo studio è stata effettuata in un periodo antecedente al progetto ed è stata condotta in tre periodi distinti, per avere un panorama completo del comportamento termico ed energetico dell'edificio per l'intero anno solare e a permettere l'approccio multi-fase della taratura. In aggiunta le misurazioni sono state effettuate in ambienti di volta in volta differenti in modo da avere un resoconto complessivo nello spazio globale della struttura.

La strumentazione utilizzata per i rilievi, messa a disposizione dall'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", consisteva di una stazione di misura portatile esterna e di un apparecchio per la misura di temperatura ed umidità interne.

Campagna di misura A

Svolta dal 21 giugno al 26 giugno 2015 per un totale di 5 giorni completi, utilizzando la stazione esterna sul tetto dell'edificio e la strumentazione interna in una stanza esposta a Nord-Ovest al primo piano.

Campagna di misura B

Svolta dal 28 luglio all'1 agosto 2015 per un totale di 4 giorni completi, utilizzando la stazione esterna su un balcone al primo piano e la strumentazione interna in una stanza esposta a Sud-Est al piano seminterrato. I dati di radiazione, compromessi dall'eccessivo ombreggiamento, sono stati sostituiti con quelli della stazione meteo del quartiere EUR.

Campagna di misura C

Svolta dal 13 dicembre al 18 dicembre 2015 per un totale di 5 giorni, utilizzando solo la strumentazione interna, data l'impossibilità di inserimento della stazione esterna per motivi logistici. In sostituzione, sono stati presi i dati del quartiere EUR. La strumentazione interna è stata disposta in un ambiente esposto ad Ovest del piano primo.

Sono disponibili, per la validazione, i dati relativi ai consumi mensili di gas naturale impiegato per il riscaldamento. Dal momento che l'energia fornita è espressa in IDA-ICE in kWh e le bollette riportano la quantità di combustibile consumato in Standard Metri Cubi (SMC), per facilitare il confronto viene effettuata una conversione da SMC a kWh, considerando (come riportato nelle bollette) un Potere Calorifico Superiore (PCS) di 39.64MJ/m^3 (Tab. 1).

Tabella 1: Consumo con conversione da SMC a kWh

Periodo	Metano [SMC]	Metano [kWh]
01/11/2014 - 27/11/2014	373	4107
28/11/2014 - 23/12/2014	386	4250
24/12/2014 - 22/01/2015	441	4856
23/01/2015 - 17/02/2015	394	4338
18/02/2015 - 12/03/2015	332	3656
13/03/2015 - 14/04/2015	365	4019
01/11/2014 - 14/04/2015	2291	25226

6.1.2 Taratura

A partire da un modello di primo tentativo, si è attuato un processo di taratura composto di tre fasi di successivo miglioramento, corrispondenti ciascuna ad uno dei periodi della campagna di misura.

La prima fase, Taratura A, prevede la taratura del solo involucro, con particolare riferimento agli ambienti dei piani rialzato e primo. La seconda fase, Taratura B, prevede ancora la taratura del solo involucro, con attenzione focalizzata

[Digitare qui]

sugli ambienti del piano seminterrato. La terza fase, Taratura C, prevede invece la taratura del sistema di riscaldamento (Tab. 2).

Tabella 2: Fasi della Taratura

Fase	Taratura A	Taratura B	Taratura C
Periodo	21/06/2015 26/06/2015	28/07/2015 01/08/2015	13/12/2015 18/12/2015
Impianti	Assenti	Assenti	Risc.
Taratura	Involucro	Involucro	Impianto
Utenti	Assenti	Assenti	Presenti

Modello iniziale

Sulla base dei dati in possesso e sulla possibilità di dedurre le informazioni mancanti viene realizzato un modello di primo tentativo.

Involucro

Viene effettuata una prima modellazione sfruttando le informazioni cartografiche e stratigrafiche, ipotizzando parte degli elementi costruttivi in riferimento ad edifici contemporanei della stessa tipologia (un'ispezione della stratigrafia muraria non è stata resa possibile).

Impianti

Il modello degli impianti si riferisce al solo riscaldamento, il quale consiste di una caldaia, diversi radiatori (almeno uno per stanza/zona termica) e un controllore per la valvola a tre vie. Stando al libretto tecnico, vengono assegnati alla caldaia una potenza massima di 200 kW e un rendimento di 0.93.

Per quanto riguarda i radiatori, la potenza emessa e calcolata dinamicamente in IDA-ICE come segue:

$$P = K l dT^N \quad (11)$$

dove l è la lunghezza del radiatore, dT è la differenza di temperatura istantanea tra l'acqua e l'ambiente, K è la potenza emessa per unità di lunghezza, N è un esponente che, come K , dipende dal materiale e dalla struttura del radiatore.

Per radiatori del piano seminterrato, in base al libretto, è possibile determinare tutte le specifiche tecniche. Un singolo elemento di $0:08 \text{ } 0:08 \text{ } 0:77 \text{ m}^3$, a $T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$, vengono dati un esponente $N = 1.339$ e una potenza massima di 147.4 W (il valore totale dipende solo dalla lunghezza del termosifone).

Per i radiatori del piano rialzato e primo, dal momento che le specifiche tecniche non sono disponibili, viene ipotizzato un esponente $N = 1.28$ (tipico per radiatori ordinari) e viene calcolata la potenza massima secondo quanto suggerito dalla UNI 10200:

$$P = 314 S + C V \quad (12)$$

dove S è la superficie di convezione esterna, V è il volume del radiatore e C è un parametro sperimentale dipendente dal materiale e dalla tipologia del termosifone (per radiatori in acciaio con alettature tra i ranghi viene dato un valore di $C = 22500$ a $T = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$)

In corrispondenza della valvola a tre vie, l'acqua di mandata può essere miscelata con quella di ritorno in modo da aggiustare la temperatura del liquido per raggiungere le condizioni di ambiente interno desiderate risparmiando carburante. Il controllore gestisce la valvola sulla base di una preselezionata curva climatica, nel tentativo di raggiungere il setpoint di temperatura interna desiderato ($25 \text{ } ^\circ\text{C}$ quando è operativo, $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ quando è spento).

Durante l'inverno, il sistema di riscaldamento è attivo tutti i giorni (incluse domeniche e festivi) secondo l'orario di lavoro (8:00-17:00).

Utenti, attrezzatura e illuminazione

Gli utenti, le attrezzature e l'illuminazione negli ambienti sono generalmente considerati presenti/attivi nell'orario di lavoro (tutti i giorni 8:00-17:00). Tuttavia, solo 11 delle 44 stanze (uffici distribuiti tra i piani rialzato e primo) sono costantemente occupati durante l'orario lavorativo. La presenza di occupanti in altri ambienti (sale riunioni, ambulatori, archivio,...) è così sporadica da essere stata considerata ininfluyente.

[Digitare qui]

L'attrezzatura comprende, di base, tutto ciò che è necessario per una postazione di lavoro (computer, monitor, stampante,...), la cui potenza (connessa con il relativo guadagno termico) viene stimata intorno ai 100-200 W e sarà oggetto della taratura.

Il modello così ottenuto è stato tarato nelle tre fasi sopradescritte.

Taratura A

Inizialmente vengono considerati $k = 33$ parametri, tra cui ponti termici, infiltrazioni, strati-grafia delle murature e della copertura, emissività e riflettanza delle superfici esterne, proprietà degli oscuramenti (dettagli riportati in Tab. 3).

