



Classificazione Decimale Dewey

720.47 (23.) ARCHITETTURA E AMBIENTE

SERENA SUMMA

CLIMA, ENERGIA E COSTRUZIONI

**STRUMENTI PER UN PATRIMONIO
EDILIZIO SOSTENIBILE**





ISBN
979-12-218-2281-6

PRIMA EDIZIONE
ROMA 29 OTTOBRE 2025

A Ed & Al

Tutto è uno.
Uno è tutto.

INDICE

12	Capitolo I Introduzione
15	Capitolo II Efficienza energetica negli edifici 2.1. Direttive dell'Unione Europea, 15 – 2.2. Norme Europee, 18 – 2.3. Revisione della letteratura, 20 – 2.3.1. <i>Nuovi edifici</i> , 21 – 2.3.2. <i>Ristrutturazione degli edifici esistenti</i> , 22
25	Capitolo III Calcolo dinamico del fabbisogno energetico degli edifici 3.1. EN ISO 52016-1:2017 in letteratura, 25 – 3.2. Metodi, 26 – 3.2.1. <i>EN ISO 52016-1:2017</i> , 27 – 3.2.2. <i>Trnsys</i> , 32 – 3.3. Casi studio, 32 – 3.3.1. <i>Geometria e zonizzazione</i> , 33 – 3.3.2. <i>Superfici opache</i> , 34 – 3.3.3. <i>Superfici trasparenti</i> , 36 – 3.3.4. <i>Clima e altre ipotesi</i> , 36 – 3.4. Risultati, 38 – 3.4.1. <i>Analisi comparativa degli Allegati (Europeo e Italiano)</i> , 38 – 3.4.2. <i>Impatto del coefficiente di trasmissione solare normale ($g_{gl,n}$) sul calcolo del fabbisogno energetico</i> , 42 – 3.4.3. <i>Calcolo migliorato del coefficiente di trasmissione dell'energia solare totale (g_{gl})</i> , 44 – 3.4.4. <i>Influenza dei parametri termofisici delle pareti opache sul calcolo del fabbisogno energetico secondo la EN ISO 52016-1</i> , 46 – 3.5. Conclusioni, 49.
51	Capitolo IV Intelligenza artificiale ed efficienza energetica 4.1. Facciate ventilate in letteratura, 51 – 4.2. Materiali e metodi, 53 – 4.2.1. <i>Titolo di sottoparagrafo</i> , 53 – 4.2.2. <i>Titolo di sottoparagrafo</i> , 57 – 4.2.3. <i>Titolo di sottoparagrafo</i> , 58 – 4.3. Risultati, 59 – 4.3.1. <i>Valutazione dei modelli predittivi</i> , 59 – 4.3.2. <i>Modelli di apprendimento automatico</i> , 60 – 4.4. Conclusioni, 63.

65	Capitolo V Sistemi solari passivi e edifici iper-isolati 5.1. Sistemi solari passivi in letteratura, 65 – 5.2. Materiali e metodi, 67 – 5.2.1. <i>Caso studio</i> , 67 – 5.2.2. <i>Fasi della sperimentazione</i> , 69 – 5.3. Risultati, 68 – 5.3.1. <i>Caratterizzazione termica dello spazio solare</i> , 71 – 5.3.2. <i>Consumi energetici</i> , 72 – 5.3.3. <i>Comfort termico</i> , 76 – 5.4. Conclusioni, 77
79	Capitolo VI Impatto del cambiamento climatico sugli edifici nzeb 6.1. Il cambiamento climatico in letteratura, 79 – 6.2. Metodi, 81 – 6.2.1. <i>Dati climatici e geografici</i> , 81 – 6.2.2. <i>Caso studio</i> , 82 – 6.3. Risultati, 85 – 6.3.1. <i>Consumo energetico</i> , 85 – 6.3.2. <i>Comfort termico</i> , 90 – 6.4. Conclu- sioni, 91.
95	Capitolo VII Conclusioni
99	Capitolo VIII Allegato A
103	<i>Bibliografia</i>

CAPITOLO I

INTRODUZIONE

Gli edifici e il loro processo costruttivo rappresentano oggi oltre un terzo del consumo finale di energia a livello mondiale e quasi il 40% delle emissioni totali di CO₂, dirette e indirette.