Tabella 3: Parametri coinvolti nella SA (A)

Riferimento	Elemento	Primo tentativo	Limite inf.	Limite sup.
Ponti termici	Muro Ext. - Muro Int. [W/(K m)]	0.03	0.024	0.036
	Muro Ext. - Muro Ext. [W/(K m)]	0.08	0.064	0.096
	Perimetro Finestra [W/(K m)]	0.03	0.024	0.036
	Perimetro Porta [W/(K m)]	0.03	0.064	0.096
	Muro Ext. - Copertura [W/(K m)]	0.09	0.024	0.036
	Muro Int. - Copertura [W/(K m)]	0.03	0.064	0.096
Infiltrazioni	ACH	0.5	0.4	0.6
Muro Ext. - Laterizio	s Laterizio Int. [m]	0.12	0.1	0.14
	s Aria [m]	0.04	0.03	0.05
	s Laterizio Ext. [m]	0.12	0.1	0.14
	Emissività Sup. Ext.	0.9	0.72	1
	Ri ettanza Sup. Ext.	0.5	0.4	0.6
Muro Ext. - Marmo	s Laterizio Int. [m]	0.12	0.1	0.14
	s Aria [m]	0.04	0.03	0.05
	s Laterizio Ext. [m]	0.08	0.06	0.1
	Emissività Sup. Ext.	0.9	0.72	1
	Ri ettanza Sup. Ext.	0.5	0.4	0.6
Muro Ext. - Tufo	s Laterizio Int. [m]	0.12	0.1	0.14
	s Aria [m]	0.04	0.03	0.05
	Emissività Sup. Ext.	0.9	0.72	1
	Ri ettanza Sup. Ext.	0.5	0.4	0.6
Copertura	s Massetto [m]	0.07	0.05	0.09
	s Aria [m]	0.04	0.03	0.05
	s Soletta [m]	0.04	0.04	0.05
	s Travetti [m]	0.16	0.12	0.2
	Emissività Sup. Ext.	0.9	0.72	1
	Ri ettanza Sup. Ext.	0.5	0.4	0.6
Proprietà dei Materiali	Laterizio [W/(m K)]	0.387	0.3096	0.4644
	Cl s [W/(m K)]	1.23	0.984	1.476
	CA [W/(m K)]	1.91	1.528	2.292
	Laterocementizio [W/(m K)]	0.6	0.48	0.72
Oscuranti	molt. G	0.15	0.12	0.18
	molt. U	0.9	0.72	1

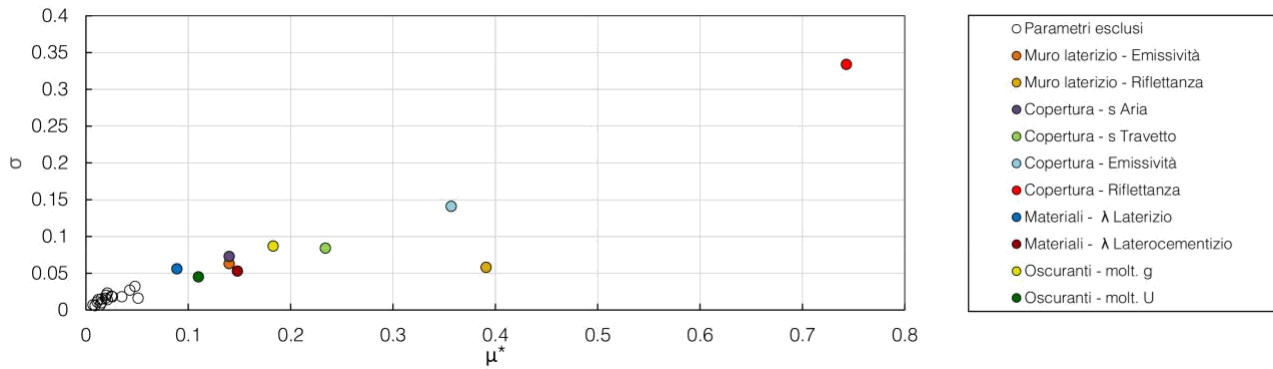


Figura 9: Risultato SA (A)

Successivamente viene effettuata una SA, considerando per ogni parametro un numero di EEs $r = 10$, un numero di livelli $L = 6$ per cercare in un intervallo di incertezza del 20% rispetto al valore di primo tentativo. Dopo 17 ore di calcolo, il numero di parametri viene ridotto a 10 (Fig. 9).

I parametri di input sono dunque selezionati ed è possibile impostare e lanciare il programma di ottimizzazione per la taratura. Una volta iniziata, l'ottimizzazione ha necessitato 437 simulazioni e circa 5 ore per raggiungere la soluzione finale.

Il modello risultante presenta un'evidente riduzione dei parametri statistici, a garanzia della migliore raffinatezza del risultato ottenuto, nonché un accostamento delle curve di temperatura misurata-simulata (Fig 11a).

Taratura B

Si considerano inizialmente $k = 17$ parametri (dettagli riportati in Tab. 4).

Tabella 4: Parametri coinvolti nella SA (B)

Riferimento	Elemento	Primo tentativo	Limite inf.	Limite sup.
Muro Ext. - Laterizio	s Laterizio Int. [m]	0.12	0.1	0.14
	s Aria [m]	0.04	0.03	0.05
	s Laterizio Ext. [m]	0.12	0.1	0.14
	Emissivita Sup. Ext.	0.9	0.72	1
	Ri ettanza Sup. Ext.	0.5	0.4	0.6
Muro Ext. - Marmo	s Laterizio Int. [m]	0.12	0.1	0.14
	s Aria [m]	0.04	0.03	0.05
	s Laterizio Ext. [m]	0.08	0.06	0.1
	Emissivita Sup. Ext.	0.9	0.72	1
	Ri ettanza Sup. Ext.	0.5	0.4	0.6
Muro Ext. - Tufo	s Laterizio Int. [m]	0.12	0.1	0.14
	s Aria [m]	0.04	0.03	0.05
	Emissivita Sup. Ext.	0.9	0.72	1
	Ri ettanza Sup. Ext.	0.5	0.4	0.6
Terreno	s Terreno [m]	2.0	1.6	2.4
Proprieta dei Materiali	Tufo [W/(m K)]	0.550	0.440	0.660
	Terreno [W/(m K)]	2.280	1.824	2.736
Oscuranti	molt. G	0.15	0.12	0.18
	molt. U	0.9	0.72	1

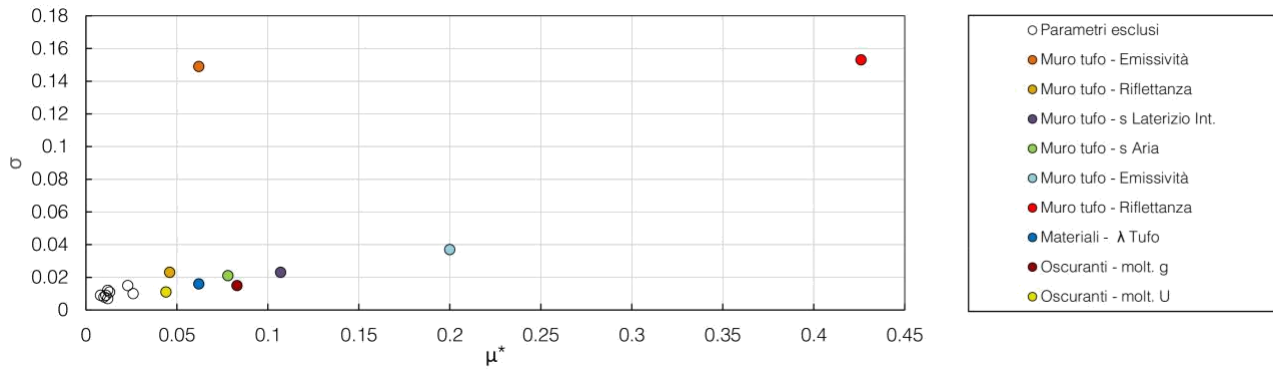


Figura 10: Risultato SA (B)

Successivamente viene effettuata una nuova SA, considerando per ogni parametro un numero di EE $r = 10$, un numero di livelli $L = 6$ per cercare in un intervallo di incertezza del 20% rispetto al valore di primo tentativo. Dopo 9 ore, il numero di parametri viene ridotto a 9 (Fig. 10).

Selezionati i parametri di input e possibile avviare il programma di ottimizzazione per la taratura. Lanciato, il problema ha necessitato 408 simulazioni e circa 4.5 ore per raggiungere la soluzione.

Il modello conseguente il processo di taratura mostra un'evidente riduzione dei parametri statistici, a garanzia della migliore raffinatezza del risultato ottenuto, nonché un accostamento delle curve di temperatura misurata-simulata (Fig. 11b).

Taratura C

Partendo dal risultato della seconda fase, in questo terzo processo l'involucro viene considerato come tarato e si passa alla valutazione dell'impianto.

Dal momento che la maggior parte dei parametri relativi al sistema di riscaldamento sono noti o deducibili, la maggiore incertezza risulta essere quella relativa al controllore per la regolazione dell'acqua di mandata attraverso la valvola a tre vie.

Un primo tentativo di taratura è stato condotto provando ad individuare la curva climatica più appropriata. Sebbene i parametri statistici per la temperatura siano risultati soddisfacenti, la validazione non ha confermato l'accuratezza del processo. Se il consumo stagionale per l'edificio reale e il modello risultava simile, la quantità di gas reale consumata mensilmente risultava nettamente superiore nei periodi più caldi (01/11/2014-27/11/2014 e 13/03/2015-14/04/2015) e inferiore in quello più freddo (24/12/2014-22/01/2015). Si è dunque deciso di adottare una nuova strategia.

In riferimento al consumo reale ottenuto dalle bollette (Tab. 1), si nota che rispetto al cambiamento delle condizioni esterne al passare dei mesi, la quantità di gas consumato non presenta variazioni rilevanti. Questo suggerisce un andamento all'incirca costante della temperatura di mandata, che potrebbe essere giustificato ipotizzando che, a causa del lungo tempo di servizio, il controllore non funzioni più in modo appropriato.

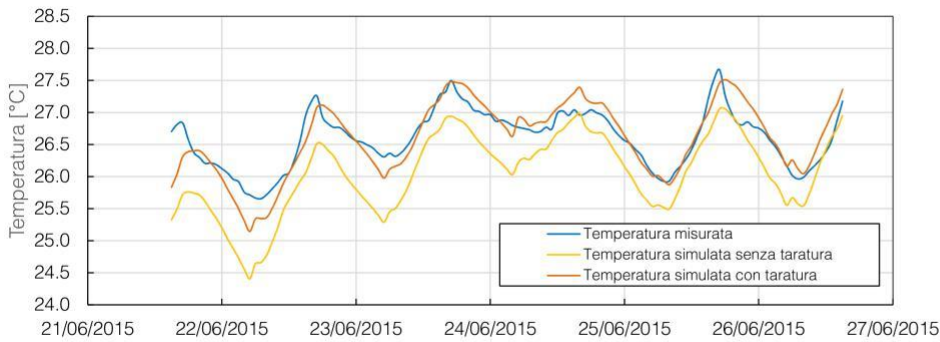
Tenendo presente questa nuova ipotesi, viene fatto un secondo tentativo di taratura dell'impianto.

Dal momento che il numero di parametri preselezionati (Tab. 5) è ridotto ($k = 4$), in questo caso non viene svolta alcuna SA.

Tabella 5: Parametri coinvolti nella Taratura C

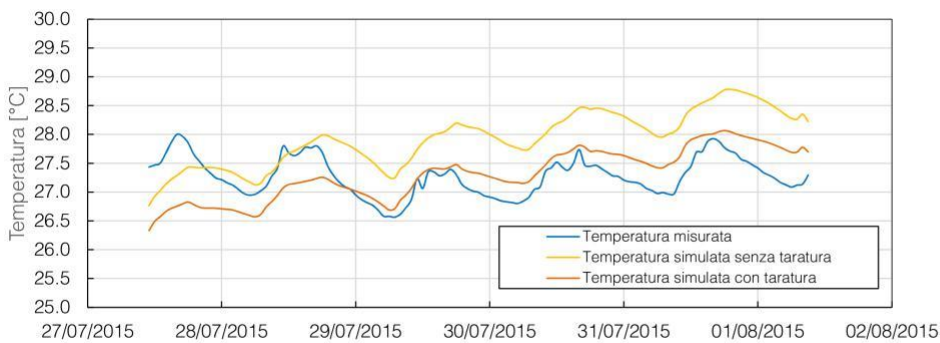
Riferimento	Elemento	Primo tentativo	Limite inf.	Limite sup.
Curva climatica	$T_{acq} \text{ a } T_{amb} = 30 \text{ C [C]}$	45	45	55
	$T_{acq} \text{ a } T_{amb} = 30 \text{ C [C]}$	45	45	55
Potenza radiatori	Esponente N	1.28	1.26	1.30
Guadagni interni	Potenza attrezzatura [W]	100	100	200

Includendo questi parametri di input, viene impostato e lanciato il problema di ottimizzazione per la terza taratura. L'ottimizzazione ha necessitato 299 simulazioni e un tempo totale di calcolo di circa 6 ore per raggiungere la soluzione finale (Fig. 11c).



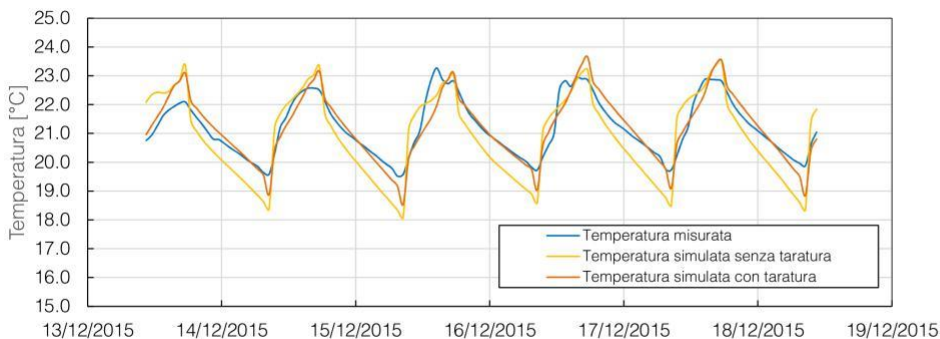
	No Tar	Tar
RMSE [°C]	0.632	0.284
CV(RMSE) [%]	2.377	1.067
NRMSE [%]	21.644	9.712

(a) Risultato Taratura A



	No Tar	Tar
RMSE [°C]	0.928	0.417
CV(RMSE) [%]	3.405	1.53
NRMSE [%]	32.095	14.426

(b) Risultato Taratura B



	No Tar	Tar
RMSE [°C]	0.795	0.396
CV(RMSE) [%]	3.751	1.872
NRMSE [%]	18.451	9.208

(c) Risultato Taratura C

Figura 11: Risultati Taratura

Validazione

Considerando il modello risultante dalla Taratura C, in riferimento al periodo 01/11/2014-14/04/2015, il consumo di energia simulato per il riscaldamento viene confrontato con le bollette reali del gas.

Come valutazione dello scostamento, vengono considerati un Errore Relativo percentuale ($ER_{\%}$) mensile e stagionale e il CV(RMSE) stagionale, dove $ER_{\%}$ è definito come segue:

$$ER(\%) = \frac{s-m}{m} \cdot 100 \quad (13)$$

Secondo la direttiva ASHRAE 14-2002, per considerare un modello robusto in termini di consumo energetico occorre che $ER_{\%}$ annuale (o stagionale) e CV(RMSE) siano rispettivamente pari o inferiori a 5% e 10%.

Il confronto di consumo di combustibile per il riscaldamento (Tab. 6) mostra ora un buon risultato per $ER_{\%}$. Come prevedibile, il consumo relativo al periodo corrispondente alla parte dell'anno in cui si colloca la settimana di taratura riporta il miglior risultato. Peggiori, ma comunque accettabili, sono i risultati ottenuti per i periodi più caldi ((01/11/2014-27/11/2014 e 13/03/2015-14/04/2015) e per quello più freddo 24/12/2014-22/01/2015). Il valori globali di $ER_{\%}$ e

[Digitare qui]

CV(RMSE) risultano ottimi stando alle direttive della guida ASHRAE. Il modello può dunque essere considerato correttamente tarato.

Tabella 6: Consumo mensile e stagionale rilevato dalle bollette e simulato con il modello risultante dalla Taratura C.

Periodo	Gas rilevato [kWh]	Gas simulato [kWh]	ER% [%]	CV(RMSE) [%]
01/11/2014-27/11/2014	4107	3631	-11.59	-
28/11/2014-23/12/2014	4250	4330	1.88	-
24/12/2014-22/01/2015	4856	5464	12.52	-
23/01/2015-17/02/2015	4338	4582	5.62	-
18/02/2015-12/03/2015	3656	3497	-4.34	-
13/03/2015-14/04/2015	4019	4.254	5.85	-
01/11/2014-14/04/2015	25226	25758	2.11	8.37

6.1.3 Retrofit

A seguito di una modellazione robusta dell'edificio, si procede al relativo progetto di riqualificazione.

Analisi dello stato di fatto

Lo stato di fatto viene valutato sia in termini di microclima interno che di consumi.

Per la prima valutazione vengono selezionati alcuni giorni del periodo invernale ed estivo nei quali analizzare l'evoluzione (nell'arco delle 24 ore) delle condizioni interne, sia con edificio in free floating che con impianti reali in funzione.

Nella seconda indagine si valutano i consumi stagionali di un impianto ideale inserito nell'edificio per garantire il mantenimento delle condizioni microclimatiche desiderate per gli ambienti.

In entrambi i casi, le condizioni esterne sono determinate da un file climatico relativo alla città di Roma del tipo TRY.