Secondo le stime dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), per raggiungere un patrimonio edilizio a zero emissioni di carbonio entro il 2050 — e avvicinarsi così agli obiettivi dell'Accordo di Parigi [1] — sarà necessario ridurre le emissioni di CO₂ dirette e indirette rispettivamente del 50% e del 60% entro il 2030 [2].

Ma come è possibile realizzare questa transizione?

Nel settore delle costruzioni, la Direttiva europea EPBD III [3] individua sei azioni fondamentali:

- (i) miglioramento dell'efficienza energetica dell'involucro edilizio negli edifici nuovi ed esistenti;
- (ii) impiego di materiali e soluzioni costruttive innovative;
- (iii) controllo del microclima interno;
- (iv) utilizzo di pompe di calore ad alta efficienza o di altri sistemi a zero emissioni di carbonio;
- (iv) adozione di sistemi di controllo intelligenti e tecnologie di automazione (domotica);
- (v) digitalizzazione per ottimizzare le politiche di efficienza energetica.

Questo volume si concentra in particolare sulle prime tre tematiche, analizzandole attraverso approcci numerici e sperimentali.

Il miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio rappresenta il primo e più importante passo per ridurre le emissioni di gas

serra entro il 2050. Sebbene molti Paesi dovranno adottare nei prossimi anni codici edilizi obbligatori per perseguire gli obiettivi “Net Zero”, nella maggior parte dei casi tali strumenti non costituiscono ancora una priorità politica esplicita [4].

I codici energetici forniscono un mezzo semplice ed efficace per verificare il rispetto dei requisiti minimi di prestazione energetica, riducendo il consumo di energia e contribuendo a mitigare la dipendenza dalle importazioni, la scarsità delle risorse e gli effetti del cambiamento climatico.

Per supportare gli Stati membri in questo percorso, la Commissione Europea ha incaricato il Comitato Europeo di Normazione (CEN) di elaborare una serie completa di norme tecniche — la serie ISO 52000 — che garantisca un approccio sistemico alla valutazione delle prestazioni energetiche, considerando l'interazione dinamica tra sistemi, utenti e condizioni climatiche.

L'intera serie di norme prevede due allegati: l'allegato B, che descrive nel dettaglio il metodo di calcolo proposto a livello europeo, e l'allegato A, che può essere utilizzato dalle singole nazioni per modificare o implementare il modello di calcolo definito nell'allegato B.

Tra queste nuove norme, la più rilevante è la EN ISO 52016-1:2017, “Fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento, temperature interne e carichi di calore sensibile e latente – Parte 1: Procedure di calcolo” [5].

Per questo motivo, dopo una panoramica generale sull'efficienza energetica degli edifici nel Capitolo 2, il Capitolo 3 presenta un'analisi dettagliata dell'accuratezza del metodo orario dinamico previsto dall'EN ISO 52016-1:2017 [5], con particolare attenzione al calcolo del trasferimento di calore attraverso gli elementi opachi dell'involucro edilizio. Vengono confrontati tre modelli: quello europeo (allegato B), quello nazionale italiano (allegato A) e quello implementato nel software di simulazione accademico Trnsys.

L'analisi evidenzia inoltre le differenze dovute all'utilizzo di valori costanti della trasmittanza termica e del coefficiente di trasmissione solare dei vetri (ggl). A tal proposito, è stato validato un algoritmo alternativo (integrato nell'allegato A) che calcola il ggl in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare diretta che varia ora per ora,

assicurando una migliore coerenza con i risultati di Trnsys, in particolare nella stagione estiva.

La ricerca e lo sviluppo di materiali e soluzioni costruttive innovative rappresentano un ulteriore pilastro fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi della Direttiva EPBD III 2018/844 [3].

In un contesto in cui circa il 75% del patrimonio edilizio europeo è inefficiente, un tasso di ristrutturazione annuale del 3% — basato su tecnologie e materiali ad alta efficienza — potrebbe ridurre il consumo energetico complessivo del 5-6% e le emissioni di CO₂ di circa il 5% [3][6].

In questo ambito, il Capitolo 4 esplora una tecnologia costruttiva particolarmente promettente: le facciate ventilate (VF).

Viene condotta un'analisi comparativa su tre tipologie di facciata, con particolare enfasi su una variante progettuale innovativa che integra:

- (i) una struttura monostrato in blocchi di fibra di legno cementata, in cui le cavità d'aria fungono da camera di ventilazione;
- (ii) un sistema di supporto metallico semplificato e a basso costo.

La variante progettuale innovativa è confrontata con due stratigrafie massive multilayer, che differiscono nella posizione dello strato massivo rispetto alla cavità ventilata. Lo studio comprende un monitoraggio sperimentale su scala reale delle tre tipologie di facciata e l'applicazione di algoritmi di machine learning per prevedere le temperature interne della cavità e i flussi di calore, individuando così la configurazione più efficiente dal punto di vista energetico.

Un'altra soluzione analizzata in questo libro riguarda i sistemi solari passivi, in particolare gli spazi solari bioclimatici (o serre solari). Questi spazi sono serre adiacenti alle zone termiche climatizzate (ztc) degli edifici, che trasferiscono calore per irraggiamento verso lo spazio interno, contribuendo positivamente al bilancio energetico invernale. Tuttavia, essendo sistemi esclusivamente radiativi, risultano poco reattivi e poco efficaci se applicati a edifici iperisolati e/o a elevata massa termica.

Per questo motivo, nel Capitolo 5 viene presentato uno studio sperimentale sull'integrazione tra una serra solare e un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC), finalizzato a combinare il trasferimento di calore radiativo con quello convettivo verso la zona termica climatizzata. L'analisi ha permesso di individuare la configurazione ottimale della superficie vetrata della serra, le soglie di attivazione della VMC in relazione ai consumi e al comfort termico, e di valutare le prestazioni in differenti condizioni climatiche.

Sebbene gli edifici costituiscano una delle principali fonti di emissioni di gas serra, rappresentano al tempo stesso una delle maggiori opportunità di mitigazione del cambiamento climatico.

Il Capitolo 6 affronta questa prospettiva analizzando l'impatto dei cambiamenti climatici sulle prestazioni energetiche e di comfort di un edificio residenziale plurifamiliare nZEB progettato secondo la normativa italiana vigente [7].

Attraverso tre scenari climatici, simulati tramite il modello ERA-Interim/UrbClim [8], lo studio valuta l'impatto dei cambiamenti climatici su:

- (i) il consumo di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio;
- (ii) il livello di comfort interno secondo la teoria adattativa [9] e una valutazione a lungo termine [10].

Roma è stata scelta come caso di studio, in quanto presenta l'incremento termico più significativo in Italia, dovuto sia ai cambiamenti climatici sia all'effetto isola di calore urbana.

Infine, il Capitolo 7 raccoglie le conclusioni e le prospettive future del lavoro, delineando le possibili direzioni per la ricerca e le possibili soluzioni di efficienza energetica da tener in considerazione nella progettazione.

CAPITOLO II

EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI EDIFICI DIRETTIVE, NORME E LETTERATURA

2.1. Direttive dell'Unione Europea

In termini di legislazione, l'Europa affrontò per la prima volta la questione dell'efficienza energetica negli edifici nel 1993, con la Direttiva 1993/76/CE [11], nota come SAVE, che puntava a limitare le emissioni di anidride carbonica. La Direttiva richiedeva agli Stati Membri di sviluppare e implementare programmi volti a migliorare l'efficienza energetica negli edifici pubblici e privati, l'isolamento dei nuovi edifici, l'ispezione regolare delle caldaie, le verifiche energetiche delle imprese ad alta intensità energetica, la contabilizzazione dell'energia dei sistemi di raffrescamento e di acqua calda, la fatturazione dei costi di riscaldamento e il finanziamento, tramite terzi, degli investimenti per l'efficienza energetica nel settore pubblico.

Le evidenti conseguenze del cambiamento climatico, formalmente riconosciute dal Protocollo di Kyoto [12] del 1997, primo accordo internazionale a impegnare i Paesi industrializzati a ridurre le emissioni di gas serra, spinsero l'Europa a emanare una serie di normative (EPBD I–IV ed EED) volte a stabilire obblighi più rigorosi, facilitare la certificazione energetica degli edifici e promuovere l'impiego di fonti rinnovabili.