Microclima

L'analisi microclimatica rivela, in generale, un funzionamento carente dell'involucro dell'edificio e una cattiva gestione dell'impianto.

Sia in inverno che in estate in condizioni di free floating la differenza di temperatura esterna-interna è molto ridotta. Fa eccezione il piano seminterrato dove si riscontra una condizione leggermente migliore.

In condizione invernale, con impianti accesi, non in tutti gli ambienti è garantito il rag-giungimento della temperatura desiderata. Si ottiene comunque una condizione confortevole grazie alla maggiorazione del setpoint minimo di temperatura (25 °C contro i 20 °C previsti da norma). Si nota poi, a riconferma dell'inadeguatezza dell'involucro, come la dispersione di calore sia importante già dalle prime ore di spegnimento.

Consumo

L'analisi dei consumi mostra un elevato dispendio energetico, specie in condizioni invernali. Si confermano le conclusioni dell'analisi microclimatica: il fabbricato è dotato di un involucro inadeguato, un impianto parzialmente retrodatato e configurato con impostazioni eccessive per far fronte alle carenze prestazionali (in termini energetici) degli elementi costruttivi della struttura. Si conferma poi una (relativamente) ridotta differenza tra i consumi mensili, ad indicare il possibile malfunzionamento del controllore della valvola a tre vie.

Ipotesi di intervento

Con riferimento a quanto emerso dall'analisi dello stato di fatto si elabora un'ipotesi di intervento che riguardi l'isolamento delle murature esterne e della copertura, la sostituzione delle finestre dei piani rialzato e primo, la sostituzione della caldaia e del controllore, una gestione più appropriata delle impostazioni di impianto.

Verranno vagliate, dove possibile, più opportunità per singolo elemento, tenendo presente tanto i parametri relativi alle prestazioni energetiche quanto i costi.

Isolamento murature esterne

Si prevede l'inserimento di isolante in intercapedine per insufflaggio. In particolare, vengono prese in considerazione quattro soluzioni: poliuretano espanso (PU), resina ureica (UF), perle di polistirene espanso (EPS), occhi di cellulosa (Tab. 7).

Tabella 7: Parametri tecnico-economici per isolanti a insufflaggio

[Digitare qui]

Tipo	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	P [€/m ³]
PU	0.028	1.2	1464	200.00
UF	0.031	15.0	1800	190.00
EPS	0.034	16.0	1200	170.00
Cellulosa	0.037	45.0	2100	150.00

Isolamento copertura

Si prevede l'inserimento di isolante a cappotto. Nello specifico, vengono valutate cinque soluzioni, disponibili in tre spessori diversi (0.10 m, 0.12 m, 0.15 m): pannello rigido in poliuretano con gas a membrana impermeabilizzante (PU_{gas}), pannello rigido in poliuretano con rivestimento in velo vetro satinato (PU_{vetro}), pannello rigido in poliuretano con cartongesso bitumato (PU_{crtf}), pannello rigido in polistirene espanso (EPS), pannello rigido in lana di roccia (Tab. 8).

Tabella 8: Parametri tecnico-economici per isolanti per coperture

Tipo	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	P [€/m ³]
PU _{gas}	0.023	36.0	1453	337.00
PU _{vetro}	0.026	35.0	1464	307.00
PU _{crtf}	0.028	43.0	1458	263.00
EPS	0.031	16.0	1450	205.00
Lana di roccia	0.033	40.0	1660	154.00

Finestre piani rialzato e primo

Le attuali finestre dei piani rialzato e primo sono costituite da vetrate singole, non trattate, con infissi privi di taglio termico.

Si prevede l'inserimento di nuove finestre con telaio in PVC con taglio termico disponibili con vetrocamera 4-16-4 (doppio vetro) o vetrocamera 4-12-4-12-4 (triplo vetro) con aria o argon (Ar) al 90% e trattamento Basso Emissivo (BE) o Selettivo (S). Le nove tipologie di finestre in commercio con combinazioni dei precedenti elementi sono riportate in Tabella 9.

Tabella 9: Parametri tecnico-economici per le finestre

Vetro	U _g [W/m ² K]	g	T	T _v	P [€/m ³]
Doppio BE	1.40	0.59	0.52	0.79	110.00
Doppio BE + Ar	1.10	0.59	0.52	0.79	130.00
Triplo BE + Ar	1.00	0.51	0.44	0.71	160.00
Doppio BE	1.30	0.49	0.44	0.71	135.00
Doppio BE + Ar	1.00	0.49	0.44	0.71	155.00
Triplo BE + Ar	0.95	0.46	0.38	0.65	185.00
Doppio S	1.30	0.27	0.24	0.50	165.00
Doppio S + Ar	1.00	0.27	0.24	0.50	180.00
Triplo S + Ar	0.95	0.26	0.22	0.47	210.00

Gestione

Viene data la possibilità di pre-riscaldare l'edificio entro due ore dall'inizio dell'orario di lavoro e contemporaneamente il set-point di temperatura minima degli ambienti viene fissato, come da normativa, a 20 °C.

Caldaia e controllore

Si sostituiscono la vecchia caldaia con una a condensazione e il sistema di controllo per garantire la richiesta di una giusta temperatura di mandata dell'acqua ad una data temperatura esterna, avendo cura di definire una nuova curva climatica appropriata.

6.1.4 Ottimizzazione del retrofit

A partire dall'ipotesi di retrofit elaborate, l'effettiva configurazione proposta viene determinata attraverso un processo di ottimizzazione multi-obiettivo.

Le diverse ipotesi di intervento (isolamento muri, isolamento copertura e relativo spessore, finestre, accensione impianti, curva climatica del nuovo controllore) costituiscono le variabili di input del problema (la caldaia a condensazione e il nuovo set-point di temperatura interna vengono inserite a priori).

Ciascun elemento costruttivo viene inserito con le proprie caratteristiche fisiche all'interno di IDA-ICE e identificato con una cifra corrispondente al prezzo in euro per unità di misura. Gli elementi potranno così essere richiamati nella funzione costo.

I parametri di input sono dunque selezionati ed è possibile impostare e lanciare il problema di ottimizzazione per il retrofit. L'ottimizzazione ha necessitato 192 simulazioni (il criterio di arresto è coinciso con il massimo numero di individui, dati da una popolazione di 16 elementi per 12 generazioni) e circa 25 ore per raggiungere la soluzione finale.

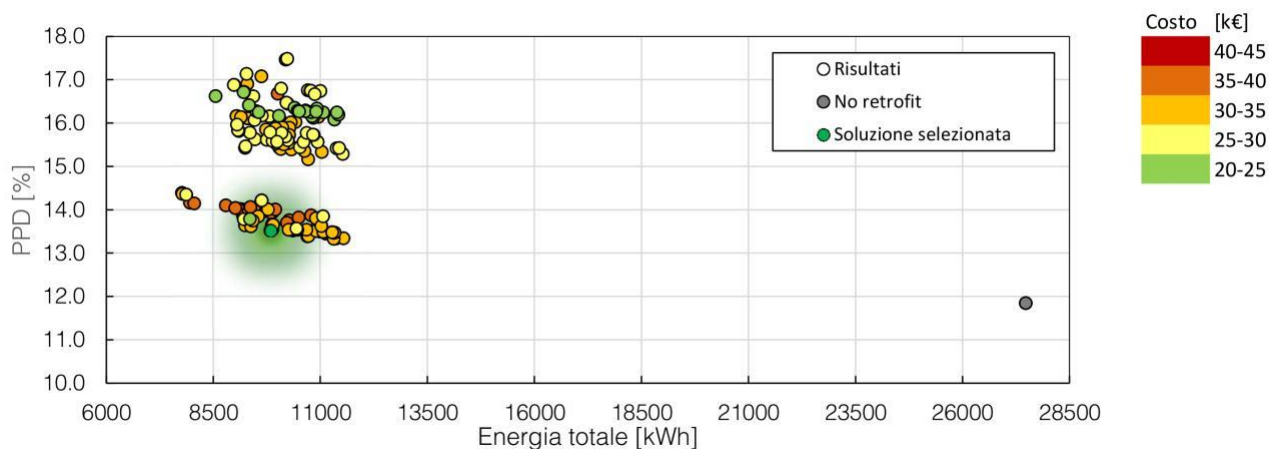
Il risultato del processo consiste in un insieme di punti disposti in uno spazio tridimensionale, determinato dalle tre funzioni obiettivo.