Nel 2002 fu introdotta la Direttiva 2002/91/CE (EPBD I) [13] per migliorare la prestazione energetica degli edifici nella Comunità Europea, considerando le condizioni climatiche locali ed esterne. Essa richiedeva la definizione di una metodologia per il calcolo della prestazione energetica degli edifici ai fini della certificazione, la definizione di requisiti minimi di efficienza per i nuovi edifici e per quelli esistenti sottoposti a ristrutturazioni significative, l'ispezione regolare delle caldaie e dei sistemi di condizionamento e la verifica delle loro prestazioni.

Il calcolo doveva tenere conto delle caratteristiche termiche dell'edificio, dei sistemi di riscaldamento, di acqua calda e di condizionamento, della ventilazione meccanica controllata, dell'illuminazione, della presenza di schermature solari e della qualità del comfort interno, evidenziando i vantaggi derivanti dall'adozione di sistemi solari attivi, cogenerazione e teleriscaldamento. L'Articolo 7 introdusse inoltre l'obbligo di fornire, al momento della costruzione, vendita o locazione, l'Attestato di Certificazione Energetica (ACE) ai futuri acquirenti o locatari.

La EPBD del 2002 evidenziò la necessità che il settore delle costruzioni elevasse i propri standard per contribuire concretamente alla riduzione delle emissioni di gas serra. Per questo motivo, nel 2010 fu adottata la Direttiva 2010/31/UE (EPBD II, "Recast") [14], che introdusse il concetto di "edificio a energia quasi zero" (nZEB), ossia edifici ad altissime prestazioni con fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo, coperto in misura significativa da energia rinnovabile prodotta in loco. La Direttiva introdusse anche il concetto di "livello di prestazione energetica ottimale in funzione dei costi", che permette a ciascuno Stato Membro di individuare il livello di efficienza più conveniente considerando i costi di investimento, manutenzione, gestione e smaltimento lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio. Nel 2011 la Commissione Europea pubblicò le Linee Guida per definire metodologie comuni e edifici di riferimento nazionali sui quali calcolare i livelli minimi di prestazione energetica, stabilendo che dal 1° gennaio 2021 tutti i nuovi edifici dovessero essere nZEB. La Recast sottolineò l'importanza di una metodologia adeguata di valutazione della prestazione energetica e introdusse la differenziazione dei calcoli in base alla categoria edilizia.

Questo quadro normativo favorì un cambiamento nella progettazione edilizia, incentivando il recupero e la riqualificazione energetica del patrimonio esistente e orientando i nuovi edifici verso consumi ridotti, coperti da fonti rinnovabili, con un ruolo centrale per tecnologie decentralizzate come cogenerazione, teleriscaldamento, teleraffrescamento e pompe di calore.

Nel 2012 la Direttiva 2012/27/UE (EED) [15] estese gli obblighi a tutti i Paesi europei, fissando un miglioramento dell'efficienza energetica del 20% entro il 2020 e obiettivi nazionali indicativi. Essa prevedeva risparmi annuali dell'1,5% per fornitori e distributori di energia,

la ristrutturazione del 3% della superficie degli edifici pubblici ogni anno, l'acquisizione di prodotti e servizi ad alta efficienza energetica e la misurazione accurata dei consumi e dei tempi di utilizzo dell'energia.

Nel 2018, le Direttive 2010/31/UE [14] e 2012/27/UE [15] furono aggiornate dalla Direttiva 2018/844/UE (EPBD III) [3], che fissò nuovi obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 40% entro il 2030 e la creazione di un sistema energetico sostenibile e decarbonizzato entro il 2050. La direttiva introdusse l'obbligo di migliorare la prestazione energetica degli edifici nuovi ed esistenti, sostenne la mobilità elettrica e lo sviluppo di infrastrutture di ricarica e promosse l'installazione di sistemi di automazione e controllo (domotica), introducendo un indicatore di predisposizione all'intelligenza dell'edificio per sensibilizzare proprietari e occupanti sull'ottimizzazione dei consumi energetici attraverso tecnologie smart.