Per riassumerlo in una rappresentazione unica, il risultato viene restituito in un grafico le cui coordinate cartesiane corrispondano all'energia totale e al PPD (per un'analisi più diretta il dato di PDH viene ricondotto al più noto parametro di Fanger) e siano dotate di differente cromatura in funzione del costo.

Si osserva come i risultati si dispongano su due livelli nettamente distinti di PPD nello spazio di soluzione. Tale differenza è definita principalmente dalle diverse realtà economiche legate ai due gruppi di soluzioni: superiormente (a PPD maggiore a pari dispendio di energia) si trovano i risultati generalmente più economici, mentre inferiormente (quindi a PPD minore) quelli caratterizzati da un investimento più importante.

Si nota inoltre come il livello di comfort sia, per tutte le soluzioni, inferiore rispetto a quello di partenza. Detta condizione dipende dal precedente utilizzo di un set-point di temperatura fuori normativa (25 °C), che seppur non raggiunto per carenze di involucro e impianto, garantisce comunque una condizione confortevole, a discapito di un ingente dispendio di energia.

Figura 12: Risultati Retrofit



Al contrario si può osservare come una qualunque delle soluzioni individuate comporti una riduzione drastica dei consumi.

A discrezione dell'operatore viene infine selezionato uno scenario che favorisca una soluzione equilibrata in termini di energia e comfort, a dispetto di un investimento comunque di fascia medio bassa (Fig. 12).

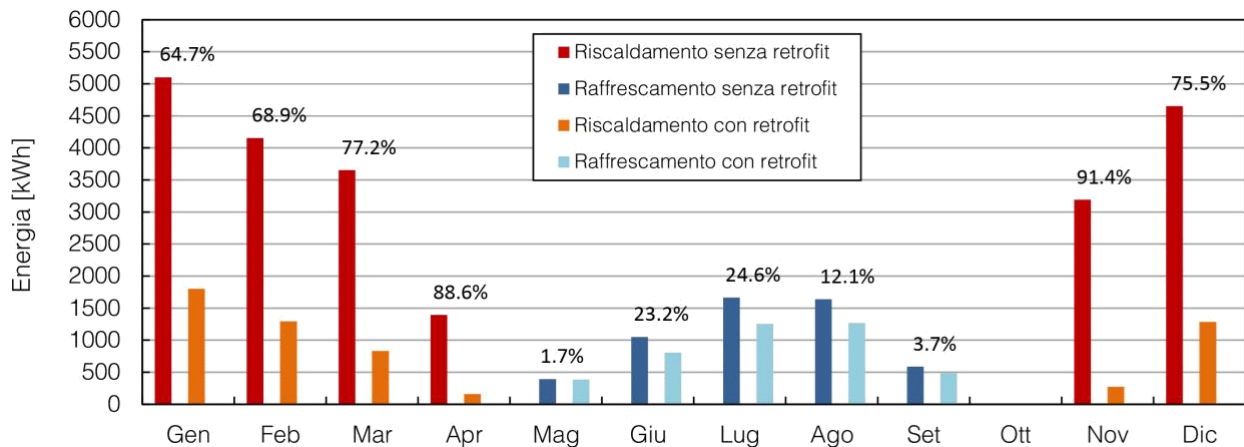


Figura 13: Confronto dei consumi prima e dopo l'intervento di riqualificazione

Valutazione

Per lo scenario adottato si nota dunque un'importante riduzione del consumo energetico (in totale nell'anno si consumano 9840 kWh, per un risparmio rispetto all'edificio non riqualificato del 64.3%), specie per quanto riguarda il riscaldamento (Fig. 13).

Come già precisato, il notevole abbattimento dei consumi è ottenuto a fronte di una lieve riduzione del comfort (il PPD sale al 13.52%). L'edificio permane comunque nella medesima classe di qualità che possedeva in origine (Classe C).

L'investimento previsto (circa 28300 €) può essere ripagato dai risparmi in un tempo di circa 21 anni, qualora non si tenesse conto delle agevolazioni al 70% per la ristrutturazione con miglioramento delle prestazioni energetiche, o di poco inferiore ai 9, qualora le si considerasse (Fig. 14).

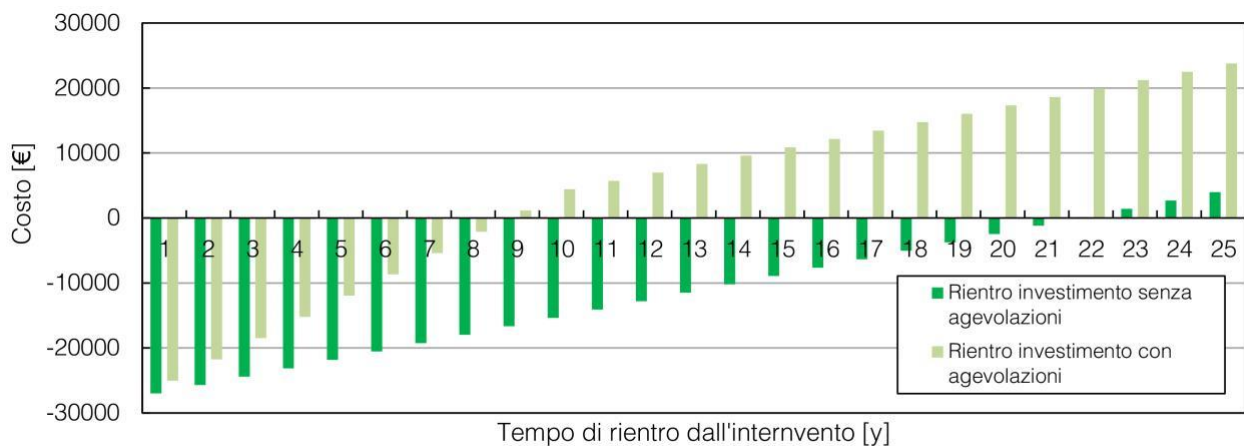


Figura 14: Valutazione dei tempi di rientro per la soluzione di retrofit ottima.

6.1.5 Ottimizzazione del controllo

In alternativa o conseguentemente al retrofit può essere attuato il controllo automatico.

Analisi dello stato di fatto

Per il controllo esercitato sull'edificio in condizioni originali si utilizzano le informazioni ottenute per l'analisi dello stato di fatto propedeutica alla riqualificazione.

Per la gestione ottimizzata dell'edificio già sottoposto all'intervento di retrofit si sfrutta invece la valutazione della soluzione individuata. I risultati ottenuti per i parametri di impianto, nonostante siano frutto di un processo di ottimizzazione, restano comunque vincolati dal limite di essere parte di una soluzione generale per l'intera stagione. Ha dunque senso valutare la possibilità di una soluzione migliore riducendo il tempo di indagine ad un orizzonte di ottimizzazione più ristretto.

Ipotesi di intervento

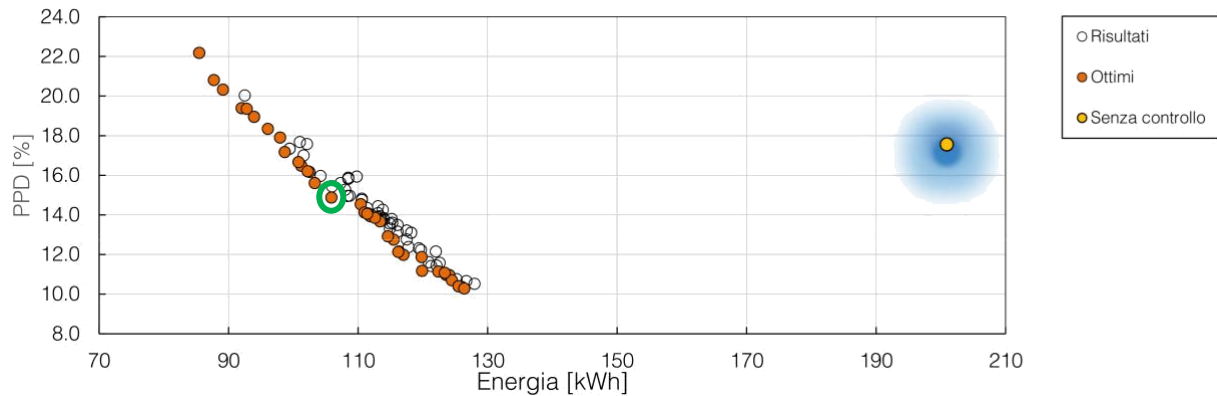
[Digitare qui]

I parametri di impianto selezionati come variabili del problema di ottimizzazione comprendono, oltre all'orario di accensione, un profilo di temperature di mandata (una per ogni blocco di ottimizzazione attivo) determinate come setback rispetto alla curva climatica di base. Ad ogni ora e possibile variare detto valore di temperatura di mandata in modo continuo fino a una differenza di 20 °C.

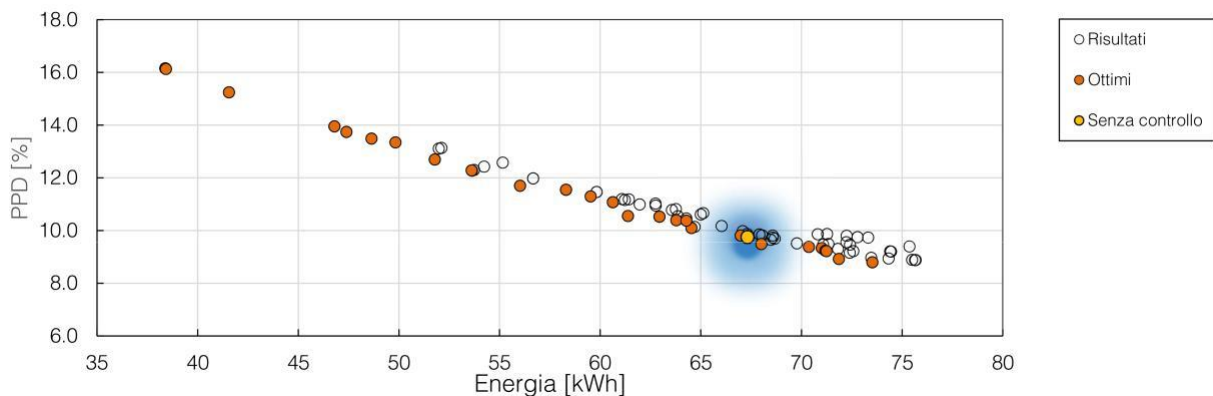
Controllo automatico

Si decidono e si impostano i parametri e la configurazione dei problemi di controllo secondo quanto dichiarato in metodologia.

L'occupazione viene considerata coerentemente alle abitudini lavorative degli utenti e come informazione climatica viene sfruttato un file di tipo TRY riferito alla città di Roma.



(a) Risultato del controllo sull'edificio originale



(b) Risultato del controllo sull'edificio riqualificato

Figura 15: Risultati Controllo su orizzonte di 24 ore per il giorno 03/01/2018.

Pur non essendo limitati da vincoli di previsione, si fissa un orizzonte di ottimizzazione pari a 24 h (l'analisi viene e attuata scegliendo come riferimento il giorno 03/01/2018). Detto orizzonte comprende 2 blocchi esclusi dall'ottimizzazione (uno all'inizio e uno alla fine dell'orizzonte, rappresentativi della fase notturna in cui l'impianto rimane inattivo), 1 blocco di prescrizione (con inizio variabile tra le 6.00 e le 8.00 nel quale avviene l'accensione dell'impianto e termine alle 9.00) e 8 blocchi ordinari (uno per ogni ora fino allo spegnimento fissato per le 17.00).

I parametri di input sono dunque selezionati ed è possibile impostare e lanciare i problemi di ottimizzazione per il controllo. Entrambe le ottimizzazioni hanno necessitato 240 simulazioni (il criterio di arresto è coinciso con il massimo numero di individui, dati da una popolazione di 16 elementi per 15 generazioni) e circa 1.5 ore per raggiungere la soluzione finale.

Il risultato dei processi consiste in un insieme di punti disposti in uno spazio bidimensionale, determinato dalle due funzioni obiettivo (Fig. 15).

Valutazione

Per quanto riguarda il controllo dell'edificio originale (Fig. 15a), si nota come una qualunque soluzione risulti comportare uno scenario nettamente vantaggioso in termini di consumi e come più del 50% delle opzioni comporti anche un

[Digitare qui]

miglioramento in termini di comfort. In figura 16 è riportato un profilo di temperatura dell'acqua di mandata determinato dal processo di ottimizzazione e riferito alla soluzione evidenziata sul fronte paretiano di figura 15a.

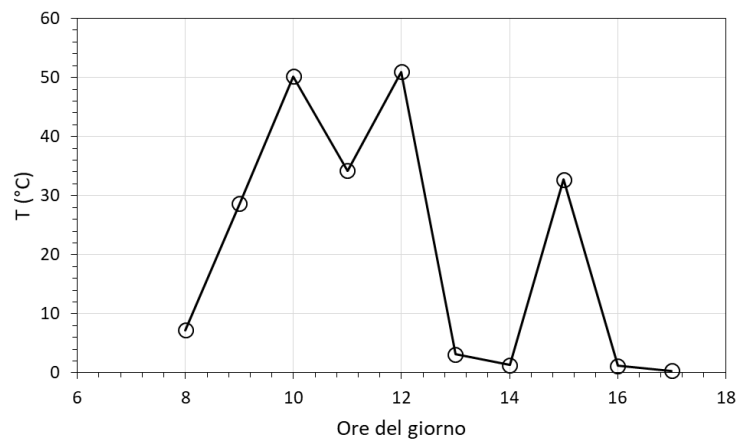


Figura 16. Profilo orario ottimo della temperatura di mandata dell'acqua identificato dal controllo predittivo.

In riferimento al controllo dell'edificio riqualificato invece (Fig. 15b), si osserva come la soluzione dell'ottimizzazione del retrofit, includendo essa stessa parametri di impianto, si trovi ad occupare una posizione tra quelle ottime rinvenute con la soluzione dell'attuale problema. A partire da questa configurazione, volendo individuare uno scenario differente, un miglioramento in termini di consumi risentirebbe di una riduzione (percentualmente) paragonabile in termini di comfort e viceversa.

6.2 Edificio uso residenziale

La palazzina situata a Trento è stata utilizzata per valutare le potenzialità della procedura di taratura automatica implementata in IDA ICE. Essa è stata comparata con altre procedure di taratura, utilizzando anche altri software di simulazione per la realizzazione del modello, al fine di evidenziare differenze nei processi di retrofit e controllo predittivo legate a differenti tool e metodologie applicate al medesimo caso studio. Il lavoro è stato condotto in sinergia con le UO5 e UO6. L'approccio adottato per lo studio è mostrato in figura 16. La modellazione è stata realizzata con la versione 4.8 di IDA ICE. Quattro gruppi diversi hanno utilizzato tre tools tra i più utilizzati (TRNSYS, Energy Plus, IDA ICE) simulando il secondo piano dell'edificio di Trento (Figura 17). UNITN aveva a disposizione un set di dati di input dettagliato mentre gli altri tre gruppi disponevano di un set base. La taratura è stata effettuata per il solo involucro edilizio, per il mese di ottobre, con due metodi manuali (POLIMI e POLITO) e due automatici (UNITN e UNITOV) utilizzando la temperatura media interna degli appartamenti come variabile di taratura. I risultati sono riportati in Figura 18. La figura 18 a mostra gli andamenti della temperatura media misurata e di quelle simulate dai vari gruppi per il caso base (edificio modellato con i dati a disposizione). La figura 18 b riporta, invece, gli andamenti della temperatura ottenuti dopo la taratura effettuata dai quattro gruppi.