La più recente Direttiva 2024/1275/UE (EPBD IV) [16], entrata in vigore il 28 maggio 2024, aggiorna il quadro normativo con l'obiettivo di accelerare la completa decarbonizzazione del patrimonio edilizio entro il 2050, in coerenza con il Green Deal europeo e il pacchetto "Fit for 55". Introduce il concetto di "Zero-Emission Building" (ZEB), edifici a emissioni operative nulle o quasi nulle alimentati da fonti rinnovabili, obbligatori per i nuovi edifici pubblici dal 2028 e per tutti i nuovi edifici dal 2030. La Direttiva stabilisce Standard Minimi di Prestazione Energetica (MEPS) per gli edifici esistenti, promuove la riqualificazione graduale degli edifici meno efficienti, prevede i Passaporti di Ristrutturazione e l'obbligo di installare impianti solari ove tecnicamente ed economicamente sostenibili. Inoltre, introduce la progressiva eliminazione dei sussidi per le caldaie a combustibili fossili dal 2025, incentiva la digitalizzazione e l'automazione dei sistemi edilizi e richiede la valutazione del potenziale di riscaldamento globale sull'intero ciclo di vita (LCA) degli edifici. Gli Stati Membri dovranno recepire la Direttiva entro il 29 maggio 2026, predisponendo strategie nazionali, strumenti finanziari e misure di sostegno rivolte ai soggetti vulnerabili per garantire una transizione energetica equa e inclusiva.

2.2. Norme Europee

Per la prima volta, la Direttiva 2002/91/CE (EPBD I) [13] impone alla Commissione Europea di definire una metodologia per il calcolo della prestazione energetica degli edifici. In molti paesi europei, il calcolo mensile del consumo energetico annuo per il riscaldamento era già effettuato secondo la norma EN 832:1998 [17], successivamente evoluta nella EN ISO 13790:2004 [18]; tuttavia, mancava completamente il calcolo del fabbisogno di raffrescamento e non esisteva un metodo unificato per il calcolo dell'energia primaria. Negli anni successivi, l'uso crescente dei sistemi di climatizzazione e l'aumento dei consumi estivi portarono alla pubblicazione dell'EN ISO 13790:2008 [19], che introdusse un metodo di calcolo dinamico e implementò il calcolo mensile includendo la valutazione del fabbisogno energetico per il raffrescamento sia degli edifici residenziali sia di quelli non residenziali.

In assenza di norme europee in grado di coprire l'intero processo di calcolo, la Direttiva 2002/91/CE (EPBD I) si limitava a indicare una serie di fattori da considerare nella valutazione della prestazione energetica. Contemporaneamente, la Commissione Europea affidò al Comitato Europeo di Normazione (CEN) il compito di sviluppare un pacchetto di norme per l'applicazione completa della Direttiva, che però, secondo il progetto CENSE del 2008, risultò poco coordinato, ambiguo, disomogeneo e non immediatamente traducibile in software.

Con la pubblicazione della Direttiva 2010/31/UE (EPBD II) [14], la Commissione si trovò nuovamente a confrontarsi con la mancanza di metodi di calcolo europei unificati e interconnessi, e nel 2012 decise di affidare al CEN un secondo mandato per revisionare tutti gli standard del pacchetto EPBD precedente. Oltre a definire i contenuti di ciascuna norma e a introdurre un metodo dinamico orario come riferimento per il controllo dei requisiti legislativi, il gruppo di coordinamento stabilì una struttura comune per tutti i documenti nella fase preliminare. Ogni norma doveva avere contenuti esclusivamente normativi, essere accompagnata da un rapporto tecnico supplementare in caso di contenuti informativi, essere testata tramite foglio di calcolo e includere un modello con tutti i dati di calcolo necessari e i dati applicativi

predefiniti (Allegato B), in modo da rendere l'algoritmo utilizzabile anche senza specifiche nazionali (Allegato A) [20].

Dopo la fase preliminare iniziò la revisione vera e propria: dal 2013 al 2016 l'intero pacchetto EPBD fu aggiornato e, nel 2017, il CEN pubblicò il nuovo insieme di norme, EN ISO 52000 [21]. Attualmente, questa serie definisce un metodo completo per il calcolo della prestazione energetica degli edifici, capace di considerare gli utenti, le variazioni climatiche esterne e le interazioni tra i sistemi tecnici, valutando l'energia primaria totale come somma delle energie primarie relative a riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, ventilazione e produzione di acqua calda sanitaria (vedi Figura 2.1).

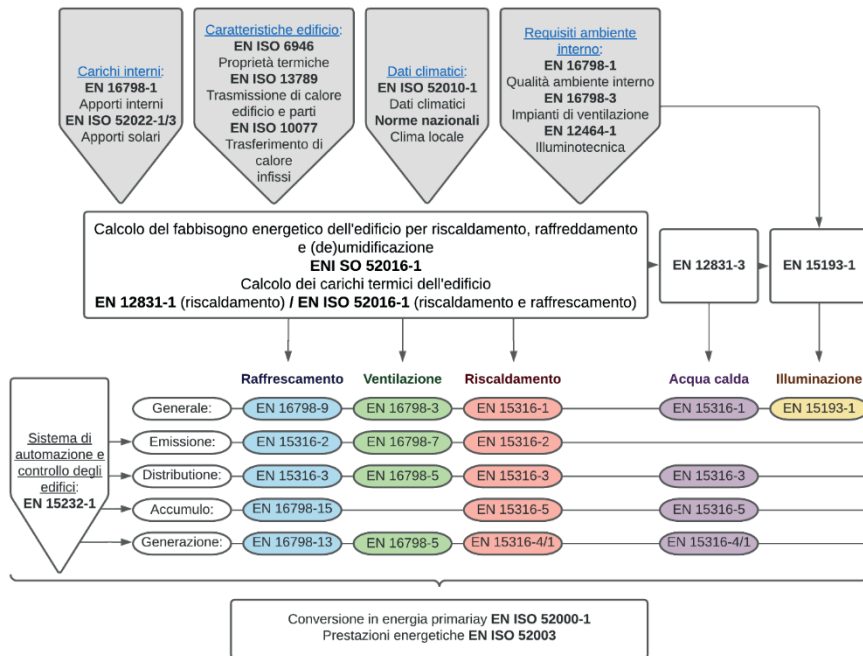


Figura 2.1. Nuovo insieme di norme, EN ISO 52000 [21].

Tra tutti gli standard, particolare rilievo va attribuito all'EN ISO 52016-1 [5]. Questo standard propone due metodi di calcolo per stimare il fabbisogno energetico degli edifici: un metodo mensile stazionario e un metodo dinamico orario. In particolare, il metodo dinamico

— evoluzione del metodo dinamico previsto dall'EN ISO 13790:2008 [19]— risulta indispensabile per il calcolo dei fabbisogni estivi, poiché questi sono influenzati da fenomeni molto più variabili rispetto a quelli invernali, nonché per la valutazione degli edifici dotati di impianti intermittenti, soprattutto nel settore terziario.

2.3. Revisione della letteratura

Per conseguire l'obiettivo ZEB, è necessario applicare misure di efficienza energetica sia agli edifici di nuova costruzione sia a quelli esistenti. Questi ultimi rivestono un ruolo particolarmente rilevante, poiché, oltre a presentare in genere prestazioni energetiche inferiori, costituiscono la maggior parte del patrimonio edilizio. Il loro efficientamento è quindi essenziale per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione della domanda energetica complessiva.

2.3.1. *Nuovi Edifici*

Le prestazioni energetiche dei nuovi edifici migliorano costantemente nel tempo, grazie sia all'aggiornamento continuo delle normative sia al progresso delle soluzioni tecniche disponibili.

Numerosi studi sperimentali dimostrano che la geometria e la morfologia dell'edificio — in particolare il fattore di forma e il rapporto finestre-pareti (WWR) — hanno un'influenza diretta sul fabbisogno energetico e sul comfort interno.

Nelle aree a clima freddo, edifici con fattori di forma ridotti, quindi più compatti, favoriscono un'ottimizzazione dei flussi termici e una minore dispersione di calore [22–24]. Al contrario, nelle regioni più calde, per evitare fenomeni di surriscaldamento, è importante curare con attenzione l'orientamento, il WWR, l'ombreggiamento, il livello di isolamento termico e l'impiego di strategie di free-cooling [25]. Quest'ultima tecnica, quando associata a sistemi di recupero del calore e di ventilazione meccanica controllata, può incrementare significativamente l'efficienza energetica complessiva dell'edificio.