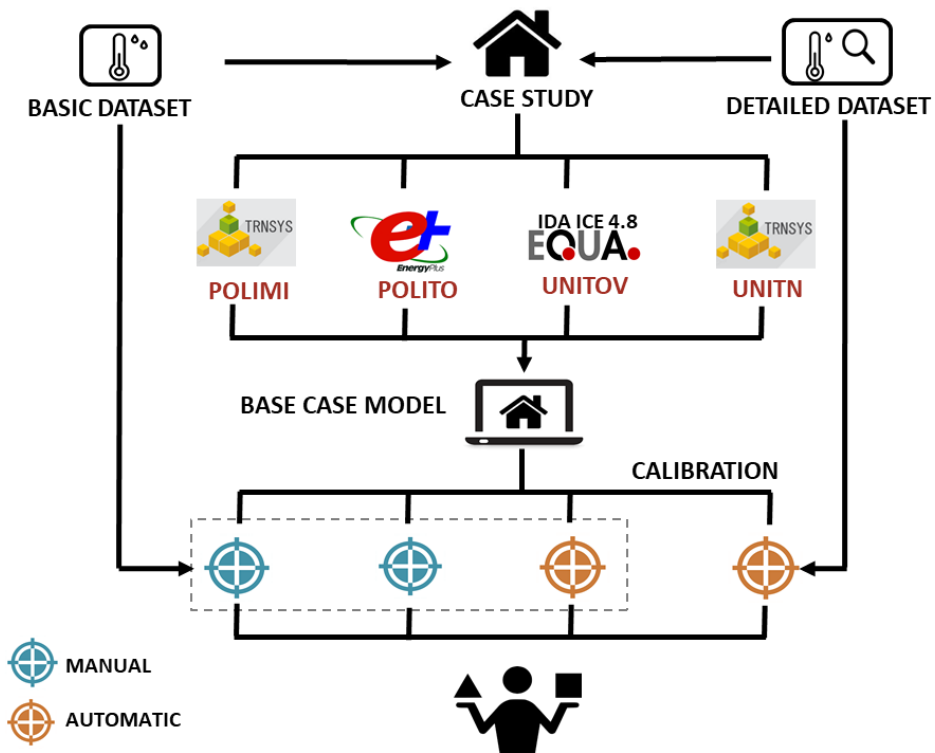


Figura 16. Approccio metodologico utilizzato per la valutazione di diversi tool di simulazione e procedure di taratura del modello di edificio residenziale.

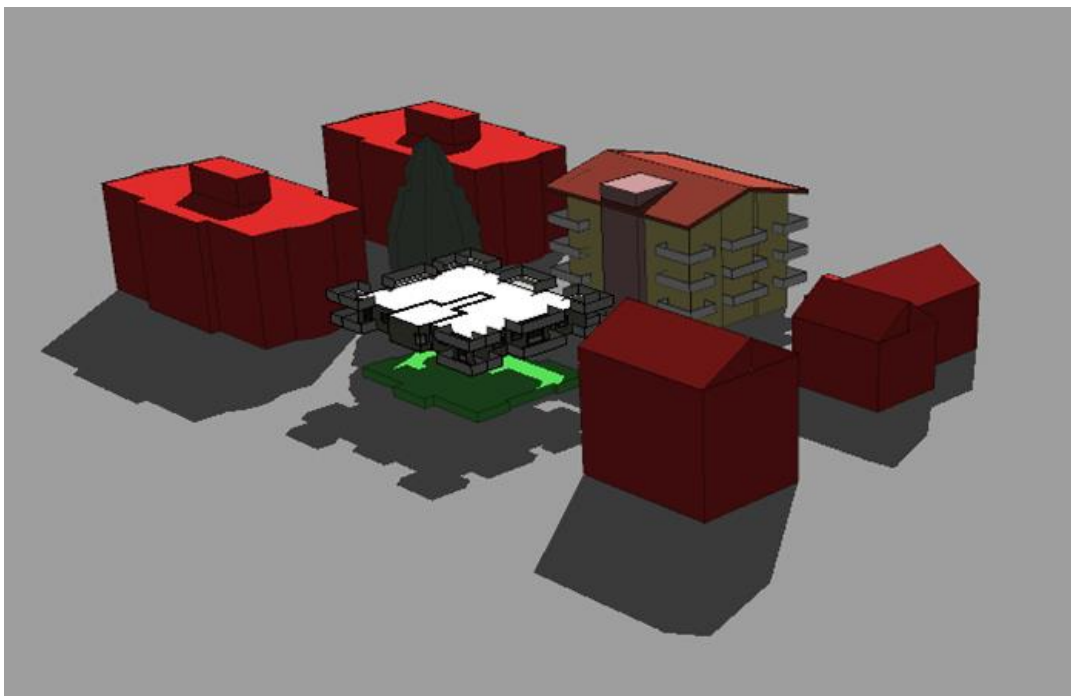
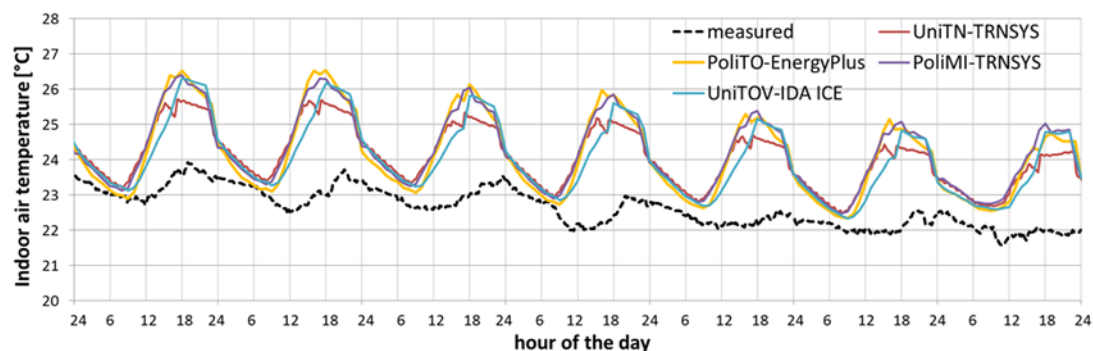
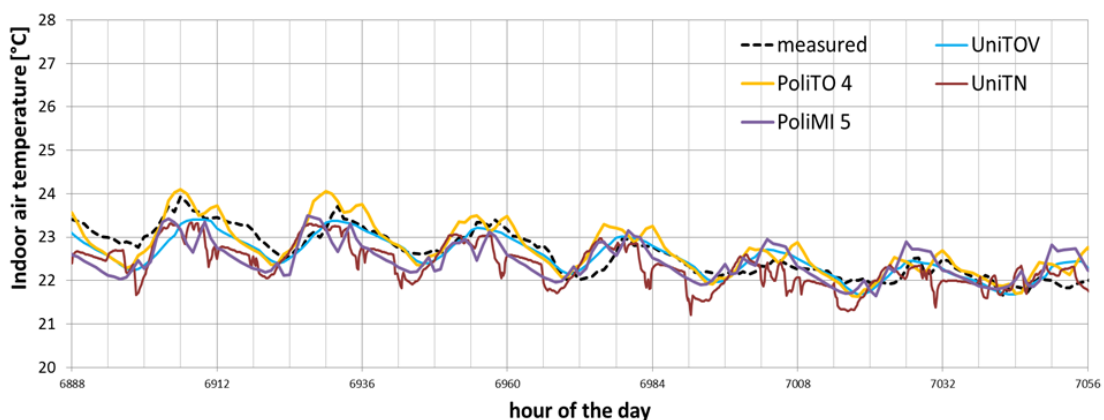


Figura 17. Modello in IDA ICE 4.8, utilizzato per l'analisi.



(a)



(b)

Figura 18. (a) andamento della temperatura prima della taratura; (b) andamento della temperatura dopo la taratura.

La tabella 10 riporta il RMSE ottenuto dai 4 gruppi. UNITOV ha ottenuto un eccellente risultato applicando la procedura automatica descritta. In generale la taratura automatica si è rivelata un processo in grado di gestire in modo rapido la complessità del processo. Nel caso specifico, a differenza degli altri risultati, la soluzione ottima di taratura di UNITOV non ha previsto l'immissione di aria in ambiente dovuta all'apertura delle finestre. Nella realtà tale comportamento è stato effettivamente rilevato in uno degli appartamenti oggetto della taratura. La non completa coerenza dei risultati ottenuti indica come sia necessario un attento controllo ed analisi critica dei risultati ottenuti.

Tabella 10. Risultati della taratura sul modello di edificio residenziale

Gruppo	Tool	Dataset	Taratura	RMSE [°C]
POLIMI	TRNSYS	base	manuale	0.38
POLITO	Energy Plus	base	manuale	0.42
UNITN	TRNSYS	dettagliato	automatica	0.43
UNITOV	IDA ICE 4.8	base	automatica	0.27

A completamento di questa attività di ricerca si prevede di utilizzare il modello tarato per valutare soluzioni di retrofit e verificare quanto l'accuratezza della taratura possa influire sulla scelta di dette soluzioni.

6.3 Edificio Storico

Il processo automatico messo a punto in questo studio è stato applicato ad un edificio storico per minimizzare il rischio di degrado di un soffitto ligneo in esso contenuto, minimizzando contemporaneamente il consumo energetico e massimizzando il comfort.

In primo luogo si è applicato il processo automatico di taratura sulle tre stanze del modello di edificio ed oggetto di studio (figura 19), tarando sia sul profilo di temperatura che su quello di umidità relativa. Il periodo di taratura comprende gli ultimi 15 giorni di Maggio 2017, considerando un periodo di inzializzazione da Febbraio a metà Maggio in quanto l'edificio presenta una forte inerzia termica.

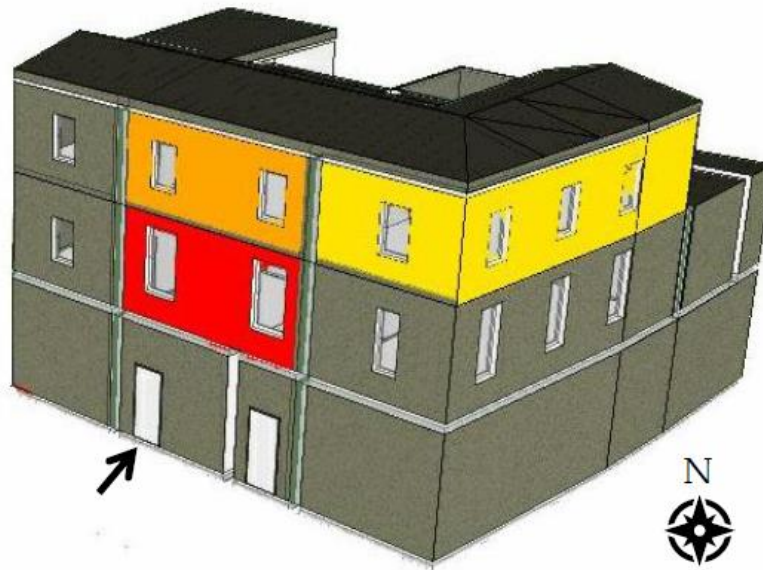


Figura 19. Modello in IDA ICE 4.8 del Museo di Priverno, le pareti colorate mostrano le stanze oggetto della taratura automatica.

La Tabella 11 riporta i risultati della taratura per le tre stanze.

Tabella 11. Risultati della taratura, T_s è la temperatura del soffitto ligneo.

Statistics	T	RH	T_s
<i>Room 4</i>			
MAE	0.4°C	1.5%	
RMSE	0.5°C	2.1%	
CV-RMSE	1.8%	4.3%	
r_s	0.8	0.6	
<i>Room 9</i>			
MAE	0.4°C	1.6%	0.2°C
RMSE	0.4°C	2.0%	0.2°C
CV-RMSE	1.7%	3.9%	1.0%
r_s	1.0	0.7	0.9
<i>Room 10</i>			
MAE	0.3°C	1.6%	
RMSE	0.4°C	2.2%	
CV-RMSE	1.6%	4.6%	
r_s	1.0	0.7	

Come si può osservare i risultati sono eccellenti sia per quanto riguarda la temperatura (T) sia per quanto riguarda l'umidità relativa (RH).

Il modello della stanza 9, su cui si è concentrato lo studio, è stato successivamente modificato inserendo un modello di parete con trasferimento di umidità (HMWall) ed è stato nuovamente tarato manualmente ottenendo un miglioramento di tutti gli indicatori come mostrato in tabella 12.

Tabella 12. Taratura della stanza 9 dopo inserimento modello di parete (HMWall).

Statistics	T	RH	T _s
<i>Room 9 (HMWall model)</i>			
MAE	0.2°C	0.8%	0.4°C
RMSE	0.3°C	1.0%	0.5°C
CV-RMSE	1.2%	2.0%	2.1%
r _s	1.0	0.9	0.9

Il modello tarato è stato utilizzato in un processo di ottimizzazione automatica al fine di individuare le condizioni ottimali di impianto per garantire il minimo consumo energetico ed il minimo rischio di degrado utilizzando come variabile di rischio la dimensione delle fessurazioni, C e la funzione empirica ricavata dai dati sperimentali che descrive l'andamento di C al variare della temperatura e dell'umidità relativa. Le variabili di input sono i set point di temperatura ed umidità relativa di un sistema di condizionamento attivo nel periodo estivo (Luglio). Nel caso specifico la funzione obiettivo è stata determinata come media pesata delle tre funzioni di degrado, consumo energetico e benessere degli occupanti. Maggior peso è stato associato alla funzione di degrado. Gli intervalli di variabilità di T(21-26°C) e UR (40% - 60%) sono stati vincolati e i valori sono stati modificati con step 1 °C e 5% rispettivamente, in modo da garantire i criteri di ASHRAE 2011 per la conservazione [19]. Il processo di ottimizzazione, in questo caso, è una brutta forza che ha portato a 30 simulazioni i cui risultati sono riportati in figura 20. I valori della funzione obiettivo sono inseriti in una matrice dove la prima riga rappresenta la temperatura e la prima colonna l'umidità relativa. La funzione obiettivo varia tra 0 e 100% dove valori bassi indicano valori minimi mentre valori alti indicano soluzioni non compatibili. Si osserva come due siano le soluzioni migliori di combinazione dei setpoint di T e UR che minimizzano la funzione obiettivo (valore = 7%).

Weighted function						
	21	22	23	24	25	26
40	14%	12%	10%	10%	12%	15%
45	8%	7%	7%	18%	22%	26%
50	12%	23%	31%	32%	34%	40%
55	30%	28%	22%	21%	13%	18%
60	33%	20%	12%	8%	9%	14%

Figura 20. Matrice di valutazione delle soluzioni ottime di setpoint di T e UR per La stanza 9 del Museo di Priverno.

Bibliografia

- [1] Nguyen A. T., Reiter S., Rigo P., A review on simulated-based optimization methods applied to building performance analysis, Applied Energy, 2014, Vol. 113, pp. 1043-1058.
- [2] Evins R., A review of computational optimization methods applied to sustainable building design, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, Vol. 22, pp.230-245.
- [3] Shaikh P. H., Mohd Nor N. B., Nallagownden P., Elamvazuthi I., Ibrahim T., A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Vol. 34, pp. 409-429.
- [4] Mathews E. H., Arndt D. C., Piani C. B. , Heerden E., Developing cost efficient control strategies to ensure optimal energy use and sufficient indoor comfort, Applied Energy, 2000, Vol. 66, pp. 135-59.
- [5] Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y., PID control system analysis and design: problems, remedies, and future directions, IEEE Control System Magazine, 2006, Vol. 26, pp. 32-41.

- [6] Kaya I., Tan N., Atherton D. P., Improved cascade control structure for enhanced performance, *Journal of Process Control*, 2007, Vol. 17, pp.3-16.
- [7] Gouda M., Danaher S., Underwood C., Thermal comfort based fuzzy logic controller, *Building Services Engineering Research and Technology*, 2001, Vol. 22, pp. 237-53.
- [8] Kazanasmaz T., Gunaydin M., Binol S., Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings, *Building and Environment*, 2009, Vol. 44, 1751-1757.
- [9] Karatasou S., Santamouris M., Geros V., Modeling and predicting building's energy use with artificial neural networks: methods and results, *Energy and Buildings*, 2006, Vol. 38, pp. 949-958.
- [10] Ma Y., Borrelli F., Hencsey B., Packard A., Borto S., Model predictive control of thermal energy storage in building cooling systems, *Proceedings of the 48th IEEE conference on decision and control*, Shanghai (China), 2009, pp.392-397.
- [11] Karlsson H., Hagetoft C. E., Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings, *Building and Environment*, 2011, Vol. 46, pp. 556-569.
- [12] Attila S., Computational optimization Zero Energy Building design: Interview with 28 international experts. International Energy Agency Task 40: Towards Net Zero Energy Buildings Subtask B, Louvain la Neuve: Universit Catholique de Luvain, 2012.
- [13] Clarke J. A., *Energy Simulation in Building Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- [14] Morris M. D., Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, *Technometrics*, 1991, Vol. 33, pp. 161-174.
- [15] Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M., *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*, John Wiley & Sons, 2004.
- [16] Asadi E., Gameiro da Silva M., Antunes C. H., Dias L., Glicksman L., Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and application, *Energy and Buildings*, 2014, Vol. 81, pp. 444-456.
- [17] Corbin C. D., Henze G. P., May-Ostendorp P., A model predictive control optimization environment for real-time commercial building application, *Journal of Building Performance Simulation*, 2012, Vol. 6, pp. 159-174.
- [18] Giovannini, L., Zardi, D., de Franceschi, M. (2013) Characterization of the thermal structure inside an urban canyon: field measurements and validation of a simple model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52, 64-81.
- [19] ASHRAE (2011) *ASHRAE handbook — HVAC applications*. Chapter 23: Museums, galleries, archives, and libraries. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta