



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

DOTTORATO DI RICERCA IN
*SOSTENIBILITÀ E INNOVAZIONE PER IL PROGETTO
DELL'AMBIENTE COSTRUITO E DEL SISTEMA PRODOTTO*

CICLO XXXVIII - ex DM 352

**Proposte metodologiche e operative per la
transizione energetica sostenibile, la
decarbonizzazione e la coesione nella grande
distribuzione organizzata**

Settore Scientifico Disciplinare

IIND-07/B

Dottorando

Dott. Simone Forastiere

Tutor

Prof.ssa Carla Balocco

Co-Tutor

Dott.sa Cristina Piselli

Coordinatore

Prof.ssa Paola Gallo

Abstract

La transizione energetica non può prescindere dalle fonti energetiche green di cui la prima e principale risorsa è l'ambiente. L'utilizzo delle energie rinnovabili risulta strettamente connesso all'utilizzo termodinamico dell'energia e alla completa conoscenza dei consumi energetici nonché alla loro mappatura digitale. Parallelamente, i consumi energetici devono essere quanto più possibile ridotti al fine di minimizzare l'impatto energetico-ambientale degli edifici.

Il settore della Grande Distribuzione Organizzata (GDO) si contraddistingue per gli edifici ad elevata intensità energetica, riconducibile in larga misura alla necessità di garantire la continuità operativa della catena del freddo, oltre che al funzionamento dei sistemi di climatizzazione e di illuminazione artificiale. In un contesto normativo e ambientale progressivamente orientato alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas a effetto serra, si rende necessario sviluppare approcci metodologici in grado di supportare in modo efficace la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente.

Il presente lavoro di ricerca propone un framework metodologico integrato per l'analisi, la modellazione e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dei sistemi edificio-impianto esistenti destinati alla vendita alimentare della Grande Distribuzione Organizzata, con particolare riferimento a punti vendita di media e grande superficie appartenenti a una rete aziendale strutturata. La delimitazione del campo di applicazione consente di riferire l'analisi a una sottocategoria specifica della GDO, caratterizzata da elevata intensità energetica, continuità operativa della catena del freddo, presenza di sistemi HVAC, illuminazione artificiale estesa e vincoli gestionali propri dell'attività commerciale alimentare.

Il metodo si fonda sull'integrazione tra modelli BIM (Building Information Modeling), modellazione energetica dinamica BEM (Building Energy Modeling) e dati energetici reali disponibili, con l'obiettivo di supportare la diagnosi, la calibrazione del modello, la definizione di scenari di intervento e la valutazione comparativa delle prestazioni energetiche, ambientali ed economiche. Il lavoro non implementa direttamente Digital Twin operativo e dinamico, inteso come modello digitale costantemente aggiornato da dati rilevati ed acquisiti in tempo reale, ma sviluppa la necessaria base metodologica digitalizzata e interoperabile propedeutica a future applicazioni di Digital Twin ed integrazione di sistemi Internet of Things (IoT).

Il metodo viene applicato a casi studio reali di punti vendita della GDO, selezionati in funzione di criteri di rappresentatività della tipologia edilizia, della disponibilità dei dati e del contesto climatico. Il presente studio prevede lo sviluppo di un'analisi energetica dello stato di fatto, supportata dal confronto tra consumi reali e risultati delle simulazioni,

al fine di individuare le principali criticità energetiche. Successivamente, vengono definite e simulate diverse strategie di intervento, articolate su involucro edilizio, impianti, sistemi di illuminazione e integrazione di fonti di energia rinnovabile.

I risultati evidenziano come la catena del freddo rappresenti il principale contributo ai consumi energetici complessivi e come un approccio integrato consenta di ottenere significativi miglioramenti in termini di riduzione dei consumi, delle emissioni e dei costi di esercizio. La ricerca dimostra che l'utilizzo di modelli digitali interoperabili costituisce uno strumento efficace di supporto alle decisioni per la riqualificazione energetica dei retail della GDO, offrendo un approccio replicabile e adattabile a diversi contesti operativi per l'ottimizzazione degli edifici esistenti.

Indice

1. Background.....	12
1.1 Letteratura	12
1.2 La refrigerazione nei retail della GDO	15
1.3 Sistemi di monitoraggio e gestione dei flussi energetici	18
1.4 Gli interventi più diffusi sugli edifici esistenti	19
2. Quadro normativo.....	22
2.1 Le direttive dell'Unione Europea	23
2.2 Le normative per gli impianti HVAC.....	25
2.3 Le normative per gli impianti catena del freddo (celle frigorifere, banchi frigo e banchi surgelati)	27
2.4 Le normative per i sistemi di illuminazione artificiale	28
2.5 Le normative relative ai sistemi di telegestione.....	29
2.6 Le normative relative alle energie rinnovabili	31
3. Metodologia	34
3.1 Struttura del metodo e tipologie di analisi	35
3.2 Applicazione del metodo e i suoi limiti	38
3.2.1 Assunzioni semplificative e limiti previsionali	41
3.3 Obiettivi dell'analisi	42
3.4 La raccolta dati.....	45
3.5 Strumenti di modellazione	47
3.5.1 Modellazione digitale e gestione energetica avanzata	50
3.6 Analisi dei cambiamenti climatici	52
3.7 Definizione delle strategie.....	56
3.7.1 Involucro	57
3.7.2 Impianti	58
3.7.3 Illuminazione	59
3.7.4 Fonti di energia rinnovabile	63
4. I casi studio	67
4.1 Generalità e descrizione delle tipologie di edifici.....	68
4.1.1 Il sistema di refrigerazione alimentare nella GDO.....	69
4.1.2 Sistema HVAC nei retail della GDO	71

4.2	<i>Casi studio e workflow metodologico</i>	72
4.3	<i>Descrizione dei casi studio selezionati.....</i>	73
4.3.1	<i>Caso di studio “Conad Anagni”</i>	75
4.3.2	<i>Caso di studio “Conad Santa Maria degli Angeli, Assisi”</i>	80
4.3.3	<i>Caso di studio “Conad Roma”.....</i>	86
4.4	<i>Validazione dei modelli</i>	90
4.5	<i>Modellazione energetica dei casi di studio</i>	92
4.6	<i>Relazione tra analisi energetica dei casi studio e definizione degli scenari di riqualificazione</i>	104
5.	<i>Risultati</i>	106
5.1	<i>Interventi generali di riqualificazione energetica.....</i>	106
5.1.1	<i>Riqualificazione energetica e cambiamenti climatici</i>	112
5.1.2	<i>Limiti interpretativi degli scenari energetici futuri</i>	120
5.2	<i>Interventi sulla catena del freddo</i>	121
5.3	<i>Valorizzazione dell’uso dell’illuminazione naturale negli edifici della GDO</i>	127
	<i>Conclusioni e prospettive.....</i>	148
	<i>Bibliografia</i>	153

Indice delle figure

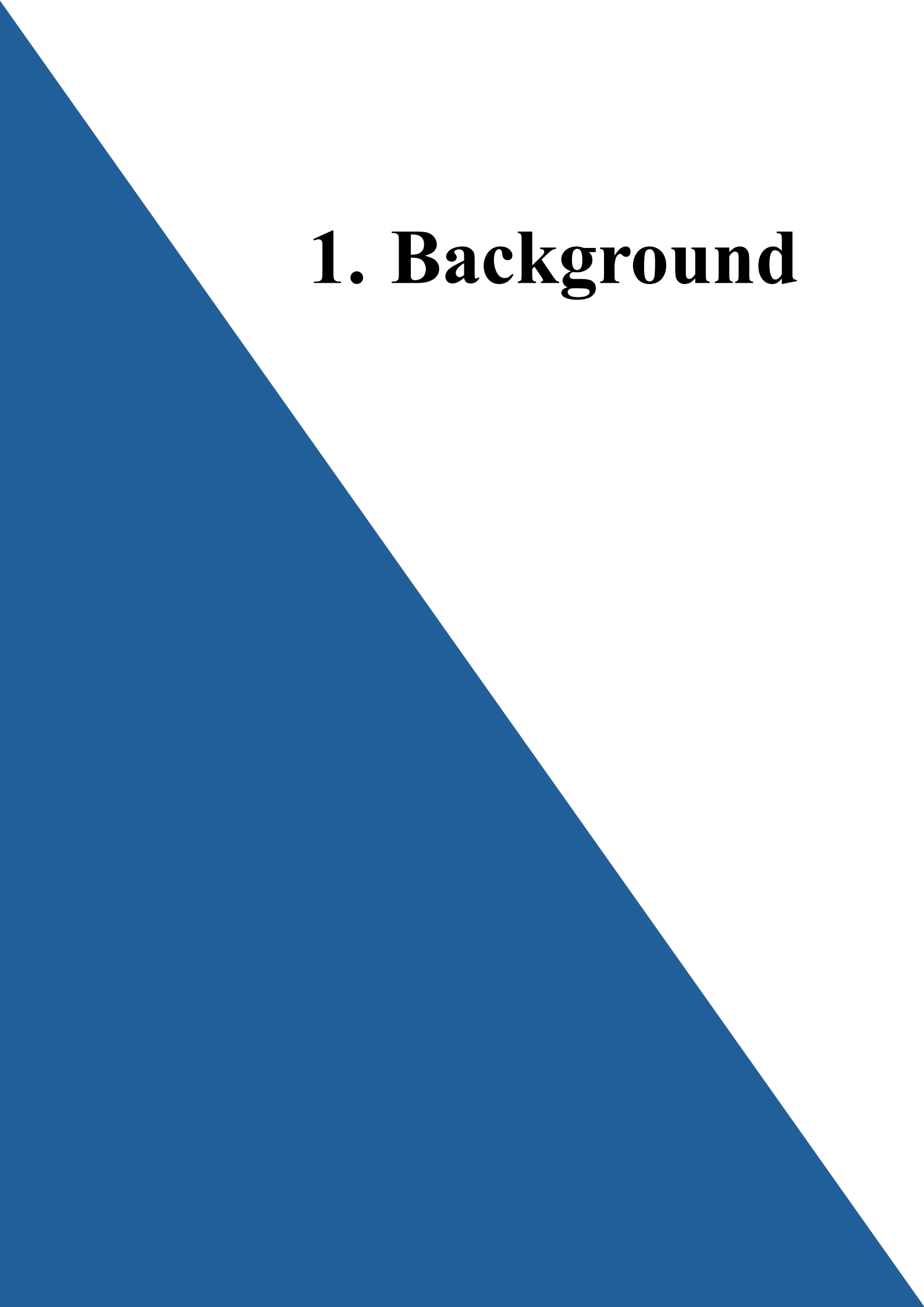
Figura 1. Sfide principali nei paesi europei per l'efficienza energetica [1].	13
Figura 2. Percentuale dei consumi energetici tipici in un edificio destinato a retail della GDO.	14
Figura 3. Workflow del metodo proposto.....	44
Figura 4. Distribuzione delle ore durante il periodo di riscaldamento (22 ottobre – 7 aprile) in vari intervalli di temperatura ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$) per l'anno 2022, 2050 e 2070.	55
Figura 5. Distribuzione delle ore durante il periodo di raffrescamento (non riscaldamento) (5 giugno – 5 settembre) in vari intervalli di temperatura ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$) per l'anno 2022, 2050 e 2070.	56
Figura 6. Distribuzione dei punti di vendita affiliati a PAC 2000A Conad nel territorio nazionale.....	67
Figura 7. A sinistra sistema di refrigerazione tradizionale per temperatura normale (TN), a destra sistema di refrigerazione tradizionale per bassa temperatura (BT).....	70
Figura 8. Sistema di refrigerazione a cascata, sopra temperatura normale (TN) e sotto bassa temperatura (BT).....	71
Figura 9. Identificazione del punto di vendita all'interno del territorio di Anagni.	76
Figura 10. Planimetria del punto di vendita con individuazione delle tre aree di lavoro principali.....	77
Figura 11. Identificazione del punto di vendita all'interno del territorio di Santa Maria degli Angeli, Assisi.	81
Figura 12. Planimetria del punto di vendita con individuazione delle tre aree di lavoro principali.....	82
Figura 13. Identificazione del punto di vendita all'interno della Città di Roma.	87
Figura 14. Planimetria del punto di vendita con individuazione delle tre aree di lavoro principali.....	88
Figura 15. Modelli BIM dei casi studio selezionati. a) caso studio di Anagni; b) caso studio di Santa Maria degli Angeli, Assisi; c) caso studio di Roma.	93
Figura 16. Modelli BEM dei casi studio selezionati. a) caso studio di Anagni; b) caso studio di Santa Maria degli Angeli, Assisi; c) caso studio di Roma.	101
Figura 17. Consumi energetici espressi in kWh/m^2 dei principali servizi energetici presenti: refrigerazione, HVAC, illuminazione e consumi generali (funzionamento casse, IT, ventilazione, ausiliari, movimentazione merci, ecc...) a) caso studio di Anagni; b) caso studio di Santa Maria degli Angeli, Assisi; c) caso studio di Roma.	102
Figura 18. Edificio del caso di studio: (a) vista assonometrica del modello BEM (il volume grigio è l'edificio del caso di studio, mentre i volumi rosa rappresentano le zone	

circostanti nel centro commerciale, adiacenti alla zona analizzata); (b) vista assonometrica delle zone termiche nel modello BEM e (c) vista aerea dell'edificio. ...	107
Figura 19. Percentuale di risparmio energetico e miglioramento delle prestazioni ambientali degli scenari proposti rispetto allo stato di fatto negli anni 2022, 2050 e 2070.	118
Figura 20. a) Vista assonometrica del modello BEM di c.1 (il volume grigio è l'edificio del caso di studio, mentre i volumi viola rappresentano le zone circostanti nel centro commerciale), b) vista aerea di c.1, c) vista assonometrica del modello BEM di c.2 e d) vista aerea di c.2.	122
Figura 21. Confronto delle emissioni in $\text{kgCO}_2/\text{m}^2 \times 100$ durante una giornata tipo della refrigerazione alimentare nei due casi studio.	126
Figura 22. Risultati di ciascuno scenario applicato a C.1.....	135
Figura 23. Risultati di ciascuno scenario applicato a C.2.....	136
Figura 24. Risultati di ciascuno scenario applicato a C.3.....	136
Figura 25. Confronto dei risultati degli scenari S.3, S.6, S.12, S.21, S.24 e S.27 applicati a C.1, C.2 e C.3.....	138
Figura 26. Confronto dei risultati degli scenari S.21, S.24 e S.27 applicati a gruppi diversi.	140
Figura 27 Confronto dei risultati degli scenari S.3, S.6, S.12, S.21, S.24 e S.27 applicati a C.1, C.2 e C.3 - 21 giugno alle 11:30.	142

Indice delle tabelle

Tabella 1. Caratteristiche dell'illuminazione secondo la normativa UNI EN 12464-1.	29
Tabella 2. Classi di efficienza dei sistemi di automazione degli edifici.	30
Tabella 3. Classi e fattori di efficienza BAC energia elettrica in edifici non residenziali.	30
Tabella 4. HDD e CDD nelle condizioni dell'anno in corso, 2050 e 2070.	54
Tabella 5. Elementi presenti in base al reparto.	68
Tabella 6. Fluidi refrigeranti più comuni per il funzionamento del sistema di refrigerazione alimentare dei retail della GDO.	69
Tabella 7. Fasi del workflow, informazioni acquisite nei casi studio e il loro uso nel modello e nelle analisi condotte.	73
Tabella 8. Impianti di climatizzazione presenti nella struttura.	78
Tabella 9. Impianti di produzione di acqua calda sanitaria.	79
Tabella 10. Impianti di climatizzazione presenti nella struttura.	83
Tabella 11. Impianti di produzione di acqua calda sanitaria.	84
Tabella 12. Impianti di refrigerazione.	85
Tabella 13. Impianti di climatizzazione presenti nella struttura.	89
Tabella 14. Impianti di produzione di acqua calda sanitaria.	90
Tabella 15. Impianti di refrigerazione.	90
Tabella 16. Caratteristiche funzionali dei casi studio.	94
Tabella 17. Consumi energetici dei casi studio.	95
Tabella 18. Caratteristiche degli impianti dei casi studio.	98
Tabella 19. Criticità e strategie prioritarie dei casi studio.	99
Tabella 20. Consumo mensile di elettricità: confronto tra i dati misurati dell'edificio e del modello energetico calibrato.	108
Tabella 21. Confronto dei consumi energetici: scenari attuali e post-intervento.	110
Tabella 22. Consumi energetici mensili (HVAC, refrigerazione e totale) negli anni 2022, 2050 e 2070.	113
Tabella 23. Confronto dei consumi energetici (elettrici) tra gli scenari di retrofit relativamente agli anni 2022, 2050 e 2070.	114
Tabella 24. Confronto tra le differenti categorie di consumi energetici tra lo stato di fatto e gli scenari C+D e A+C+D+E per gli anni 2022, 2050 e 2070: HVAC, illuminazione, refrigerazione e produzione di energia rinnovabile.	116
Tabella 25. Diversi sistemi HVAC nei casi studio selezionati.	124
Tabella 26. Caratteristiche dei banchi frigo presenti nel caso studio c.1.	124
Tabella 27. Caratteristiche dei banchi frigo presenti nel caso studio c.2.	125
Tabella 28. Confronto dei consumi elettrici della refrigerazione nei due casi studio.	126

Tabella 29. Principali caratteristiche dei casi studio.....	131
Tabella 30. Classificazione in gruppi dei casi di studio in base alle caratteristiche chiave.....	131
Tabella 31. Configurazioni degli scenari di ammodernamento e captazione della luce diurna proposti.....	134
Tabella 32. Matrice tecnica di valutazione degli interventi proposti sui retail della GDO.	150

A solid blue diagonal shape that starts from the top-left corner and extends towards the bottom-right corner, covering approximately the lower-left half of the slide.

1. Background

1. Background

1.1 Letteratura

Le attuali politiche ambientali ed energetiche europee sono guidate dal veloce cambiamento climatico e dall'esaurimento delle risorse naturali. La povertà energetica tende a essere più elevata nelle aree rurali, con il 7% della spesa destinata all'energia. Nonostante ciò, nelle aree rurali le politiche attuate hanno prodotto risultati migliori rispetto alle grandi città considerando l'efficienza energetica degli edifici. Nel complesso, circa 48 milioni di europei hanno difficoltà, in ragione del costo dell'energia, a mantenere i propri edifici a temperature adeguate durante l'intero anno [1]. Ogni paese europeo, però, deve affrontare sfide diverse come illustrato in figura 1 per ottenere tutti lo stesso traguardo. La grande sfida che oggi impegna il mondo della scienza, quello della politica e la società civile è limitare il riscaldamento globale. L'accordo di Parigi [2] mira a contenere l'aumento della temperatura globale a 1.5 °C entro il 2050, rispetto ai livelli del 1990. Secondo tale accordo, gli edifici non residenziali devono migliorare le loro prestazioni del 16% entro il 2030 e del 26% entro il 2033; a tal fine, ogni Paese ha stabilito obiettivi specifici per la riduzione delle emissioni di carbonio. In particolare, l'Unione Europea (EU), con l'European Green Deal [3], si prefigge di raggiungere la neutralità del carbonio entro il 2050 e di ridurre le proprie emissioni di gas a effetto serra (GHG) del 55% entro il 2030. Il raggiungimento della suddetta neutralità e della sostenibilità climatica richiede la transizione verso l'efficienza energetica e, quindi, l'uso di sistemi energetici basati su fonti decarbonizzate. Pertanto, la riconversione del modello energetico in chiave sostenibile è propedeutica ad un cambiamento dalle fonti energetiche ad alta intensità di carbonio, cioè i combustibili fossili, alle alternative ecologiche, rinnovabili e sostenibili. Per concretizzare gli obiettivi proposti, l'European Green Deal ha stabilito tra i principi chiave per ridurre le emissioni di gas a effetto serra e migliorare la qualità della vita dei cittadini la priorità dell'efficienza energetica, migliorando le prestazioni energetiche degli edifici e sviluppando un settore energetico basato sulle fonti rinnovabili [3].

Gli edifici assumono, dunque, un ruolo chiave nel raggiungimento di questo obiettivo, in quanto presentano un notevole potenziale per la riduzione delle emissioni a costi contenuti. Il consumo degli edifici rappresenta oltre un terzo di tutta l'energia usata a livello mondiale, e di conseguenza, gli stessi sono responsabili di circa un terzo delle emissioni globali di carbonio. In Europa gli edifici presentano un fabbisogno energetico medio di 200 kWh/m² per le abitazioni e quasi 300 kWh/m² per gli edifici non residenziali. Globalmente, il settore edile in Europa è responsabile di circa il 34% della domanda finale di energia e contribuisce per il 37% alle emissioni globali di CO₂ [4]. Nel

complesso, gli edifici sono il principale comparto di consumo finale di energia con oltre il 40% del totale [5]. Confrontando i consumi con i fabbisogni di energia ottenuti attraverso l'applicazione del Life Cycle Assessment (LCA), risulta evidente che la maggior parte della domanda di energia deriva sia da una progettazione non ottimale, sia da inefficienti modalità di gestione e controllo dei sistemi edificio-impianto.

In questo contesto, la riqualificazione energetica ed ambientale degli edifici esistenti è un tema centrale e di notevole interesse tecnico, economico e sociale, oltre che essere, ad oggi, una necessità sia in termini ambientali sia in termini economici per gli imprenditori. La maggior parte del patrimonio immobiliare ad oggi in uso sta invecchiando inesorabilmente e di questi la maggior parte sono stati progettati trascurando l'analisi e la valutazione ex ante del loro impatto energetico ed ambientale. Ad oggi l'input più veloce che si ha per migliorare energeticamente gli edifici esistenti è l'impiego di energia prodotta da fonti rinnovabili.

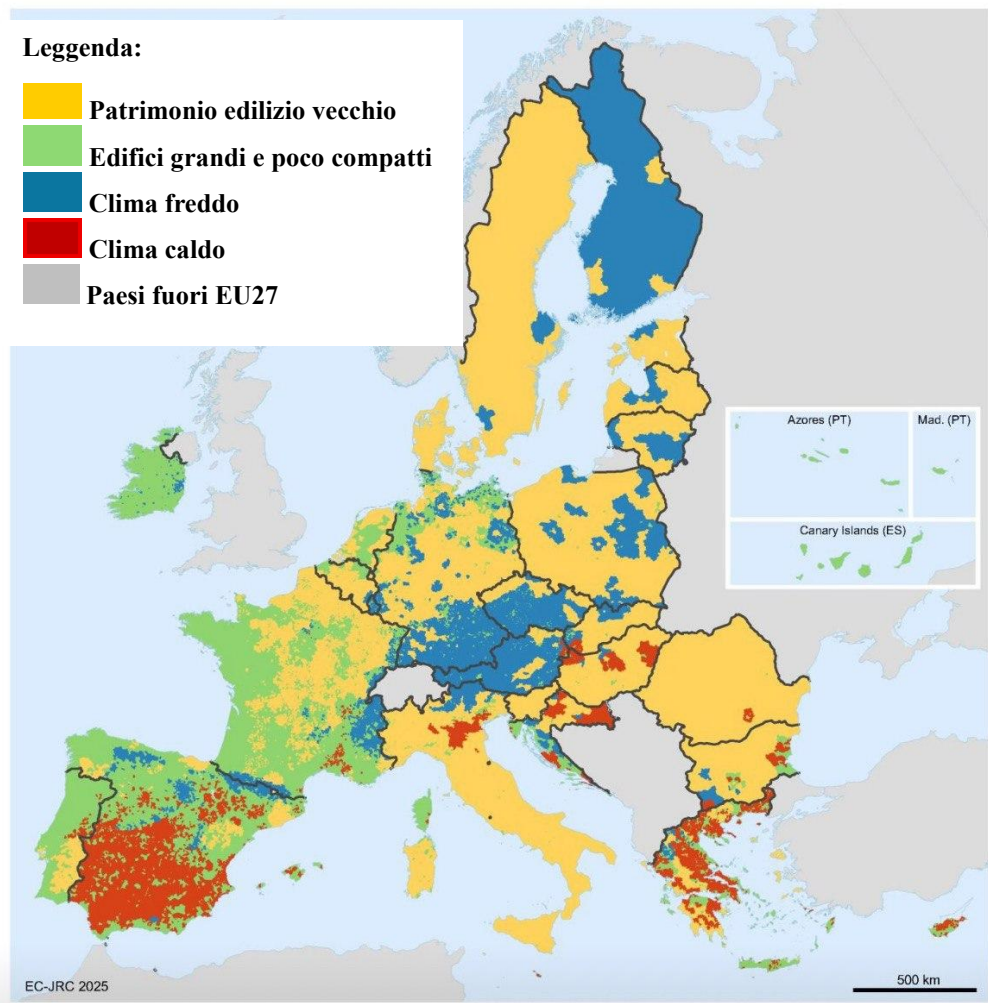


Figura 1. Sfide principali nei paesi europei per l'efficienza energetica [1].

Nel presente scenario, il settore del commercio a dettaglio della Grande Distribuzione Organizzata (GDO) è tra quelli con il più alto uso di energia e con la più alta intensità di carbonio, soprattutto considerando le sue emissioni durante la fase operativa e quindi durante la fase d'uso dell'edificio.

Infatti, per questa tipologia di edifici il consumo energetico operativo rappresenta circa il 90% del totale dell'energia incorporata e del Global Warming Potential (GWP) [6].

I retail della GDO sono responsabili di circa il 4% del consumo di energia in Europa [7]. Se si considera l'impiego di energia per unità di superficie, i retail della GDO si classificano come la tipologia di edifici con la più alta intensità energetica [8]. I retail dell'industria alimentare registrano consumi energetici particolarmente elevati, necessari per garantire la refrigerazione continua degli alimenti durante tutto l'anno.

Infatti, come illustrato in figura 2, la refrigerazione nei retail della GDO varia dal 30% fino al 60% del consumo energetico finale, mentre l'illuminazione dal 20% al 30% circa. Infine, consumi legati alla ventilazione e ai processi secondari circa il 10% del totale [9]-[10].

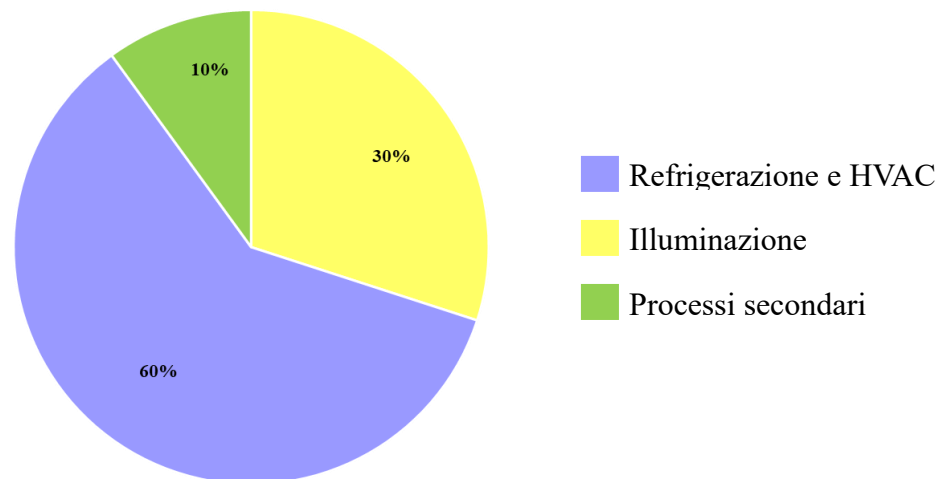


Figura 2. Percentuale dei consumi energetici tipici in un edificio destinato a retail della GDO.

La maggior parte dell'energia utilizzata in questa tipologia di edifici è l'energia elettrica; infatti, quest'ultima rappresenta circa il 95% dei consumi [11]. Questo è dovuto anche al fatto che ad oggi i retail della GDO stanno tendenzialmente svolgendo tutti il processo di conversione dei propri macchinari alla sola energia elettrica. In conformità a quanto sopra indicato, il maggior uso di energia è dovuto alla refrigerazione (comprese le basse e medie temperature) e al condizionamento degli ambienti, cioè circa il 30% dell'energia finale fino al 60%. In particolare, circa la metà di quest'ultima è destinata al funzionamento dei compressori delle macchine frigorifere [12]. Il secondo maggiore contribuente al consumo energetico è l'illuminazione (circa il 30%) e il resto viene

consumato da processi secondari, ad esempio la panificazione, la preparazione degli alimenti e le altre utenze [10].

1.2 La refrigerazione nei retail della GDO

La refrigerazione commerciale, ossia la refrigerazione alimentare al dettaglio, è costituita da apparecchiature che permettono la corretta conservazione degli alimenti e permettono la presentazione di quest'ultimi ai clienti. Più nel dettaglio, le attrezzature utilizzate in questi negozi possono essere raggruppate in macchine per la refrigerazione, frigoriferi con display, frigoriferi di stoccaggio e banchi per la lavorazione dei prodotti [13]. Inoltre, i frigoriferi possono essere dotati di porte vetrate a battente che ne permettono la chiusura o frigoriferi aperti. Infine, altre classificazioni si basano sul refrigerante utilizzato e sulla temperatura. Generalmente, sono presenti due livelli di temperatura: le apparecchiature di refrigerazione a media temperatura mantengono le temperature del prodotto al di sopra del punto di congelamento (range 1-14°C), mentre le apparecchiature di refrigerazione a bassa temperatura mantengono queste ultime al di sotto del punto di congelamento (range dai -12°C ai -18°C).

Circa il 50% dei prodotti venduti nei supermercati richiedono una conservazione a basse temperature per ridurre il deperimento [13]. Questo implica che all'interno dei retail alimentari ci siano zone di stoccaggio degli alimenti refrigerati e queste sono situate nel retro della zona commerciale, mentre i sistemi di refrigerazione (compressori e condensatori) si trovano in genere al di fuori della zona commerciale (nelle sale macchine o sul tetto). In virtù del loro scopo primario, garantire la sicurezza e la corretta commercializzazione dei prodotti alimentari, i sistemi di refrigerazione sono generalmente funzionanti 24 ore su 24. I sistemi di refrigerazione possono essere classificati in: singolo (con un singolo compressore collegato a uno o più carichi evaporatori), a compressore parallelo, a ciclo, distribuito e a refrigerante secondario. I primi due sono considerati i sistemi convenzionali e più comuni. Il sistema tradizionale è un sistema diretto (DX) in cui il liquido refrigerante circola dall'unità di refrigerazione fino agli armadi di stoccaggio e di esposizione dove completa il ciclo, cioè, evapora e assorbe il calore.

Le attività di ricerca, nel campo della refrigerazione alimentare, fino ad ora hanno interessato in modo significativo l'implementazione dei refrigeranti naturali come alternativa più sostenibile ai refrigeranti sintetici più tradizionali [14]. Inoltre, i principali interventi messi in atto dall'industria alimentare per migliorare il rendimento energetico delle macchine frigorifere sono:

- chiusura dei frigoriferi da esposizione con porte vetrate a battente;
- creazione di aree separate per la collocazione dei frigoriferi da esposizione e stoccaggio;

- uso di cicli a cascata indiretti e la tecnica del sub-raffreddamento;
- uso di condensatori evaporativi;
- recupero di calore dalla fase di condensazione nel ciclo di refrigerazione.

Nello specifico, le soluzioni che riguardano la refrigerazione dimostrano che una strategia efficace per ridurre il fabbisogno energetico di refrigerazione nei negozi al dettaglio di prodotti alimentari è l'uso di banchi frigo chiusi con porte in vetro nell'area di vendita. Si osserva che questi sistemi garantiscono un notevole risparmio energetico rispetto ai tradizionali ai banchi frigo aperti, senza compromettere la disponibilità all'acquisto dei consumatori, che è la principale preoccupazione dei rivenditori. Per quanto riguarda la macchina e il processo di refrigerazione, il layout con la più alta efficienza energetica rispetto alle soluzioni tradizionali ha dimostrato di essere il tipico layout a cascata che utilizza refrigeranti naturali, ad esempio ammoniaca e CO₂. La tecnologia di refrigerazione transcritica con booster di CO₂ sembra essere la più matura e ha dimostrato di essere efficiente soprattutto con il multieiettore e/o il sottoraffreddamento meccanico, anche se combinata con sistemi azionati dall'energia solare (soprattutto in contesti con elevata disponibilità di radiazione solare). Inoltre, questi sistemi possono garantire ulteriori risparmi in termini di energia, emissioni di gas serra e costi operativi se abbinati alla trigenerazione – soprattutto in relazione alle esigenze di riscaldamento e acqua calda. Attualmente, infatti, l'integrazione più efficace con le fonti energetiche rinnovabili è l'impiego di sistemi CHP o CCHP con fonti diverse, tra cui pannelli fotovoltaici e biomasse, sia in termini di miglioramento delle prestazioni di refrigerazione che di condizionamento dell'aria. Sebbene siano state condotte numerose ricerche per ridurre le emissioni dirette e indirette di gas serra degli impianti di refrigerazione, ciò non è ancora sufficiente a ridurre il cambiamento climatico a condizioni accettabili. La necessità sta nell'integrare tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico e refrigeranti con un impatto ambientale inferiore, oltre al risparmio sui costi attraverso incentivi fiscali.

La letteratura fa emergere che il Regno Unito è il paese più attivo nel campo di ricerca dell'efficientamento energetico dei retail della GDO, mentre a seguire si hanno Cina, Italia e Svezia che forniscono contributi rilevanti al progresso delle tecnologie di efficienza energetica nel settore del commercio al dettaglio alimentare. Inoltre, tra tutti, gli studi italiani e svedesi sono quelli che mostrano maggiore regolarità nel corso degli anni. Tuttavia, le soluzioni e gli studi che maggiormente diffusi e approfonditi si concentrano principalmente sul settore della refrigerazione – ciò è prevedibile poiché è dimostrato che la refrigerazione è il principale fattore che contribuisce al consumo energetico nel settore del commercio al dettaglio di prodotti alimentari. Inoltre, la maggior parte delle soluzioni ad oggi presenti riguarda lo sviluppo di configurazioni e configurazioni migliorate di sistemi di refrigerazione che utilizzano refrigeranti naturali

(principalmente CO₂, che ha un GWP eccezionalmente inferiore rispetto ai refrigeranti tradizionalmente utilizzati). Questi sistemi basati su refrigeranti naturali avevano inizialmente prestazioni energetiche inferiori rispetto a quelli tradizionali, ma i ricercatori stanno sviluppando tecnologie sempre più efficienti per sostituirli definitivamente – permangono sfide soprattutto nei climi dominati dal raffreddamento.

Unitamente alla catena del freddo alimentare, HVAC e sistemi di illuminazione sono di rilevanza primaria per gli edifici adibiti a retail alimentari; sono, infatti, essenziali per rendere gli spazi di vendita ambienti confortevoli e i prodotti più appetibili ai clienti. L'illuminazione è tra i più importanti sistemi energetici per scopi di marketing e strategie di vendita. È stato dimostrato che un'illuminazione efficace aumenta la soddisfazione degli acquirenti e li incoraggia a trascorrere più tempo in negozio [15, 16]. In generale, quando l'ambiente è confortevole, maggiori sono le possibilità di acquisto dei clienti che trascorreranno più tempo al suo interno [17]. Pertanto, il comfort interno nei punti di vendita al dettaglio non può essere trascurato e deve essere bilanciato con il consumo energetico associato. A questo scopo, nei supermercati, il sistema HVAC pone complesse sfide progettuali e operative dovute alle condizioni uniche e diverse da gestire [10]. Nondimeno, il consumo di energia dovuto al condizionamento dell'aria è generalmente minore rispetto all'illuminazione e alla refrigerazione [8].

Il sistema di illuminazione, che rappresenta all'incirca il 30% del totale dell'uso di energia elettrica, comprende generalmente l'illuminazione artificiale dei banchi frigo, degli scaffali e degli ambienti.

Per quanto concerne la riduzione dei consumi per la climatizzazione estiva ed invernale, i principali interventi che vengono attualmente implementati per migliorare la performance energetica in questo settore sono:

- interventi sull'involucro dell'edificio (quali, coibentazione delle pareti opache, sostituzione delle pareti finestrate, progettazione verde, ecc.);
- integrazione di pannelli fotovoltaici (PV);
- controllo e regolazione ottimali (quali, Konnex, IoT, ecc.);
- recupero del calore di scarto dalla catena del freddo alimentare;
- integrazione di sistemi di refrigerazione e condizionamento d'aria.

In riferimento ai consumi energetici del sistema dell'illuminazione, i principali interventi che vengono attuati per migliorare il rendimento energetico nei supermercati sono:

- interventi sull'involucro dell'edificio (quali, sistemi di ombreggiatura, facciate inclinate, vetro selettivo, ecc.);
- integrazione dei pannelli fotovoltaici (PV);
- sostituzione delle lampade tradizionali con LED;
- sistemi di controllo dell'illuminazione naturale;

- sistemi automatici per il controllo e la regolazione del flusso luminoso;
- integrazione di LED COB (Chip On Board: utilizzo di pannelli che presentano un unico circuito e due semplici contatti in tutto il chip) e DALI (Digital Addressable Lighting Interface: raggruppa le sorgenti luminose e le controlla contemporaneamente, oppure ne isola alcune dal resto del sistema) con IoT.

I retail alimentari potrebbero ottenere un risparmio energetico pari a circa il 50% con conseguente riduzione delle emissioni di CO₂ - sostituendo e implementando le tecnologie per la produzione, la trasformazione, l'imballaggio, il trasporto e il consumo degli alimenti [10]. Tuttavia, attualmente l'integrazione di tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico e sostenibili nel settore del commercio al dettaglio alimentare è soggetta a due vincoli principali: il vincolo economico, ossia l'aumento dei costi energetici e gli incentivi fiscali associati, e il vincolo normativo, vale a dire normative più rigorose sull'uso di refrigeranti a base di idrofluorocarburi (HFC), rivolgendosi ad altre alternative naturali ai refrigeranti [18]. Nello specifico, l'industria alimentare ha come obiettivo principale quello di mantenere i costi energetici più bassi attraverso le soluzioni più economiche [19, 20]. In effetti, le attuali tecnologie e strategie progettate potrebbero fornire benefici ambientali ed economici a lungo termine nel migliorare la prestazione energetica dei sistemi di costruzione-impianto, ma richiedono significativi costi di investimento iniziale [20].

1.3 Sistemi di monitoraggio e gestione dei flussi energetici

Le misure e le iniziative per risparmiare energia nel commercio al dettaglio sono, generalmente, innescate dalla preoccupazione dei rivenditori per gli alti costi energetici. Infatti, il potenziamento delle prestazioni energetiche e della conoscenza dei processi energetici all'interno del negozio si traducono in costi inferiori, minore impronta di carbonio, maggiore resilienza contro potenziali ulteriori aumenti dei prezzi dell'energia e migliori prestazioni aziendali [8]. In questa prospettiva, nella scelta delle potenziali strategie di efficienza energetica da attuare, gli imprenditori prestano particolare attenzione al rapporto tra il beneficio dell'intervento e il tempo di recupero dell'investimento. Inoltre, l'industria della GDO è caratterizzata da diversi attori con priorità generalmente differenti. Infatti, mentre gli imprenditori hanno l'obiettivo di diminuire i costi energetici, i lavoratori danno priorità alle attività organizzative rispetto a quelle legate all'energia che non sono considerate tra le loro responsabilità primarie [21], anche se questo aspetto è leggermente cambiato in conseguenza della recente crisi energetica.

L'attuale situazione nei retail della GDO presenta particolarmente alcune carenze nei livelli di gestione, manutenzione e controllo dei sistemi impiantistici. Infatti, non si trova riscontro nell'uso di sistemi di monitoraggio ed acquisizione dei dati in continuo connessi

a sistemi digitali come BIM integrati ai Digital Twin (DT) che consentono una valutazione efficace dei consumi, del comportamento energetico del sistema edificio-impianto e dell'impatto ambientale in tempo reale. L'installazione di un sistema di monitoraggio energetico nel supermercato consente di controllare e discernere le diverse richieste energetiche e di individuare eventuali guasti e/o possibilità di miglioramento. Altresì, è stato dimostrato che l'implementazione di un sistema di gestione dell'energia migliora la domanda energetica complessiva e riduce i costi energetici, aumenta l'affidabilità attraverso l'integrazione delle risorse energetiche distribuite e riduce le emissioni di gas serra, indipendentemente dalle altre strategie implementate. Parallelamente, gli utenti tendenzialmente assumono tendenzialmente comportamenti energetici consapevoli, in particolare i dipendenti con specifica formazione potrebbero essere utili per ottimizzare il risparmio energetico dell'edificio. Eppure, è stato dimostrato che questo problema viene di frequente subordinato ad altre priorità organizzative. Al fine di realizzare negozi al dettaglio di prodotti alimentari realmente efficienti dal punto di vista energetico, questo aspetto dovrebbe essere ulteriormente affrontato e migliorato, coinvolgendo anche i consumatori nelle tecnologie pulite.

1.4 Gli interventi più diffusi sugli edifici esistenti

Gli edifici destinati al commercio alimentare rappresentano una piccola percentuale del parco immobiliare in Europa. Il miglioramento della loro efficienza energetica ha un grande potenziale per contribuire alla decarbonizzazione del settore e alla transizione energetica.

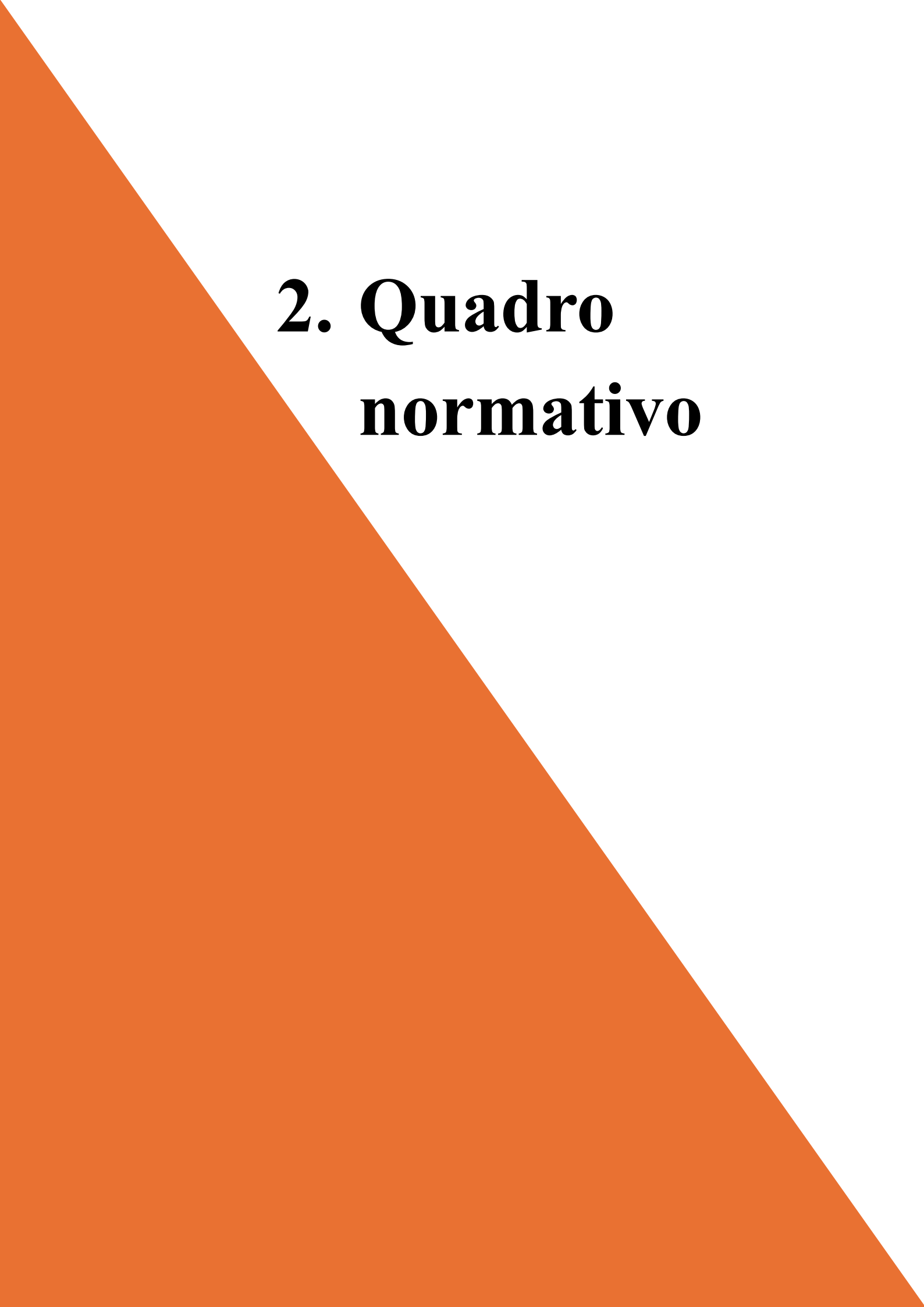
Per i motivi precedentemente esposti le soluzioni ad oggi adottate in relazione all'efficienza energetica e alla riduzione delle emissioni operative negli edifici del commercio al dettaglio alimentare sono ridotte rispetto al numero di soluzioni che messe in atto su altre tipologie edilizie residenziali e commerciali più comuni. Per quanto concerne l'evoluzione temporale, rileva che si ha un progressivo aumento sia dell'interesse da parte degli imprenditori che degli studi presenti in letteratura – soprattutto a partire dal 2012. In effetti, la tipologia edilizia dei negozi di vendita al dettaglio di prodotti alimentari è estremamente specifica e più rada rispetto ad altri edifici commerciali o residenziali. Tuttavia, l'impatto di questi edifici sta acquisendo rilevanza nel panorama della transizione energetica e alla decarbonizzazione del settore.

Nel complesso, le tecnologie chiave che ad oggi vengono adottate principalmente nelle riqualificazioni energetiche ed ambientali negli edifici adibiti a retail della GDO sono le seguenti:

- sostituzione delle tradizionali vetrine refrigerate aperte con vetrine refrigerate chiuse dotate di ante in vetro nell'area di vendita. Ciò, però, entra in conflitto

con i pensieri dei rivenditori che considerano questo un potenziale intralcio influenzando negativamente l'acquisto dei consumatori;

- la disposizione a cascata utilizzando refrigeranti naturali, ad esempio ammoniaca e CO₂, e, in particolare, la tecnologia di refrigerazione transcritica con booster di CO₂, in particolare con il multi-eiettore e/o il sottoraffreddamento meccanico, anche se combinato con sistemi azionati dall'energia solare – ma il livello tecnologico non è ancora sufficiente a ridurre il cambiamento climatico a una condizione accettabile;
- uso di sistemi CHP o CCHP con fonti diverse, tra cui pannelli fotovoltaici e biomasse, come fonti di energia rinnovabile;
- recupero di calore dal ciclo di refrigerazione da utilizzare nell'impianto di climatizzazione e di acqua calda sanitaria, soprattutto se si ottimizzano il flusso di massa e il livello di pressione;
- sostituzione dell'attuale sistema di illuminazione meno efficiente con le nuove tecnologie di illuminazione riconosciute, vale a dire Lampade a LED;
- integrazione ottimale dell'illuminazione diurna e artificiale attraverso l'implementazione di sistemi automatici di gestione e controllo dell'illuminazione;
- sistema di monitoraggio energetico o, ancor più, il sistema di gestione energetica per controllare e discernere le diverse richieste energetiche e identificare eventuali guasti e/o possibilità di miglioramento;
- comportamento energetico consapevole degli utenti, in particolare dei dipendenti con particolari accorgimenti organizzativi.

A large orange triangle pointing from the top-left corner towards the bottom-right corner, covering the left half of the slide.

2. Quadro normativo

2. Quadro normativo

In conseguenza delle dinamiche associate al cambiamento climatico, si rileva una crescente esigenza di sviluppare e implementare metodologie alternative per la produzione, la conversione e l'impiego dell'energia, orientate alla sostenibilità ambientale e alla riduzione delle emissioni climalteranti.

Nuove tecnologie e nuovi stili di vita determinano un aumento dei consumi che deve essere adeguatamente supportato da una produzione di energia alternativa.

Il sistema ambientale risulta progressivamente incapace di far fronte all'aumento dei consumi, rendendo imprescindibile l'adozione e l'implementazione di strategie orientate alla sostenibilità.

A seguito della Rivoluzione industriale e con la nascita di fabbriche e città alimentate da combustibili fossili, le emissioni di CO₂ hanno determinato un cambiamento del pianeta non più trascurabile. L'industrializzazione ha reso possibile uno stile di vita migliore e livelli di comfort più elevati, ma l'uso di energia non rinnovabile ha provocato un aumentato esponenzialmente dell'inquinamento, che riflette, drammaticamente in quadro attuale. All'evidenza dei cambiamenti ambientali, nel 1987 la Commissione Mondiale sull'Ambiente e Sviluppo redasse il Rapporto Brundtland intitolato "il futuro di "tutti noi" in cui viene utilizzato per la prima volta il concetto di "sviluppo sostenibile" e si intende da seguito alla riduzione dello sfruttamento dell'ambiente oltre i suoi limiti.

La ricerca sulle metodologie e pratiche per lo sviluppo sostenibile è culminata nel 1992 con la creazione di un metodo sistematico di analisi per la quantificazione degli impatti ambientali del singolo prodotto durante il suo intero ciclo di vita. Il metodo in oggetto, denominato Analisi del Ciclo di Vita (LCA), valuta gli impatti partendo dalla produzione del prodotto, considerando il suo utilizzo e fino allo smaltimento.

Nel settore edile non è sufficiente la mitigazione degli impatti emissivi e la sostenibilità nella produzione dei materiali che compongono l'edificio. Infatti, in questo settore la riduzione delle emissioni operative deve incidere sull'insieme dei processi che lo compongono, a partire dall'estrazione della materia prima sino alla dismissione del materiale, con particolare attenzione alla fase di gestione.

Nel settore delle costruzioni, la fase d'uso registra il maggiore impatto sulle emissioni e quindi sulla pianificazione garantendo che il fabbisogno energetico sia soddisfatto attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili.

2.1 Le direttive dell'Unione Europea

Il presente capitolo introduce le normative europee e nazionali in materia di riduzione delle emissioni operative e riduzione del consumo energetico nel settore dell'edilizia dei retail alimentari della GDO.

Con il Protocollo di Kyoto del 1997 [22], al quale hanno aderito più di 180 paesi, si è formalizzata la necessità di ridurre le emissioni di gas serra.

Successivamente, nel 2002, il Parlamento europeo e il Consiglio europeo hanno adottato la direttiva 2002/91/CE [23], nota come EPBD (Direttiva prestazioni energetiche degli edifici), in ottemperanza al Protocollo di Kyoto. Con questa direttiva gli Stati membri hanno segnato il passo decisivo verso una riduzione delle emissioni di gas serra anche nel settore edile. L'Unione europea stabilisce requisiti minimi di prestazione energetica sia per i nuovi edifici che per gli edifici sottoposti a significativi lavori di ristrutturazione. Tale direttiva introduce il certificato energetico in cui si dichiarano e si attestano le prestazioni energetiche degli edifici.

Con la citata direttiva è stato definito un quadro generale per la metodologia per il calcolo della prestazione energetica integrata degli edifici.

Il metodo di calcolo deve tenere conto dell'isolamento, delle caratteristiche tecniche e caratteristiche e di installazione, progettazione e degli aspetti climatici, dell'esposizione al sole e l'influenza delle strutture adiacenti, l'esistenza dei sistemi di trasformazione energetica propri e di altri fattori, compreso il clima interno, che influiscono sul fabbisogno energetico.

Con la direttiva 2002/91/CE [23] il Consiglio europeo ha regolamentato le ispezioni periodiche degli impianti di riscaldamento negli edifici con caldaie superiori a 20 kW e impianti di climatizzazione superiori a 12 kW.

Dal 9 luglio 2010, la Direttiva Europea 2010/31/UE [24] sull'energia ha permesso l'entrata in vigore delle prestazioni degli edifici, aggiornando la direttiva 2002/91/UE [23]. La direttiva richiedeva di aumentare l'efficienza energetica del 20% rispetto al 1990 entro il 2020. Si è dimostrata, inoltre, pioniera di una significativa evoluzione con l'introduzione del concetto di edifici NZEB, ossia di edifici con consumo di energia quasi zero.

Con gli edifici NZEB, l'obiettivo è garantire il fabbisogno energetico di un edificio quanto più vicino allo zero e sviluppare una progettazione che prevede il maggiore utilizzo dell'energia autoprodotta. A tal fine, è necessario garantire il massimo impiego di energia prodotta da fonti rinnovabili, ma soprattutto diminuire i consumi cagionati dalle dispersioni e dalla cattiva gestione.

La direttiva ha previsto che tutti gli Stati membri dovessero garantire che i nuovi edifici fossero Edifici NZEB entro il 31 dicembre 2020, anticipando il termine al 31 dicembre 2018 per le nuove costruzioni e per tutti quelli di proprietà di enti pubblici. Inoltre, viene

richiesta la necessità di un certificato di prestazione energetica che includa i valori di riferimento quali requisiti minimi di prestazione energetica per consentire ai proprietari o agli inquilini dell'edificio o dell'unità edilizia di valutare e confrontare le prestazioni energetiche.

Gli Stati membri garantiscono che vi sia l'obbligo di rilasciare il certificato di prestazione energetica per gli edifici di nuova costruzione, da vendere o affittare a un nuovo locatario, e per gli edifici in cui la superficie utile totale sia superiore a 500 m² per gli enti pubblici o adibiti ad uso pubblico.

Nel 2012, tutte le direttive precedenti vengono abolite con la Direttiva 2012/27/UE [25] sull'efficienza energetica. Tale norma stabilisce un quadro comune per la promozione dell'efficienza energetica per perseguire l'obiettivo di ridurre del 20% l'energia i consumi di energia primaria entro il 2020. Con questo passo, l'Unione Europea stabilisce norme per rimuovere le barriere nel mercato energetico e prevedere la definizione di obiettivi nazionali indicativi di efficienza energetica per il 2020.

Il 29 luglio 2016 la Commissione Europea ha emesso la Raccomandazione 2016/1318/CE [26]. Ciò ha lo scopo di promuovere gli edifici e le pratiche NZEB per garantire che, entro il 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione abbiano un consumo energetico prossimo allo zero. Con i termini "quasi" o "molto basso", la Commissione europea vuole differenziare gli edifici NZEB in base all'impatto delle condizioni climatiche sulle esigenze di riscaldamento e raffreddamento. Le definizioni degli edifici NZEB mira ad un bilancio energetico pressoché neutro.

Il 30 maggio 2018 la Direttiva 2018/844/CE [27] modifica la direttiva 2010/31/UE [28] sulla prestazione energetica negli edifici e la direttiva 2012/27/UE [25] sull'efficienza energetica e introduce un articolo sulla strategia di ristrutturazione a lungo termine secondo cui: "Ciascuno Stato membro stabilisce una strategia a lungo termine per sostenere la ristrutturazione del parco nazionale degli edifici residenziali e non residenziali, sia pubblico che privato, per ottenere un parco immobiliare decarbonizzato ed efficiente dal punto di vista energetico entro il 2050, facilitando la trasformazione economicamente vantaggiosa degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero. Nella strategia di ristrutturazione a lungo termine, ciascuno Stato membro definisce una tabella di marcia con misure e indicatori misurabili dei progressi stabiliti a livello nazionale in vista del lungo termine con obiettivo entro il 2050 di ridurre le emissioni di gas serra nell'Unione Europea dell' 80-95% rispetto al 1990, al fine di garantire un'efficienza energetica nazionale e un patrimonio edilizio decarbonizzato e facilitare la trasformazione economicamente vantaggiosa di edifici esistenti in edifici a energia quasi zero.

La tabella di marcia fissata da ogni Stato membro deve includere traguardi indicativi per il 2030, 2040 e 2050 e specificano in che modo si contribuisce all'efficienza

energetica nel quadro degli obiettivi fissati dall'Unione Europea in conformità alla Direttiva 2012/27/UE [25].

Inoltre, la Direttiva 2018/844/CE [27] consolida la componente finanziaria e promuove investimenti privati per il recupero del patrimonio edilizio esistente con misure che tendono a favorire la concessione di mutui ipotecari finalizzati all'efficienza energetica per ristrutturazioni edilizie la cui efficienza energetica è certificata.

Inoltre, si introduce la definizione dell'indicatore della predisposizione e cioè valutare la capacità di un edificio o di un'unità edilizia di adattare il proprio funzionamento alle esigenze dell'occupante e della rete e migliorarne l'efficienza energetica e le prestazioni complessive. L'indicatore tiene conto delle caratteristiche dell'edificio per avere maggiore risparmio energetico, il benchmarking e flessibilità, nonché la funzionalità e la capacità a migliorare attraverso dispositivi interconnessi e intelligenti.

Alla fine del 2019, la Commissione Europea propone il "Green Deal" [3] che mira a ridurre le emissioni di CO₂ del 55%.

Il 14 luglio 2021 la Commissione Europea ha approvato il pacchetto "Fit for 55" [29], noto anche come "Green Package". Con questo pacchetto si cambia radicalmente il modo in cui l'energia viene utilizzata. Infatti, vengono proposte modifiche alla legislazione vigente e si introducono nuove proposte. La modifica alla direttiva sull'efficienza energetica ribadisce il principio secondo cui l'efficienza energetica dovrebbe essere la prima priorità e richiede agli Stati membri di ridurre il consumo di energia primaria del 39% rispetto al 1990. Stabilisce che gli edifici per i quali vengono usati i fondi del piano di recupero devono necessariamente prevedere un efficientamento energetico e quindi sono obbligati a raggiungere l'efficienza energetica.

La revisione della direttiva sulle energie rinnovabili prevede un aumento dell'obiettivo del contributo di queste fonti al mix energetico dal 32 al 40% per il 2030.

La revisione del sistema di scambio delle quote di emissione (ETS) si basa sul principio della limitazione delle emissioni per i circa 10,000 impianti coperti dal sistema. Ogni anno il tetto complessivo delle emissioni viene progressivamente ridotto, in modo da favorire la diminuzione complessiva dei gas serra. Gli impianti che emettono meno del proprio limite possono vendere le quote di emissione in eccesso, mentre quelli che superano il limite devono acquistare quote aggiuntive sul mercato.

2.2 Le normative per gli impianti HVAC

In ambito ingegneristico-impiantistico le tematiche di efficientamento energetico trovano sviluppo maggiormente nelle strategie di razionalizzazione dei consumi di energia e nella riduzione degli sprechi. Tale concetto, in ambito termotecnico, si traduce nel progettare in modo efficiente gli edifici e gli impianti associati, poiché in Italia il fabbisogno di energia del settore civile rappresenta oltre il 40% del totale del consumo

energetico nazionale [5] e di questo il 4% è dovuto al settore dei retail della GDO [7]. La necessità di ridimensionare le problematiche ambientali migliorando le prestazioni energetiche degli edifici ha spinto la comunità nazionale ed internazionale verso l'adozione di nuove direttive con maggiore riguardo alle singole componenti dell'edificio e nello specifico all'impianto HVAC.

Con il D.P.R. 26 agosto 1993, n.412 “Regolamento in attuazione della legge n.10” [30], si redige una prima normativa italiana recante le norme per la progettazione, l'installazione, la manutenzione e l'esercizio degli impianti HVAC degli edifici. Infatti, il suddetto decreto ha introdotto il concetto delle varie fasce climatiche e dei “Gradi Giorno” (GG) al fine di suddividere il paese nelle diverse zone climatiche. Nello specifico, con il calcolo dei GG rileva tanto più è alto il valore calcolato tanto più è rigido il clima e quindi tanto più è alto il fabbisogno di energia. Con il D.P.R. 412/1993 [30] sono state introdotte le zone climatiche, dalla A alla F, in ordine crescente che sono ancora oggi usate nella progettazione energetica.

La direttiva europea EPBD [23] recepita in Italia con il D.Lgs 192/2005 [31], stabilisce e regola la metodologia introducendo i requisiti minimi per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, nonché i criteri generali per la certificazione energetica e le regole per la gestione e manutenzione degli impianti HVAC. La presente disposizione introduce le ispezioni periodiche e i criteri per garantire la qualifica e l'obiettività degli esperti incaricati per la certificazione energetica e per le ispezioni degli impianti. Successivamente, in Italia si adotta il D.Lgs 311/2006 [32] recante "Disposizioni correttive ed integrative al D.Lgs 192 del 19 agosto 2005".

La normativa tecnica UNI TS 11300 [33], recepisce la direttiva europea 2002/91/CE [23] sulle prestazioni energetiche e la certificazione energetica degli edifici. L'espressione “prestazione energetica”, riferita agli edifici, indica il fabbisogno energetico connesso alla vita dell'edificio, il quale comprende riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione meccanica e illuminazione. Tale specifica fornisce una linea guida univoca al calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio. La UNI TS 11300 si articola in quattro parti: la parte 1 - “Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale” introdotta nel 2014, definisce le modalità applicative della normativa tecnica europea UNI EN ISO 13790 [34], in riferimento al metodo mensile per il calcolo della climatizzazione invernale ed estiva. La specifica si rifà a tutte le possibili applicazioni della UNI EN ISO 13790 [34]: calcolo nelle condizioni di progetto (design rating), calcolo alle condizioni standard (asset rating) e calcolo in particolari condizioni climatiche e/o esercizio (tailored rating); la parte 2 - “Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali” introdotta nel 2019, definisce i metodi di

calcolo del fabbisogno di energia termica associato all'approvvigionamento di acqua calda sanitaria e per la valutazione dei rendimenti dell'impianto di produzione di energia termica per la climatizzazione invernale, al fine di risalire al fabbisogno di energia primaria. Vengono fornite le metodologie di calcolo per la determinazione dei consumi legati alla ventilazione meccanica e all'illuminazione artificiale, in accordo con la UNI EN 15193 [35]; la parte 3 - "Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva" introdotta nel 2010, illustra e definisce le metodologie di calcolo del fabbisogno di energia relativo ai sistemi di climatizzazione estiva, nonché del fabbisogno di energia primaria relativo al servizio di climatizzazione estiva. Tale norma si applica alle unità di climatizzazione azionate elettricamente o ad assorbimento. Da ultimo, la parte 4 - "Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria" introdotta nel 2012, detta i metodi di calcolo del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, nel caso in cui vi siano sorgenti ausiliarie di tipo rinnovabili, non alimentate a combustibili fossili (caso trattato nella parte 2 della normativa).

2.3 Le normative per gli impianti catena del freddo (celle frigorifere, banchi frigo e banchi surgelati)

A livello internazionale si parla di refrigerazione alimentare quando si affronta l'argomento della sicurezza alimentare definita dal World Food Summit di Roma nel 1996, promosso dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura (FAO). Tale definizione prevede che "tutte le persone, in ogni momento, hanno accesso fisico, sociale ed economico ad alimenti sufficienti, sicuri e nutrienti che garantiscano le loro necessità e preferenze alimentari per condurre una vita attiva e sana"[36]. Da questa definizione consegue l'assunto di mantenere gli alimenti in luoghi che possano conservare le proprie proprietà e caratteristiche in modo idoneo per essere consumati salvaguardando la salute del consumatore.

La sicurezza alimentare è disciplinata dal Regolamento (CE) n. 178 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 28 gennaio 2002 [37], il quale "stabilisce i principi e i requisiti generali della legislazione alimentare, istituisce l'Autorità Europea per la sicurezza alimentare (EFSA) e ne fissa le procedure nel campo della sicurezza alimentare". Il suddetto Regolamento esamina l'analisi del rischio, il processo costituito dalla valutazione, gestione e comunicazione di quest'ultimo, dalla possibilità di monitorare il percorso che un prodotto segue dalla sua produzione fino al raggiungimento del punto di vendita.

In seguito, il "pacchetto igiene" [38] costituito da quattro Regolamenti dell'Unione europea che rappresentano il quadro di riferimento con riguardo all'igiene dalla

produzione alla consumazione degli alimenti. Il Regolamento (CE) n. 852 del 2004 [38] rende obbligatoria l'adozione del sistema Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP), ossia lo strumento di autocontrollo per l'analisi dei rischi che caratterizzano il processo di produzione degli alimenti. Infatti, tale regolamento fa sì che il sistema si basi sulla prevenzione valutando l'insieme dei pericoli ai quali gli alimenti sono esposti. Tale procedura deve essere attuata dai medesimi operatori del settore alimentare, ciascuno nella fase di propria competenza. Il Regolamento (CE) n. 853 del 2004 [39] stabilisce norme specifiche in materia di igiene per gli alimenti di origine animale. Nello specifico, definisce puntualmente i requisiti specifici che devono essere osservati dagli Operatori del Settore Alimentare (OSA) per la sola produzione di prodotti di origine animale. Il Regolamento (CE) n. 854 del 2004 [40] disciplina i controlli sulle buone regole dell'igiene e sulle procedure conformi ai principi HACCP, nonché sui controlli specifici per ogni singolo settore: prodotti di origine animale, prodotti di pescheria, prodotti caseari.

I sopramenzionati Regolamenti evidenziano la necessità di una corretta conservazione degli alimenti. Infatti, negli ambienti in cui vengono conservati alimenti si prevede con elevata probabilità la proliferazione microbica spontanea di microrganismi pericolosi. Le normative su indicate, infatti, impongono alle imprese l'adozione del sistema HACCP che regola la corretta conservazione dei cibi all'interno degli ambienti refrigerati indicando temperature differenti per ogni tipologia di alimento, le norme igieniche all'interno di tali ambienti, la disposizione degli alimenti nei banchi frigo e le procedure cui attenersi in caso di guasti agli impianti di refrigerazione. A tal proposito, le linee guida proposte nel sistema HACCP prevedono una tolleranza di 1-2°C.

2.4 Le normative per i sistemi di illuminazione artificiale

Nell'ambito dei retail alimentari l'illuminazione, oltre a costituire una delle maggiori voci di consumo in termini di energia, rappresenta anche un punto cruciale nella stessa progettazione. Infatti, l'illuminazione nei supermercati può rendere, oltre che maggiormente confortevole la permanenza del consumatore all'interno dei locali, e al contempo più accattivante il prodotto venduto. Ma la normativa, con riferimento a tali ambienti, pone l'attenzione sulle esigenze di comfort visivo e di prestazione visiva delle persone intese sia come consumatori che come lavoratori. La normativa che si applica alla progettazione illuminotecnica degli spazi all'interno dei retail alimentari è infatti la UNI EN 12464-1 [41], la quale disciplina l'illuminazione nei posti di lavoro interni. Tale normativa impone i livelli minimi e massimi di illuminamento espresso in lux (lx) oltre che tutte le caratteristiche e i requisiti specifici da seguire. La tabella 1 riporta le caratteristiche dell'illuminazione secondo la normativa negli ambienti all'interno dei retail alimentari.

Ref. no.	Tipo di task/area di attività	$\bar{E}_m$ lx		U_o	R_a	R_{UGL}	$\bar{E}_{m,z}$ lx	$\bar{E}_{m,wall}$ lx	$\bar{E}_{m,ceiling}$ lx	Requisiti specifici
		min	max							
$U_o \geq 0.10$										
12.1	Magazzini e depositi	100	150	0.40	80	25	50	50	30	200 lx se occupato in modo continuativo. Sufficienti illuminamenti verticali devono essere applicati alle scaffalature.
12.3	Dispensa	200	500	0.60	80	25	100	50	30	
15.1	Preparazione e cottura pane	300	500	0.60	80	22	100	100	50	
20.3	Postazioni di lavoro macelleria	500	750	0.60	80	25	150	150	75	
20.4	Taglio e smistamento frutta e verdura	300	500	0.60	80	25	100	100	50	
20.5	Produzione di alimenti di gastronomia	500	750	0.60	80	22	150	150	75	
20.6	Laboratori	500	750	0.60	80	19	150	150	100	Assicurare un'illuminazione verticale sufficiente sugli scaffali. Considerare illuminazione verticale e l'indossamento abito davanti specchio
35.1	Area vendita generale	300	750	0.40	80	22	75	75	30	
35.5	Spogliatoi e camerini	300	500	0.40	90	-	-	-	-	

Tabella 1. Caratteristiche dell'illuminazione secondo la normativa UNI EN 12464-1.

2.5 Le normative relative ai sistemi di telegestione

I sistemi di automazione del controllo degli edifici prevedono una gestione centralizzata degli impianti di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e illuminazione dei locali, inoltre, consentono un continuo monitoraggio degli assorbimenti di energia. Tali sistemi, inoltre, prevedono un'interconnessione ai fini del monitoraggio delle performance impiantistiche non solo per un efficientamento energetico ed ambientale delle strutture, ma altresì per un controllo dei livelli di comfort degli occupanti. Il suddetto sistema di telegestione consente di registrare costantemente i dati di consumo, modificare i Set Point e le logiche di programmazione dell'impianto, gestire le procedure di allarme in caso di guasti o malfunzionamenti ed eseguire forzature da remoto rispetto alla routine di programma.

La norma UNI EN15232 [42] è uno standard europeo che statuisce una metodologia e talune convezioni per la stima dell'impatto del Building Automation and Control System (BACS) e del Technical Building Management (TBM) in merito alle prestazioni energetiche e sull'uso dell'energia negli edifici e suggerisce le indicazioni per le metodologie di calcolo e di progetto delle soluzioni di efficientamento impiantistico. La norma UNI EN15232 [42] determina quattro classi di efficienza energetica per distinguere i sistemi di automazione degli edifici, sia in ambito residenziale che non residenziale riportati in tabella 2.

Negli edifici della GDO le principali automazioni si hanno nella gestione e controllo degli impianti HVAC, illuminazione e refrigerazione.

Classi di efficienza energetica	Descrizione
D	BACS non efficienti o assenti
C	BACS livelli standard
B	BACS e TBM livelli avanzati
A	BACS e TBM con elevate prestazioni

Tabella 2. Classi di efficienza dei sistemi di automazione degli edifici.

La classificazione energetica di ogni funzione di automazione viene identificata con i livelli prestazionali da garantire obbligatoriamente. La norma UNI EN15232 [42] stabilisce le classi energetiche e i fattori di efficienza BAC per le diverse tipologie di edificio. Pertanto, nel lavoro descritto si tengono in considerazione i livelli identificati nella tipologia “negozi/grossisti” riportati in tabella 3. La classe di riferimento è la C dalla quale si ricava il risparmio energetico quando si ha il cambio della classe.

Tipologia	D	C	B	A
Uffici	1.10	1.00	0.93	0.87
Sale conferenze	1.06	1.00	0.94	0.89
Scuole	1.07	1.00	0.93	0.56
Ospedali	1.05	1.00	0.98	0.96
Hotel	1.07	1.00	0.95	0.90
Ristoranti	1.04	1.00	0.96	0.92
Negozi/grossisti	1.08	1.00	0.95	0.91

Tabella 3. Classi e fattori di efficienza BAC energia elettrica in edifici non residenziali.

2.6 Le normative relative alle energie rinnovabili

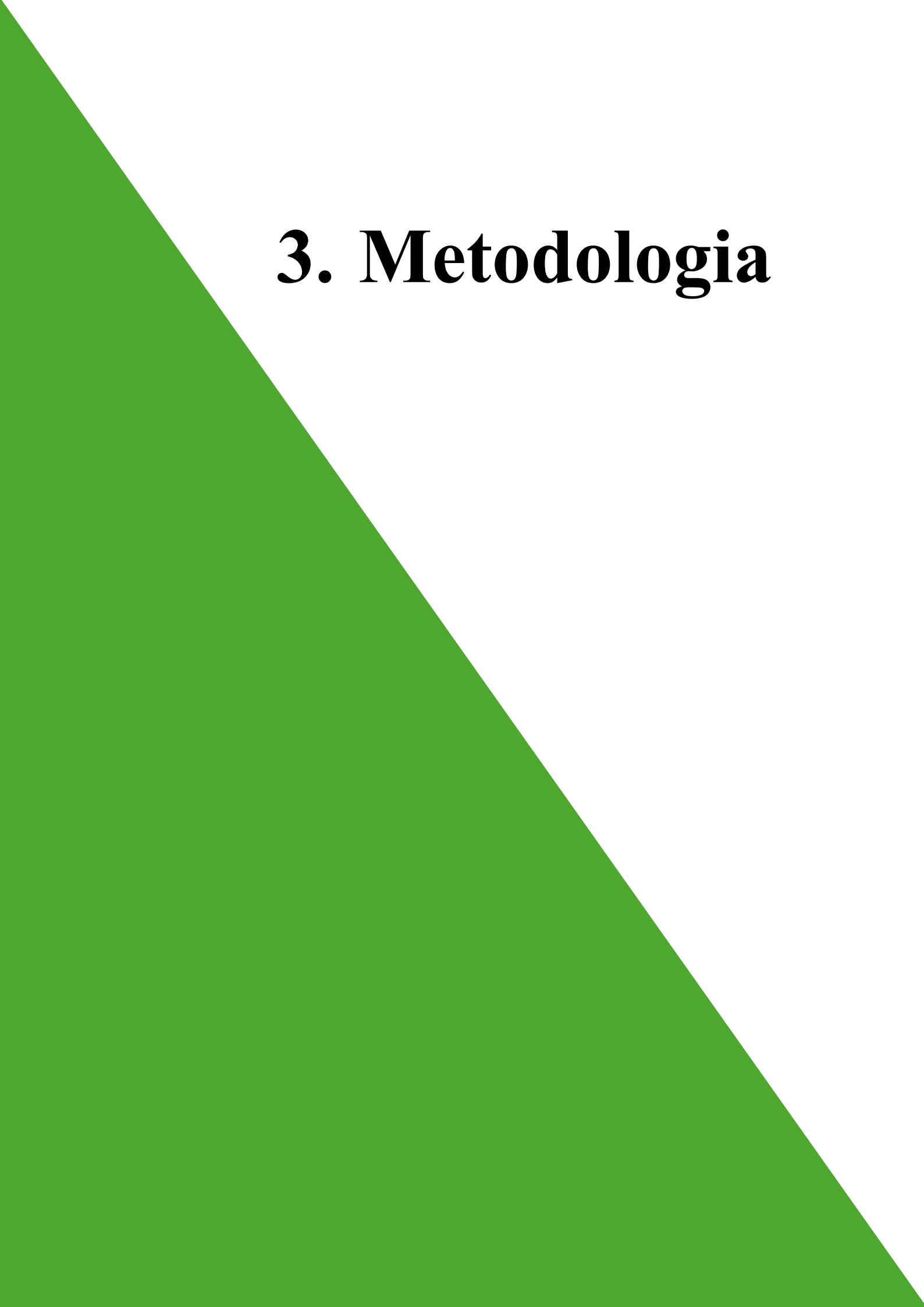
Attualmente il primo indice di miglioramento energetico di un edificio è considerato nella maggior parte dei casi, l'utilizzo di impianti di produzione di energia rinnovabile. La produzione di energia rinnovabile sta raggiungendo livelli di utilizzo senza precedenti nel settore edile diventando preponderante nel mix energetico globale. Il Piano nazionale per l'energia e il clima (PNIEC) [43] si concentra sulle aree principali per la diffusione delle energie rinnovabili indicando le misure di efficienza energetica e monitorando lo stato di avanzamento del sistema energetico nazionale. Infatti, con il PNIEC sono stabiliti i parametri di riferimento specifici per l'integrazione delle energie rinnovabili nel mix energetico, la riduzione dei consumi energetici e lo sviluppo di infrastrutture di accumulo dell'energia e di reti intelligenti.

In Italia la Legge 10/91 [44] ha disciplinato l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia. All'art. 1 statuiva che “al fine di migliorare i processi di trasformazione dell'energia, di ridurre i consumi di energia e di migliorare le condizioni di compatibilità ambientale dell'utilizzo dell'energia a parità di servizio reso e di qualità della vita, le norme del presente titolo favoriscono ed incentivano, in accordo con la politica energetica della Comunità economica europea, l'uso razionale dell'energia, il contenimento dei consumi di energia nella produzione e nell'utilizzo di manufatti, l'utilizzazione delle fonti rinnovabili di energia, la riduzione dei consumi specifici di energia nei processi produttivi, una più rapida sostituzione degli impianti in particolare nei settori a più elevata intensità energetica, anche attraverso il coordinamento tra le fasi di ricerca applicata, di sviluppo dimostrativo e di produzione industriale”, mancando, tuttavia, di fornire indicazioni minime relativamente alla produzione di energia da fonti rinnovabili. Successivamente, con il Decreto Legislativo n. 192 del 19/8/2005 [31], ha stabilito i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici favorendone lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra prefissi dal protocollo di Kyoto e a promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico. Il Decreto Legislativo n. 28 del 3/3/2011 [45] in attuazione della direttiva 2009/28/CE [46] ha definito le percentuali minime di energia prodotta da fonti rinnovabili per le nuove costruzioni.

Il Decreto-legge n. 63 del 04/06/2013 [47] recante “Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE [24] del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale” la quale definisce e integra condizioni e modalità per favorire

lo sviluppo, l'implementazione delle fonti rinnovabili negli edifici. Il recepimento si è compiuto con l'entrata in vigore del Decreto Requisiti Minimi del 2015 [48] volto a definire le modalità di applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, ivi incluso l'utilizzo delle fonti rinnovabili, nonché le prescrizioni e i requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici.

Con la Direttiva 2018/2001 [49] l'Unione europea ha aggiornato i criteri di calcolo delle quote minime di energia rinnovabile e dell'impatto dei gas a effetto serra dei biocarburanti, dei bioliquidi e dei combustibili da biomassa. La direttiva è stata, da ultimo, recepita dall'Italia con il Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica del 28 ottobre 2025 [50].

A large green triangle that starts at the top-left corner of the slide and extends diagonally towards the bottom-right corner, covering approximately the left half of the page.

3. Metodologia

3. Metodologia

Nel presente capitolo si espone nel dettaglio la metodologia applicata nel corso dello svolgimento delle indagini ai fini dell'elaborazione della corrente ricerca. Rileva l'approccio integrato che ha permesso di perseguire gli obiettivi scientifici e applicativi prefissi. In particolare, il metodo proposto si configura come una combinazione ottimale di strumenti digitali, procedure operative e criteri decisionali volti a supportare lo sviluppo di proposte metodologiche e operative per la transizione energetica sostenibile, la decarbonizzazione e la coesione territoriale nel settore della grande distribuzione organizzata (GDO).

L'oggetto di studio è un sistema fisico e termodinamico molto complesso che implica la necessità di avere la disponibilità di molteplici dati ed informazioni. Infatti, esso è costituito a sua volta da ambiti e sotto-ambiti altrettanto complessi ed articolati, che possono essere studiati sia come unico dominio che come settori differenziati ma all'interno di una rete. Ciò spesso implica la necessità di passare da piccola a grande scala e viceversa. Poiché l'obiettivo della tesi è quello di sviluppare proposte metodologiche e operative per la transizione energetica sostenibile, la decarbonizzazione e la coesione nella grande distribuzione organizzata è stato necessario analizzare il sistema complesso a grande scala di indagine. Questo ha comportato l'individuazione di questi ambiti molto ampi e complessi di ricerca e studio: ambito/settore catena del freddo, ambito/settore zone vendita e commercio, ambito/settore amministrativo/uffici, ambito/settore magazzini. In particolare, quindi, la tesi ha affrontato lo studio dell'uso termodinamico e quindi razionale dell'energia e del suo impiego a differenti livelli di temperatura termodinamica dei suddetti ambiti allo stato di fatto. Pertanto ha comportato lo studio dell'uso finale dell'energia e delle possibilità di efficientamento energetico di sottosistemi quali l'involucro degli edifici per migliorarne le prestazioni termofisiche energetiche e dove possibile ottimizzare il controllo della radiazione solare, nonché degli impianti dedicati al trattamento dell'aria per la climatizzazione invernale ed estiva, produzione e generazione del freddo a basse temperature (dai 2 °C ai -18°C), impiego di fluidi frigorigeni a basso impatto ambientale di ultima generazione, impiego di sistemi di recupero del calore per il suo riutilizzo per gli HVAC, miglioramento ed efficientamento energetico dei sistemi di illuminazione artificiale, integrazione di energie rinnovabili attraverso l'uso del fotovoltaico. Inoltre, la ricerca si è dovuta basare sui dati disponibili; infatti, alcune limitazioni alcuni limiti di indagine e di sviluppo della ricerca, specie nell'ambito della catena del freddo e del sistema a rete di trasporto dei prodotti, sono stati dovuti all'impossibilità di accedere ai dati nonché alla disponibilità di informazioni utili. Altro ambito che non è stato possibile investigare, sempre per la difficoltà di avere dati ed informazioni utili, è quello che riguarda la raccolta differenziata, smaltimento, riciclo

e/o recupero degli scarti dei magazzini e delle aree di vendita ed il sistema imballaggi. Pertanto, il metodo proposto, messo a punto ed applicato ai casi di studio ha riguardato gli ambiti sopradescritti con le finalità descritte.

L'impianto metodologico non si limita alla scelta di singoli software o tecnologie, ma si fonda sull'integrazione sinergica e sull'interoperabilità efficiente tra le differenti tecnologie adottate nella progettazione e nella gestione degli edifici. Quanto detto consente di allestire un sistema coerente e funzionale sia allo sviluppo di soluzioni integrate mirate all'efficientamento degli edifici esistenti e alla gestione ottimale di quest'ultimi nel tempo. Inoltre, l'interoperabilità e la sinergia di software o tecnologie consentono di gestire in modo dinamico il sistema edificio-impianto. In quest'ottica, il "metodo" non va inteso come una sequenza rigida di operazioni, bensì quale sistema dinamico e adattivo, capace di combinare strumenti eterogenei in un flusso di lavoro ottimizzato.

La metodologia avanzata si impenna sull'utilizzo coordinato di modelli BIM (Building Information Modeling), e software BEM (Building Energy Modeling) la cui interoperabilità costituisce il fulcro della modellazione integrata delle prestazioni energetiche degli edifici della GDO. La connessione tra ambienti digitali diversi consente di coniugare la rappresentazione geometrico-informativa del modello architettonico con la simulazione energetica avanzata, garantendo un approccio multidisciplinare e data-driven al processo di analisi e ottimizzazione.

Il sistema così strutturato consente di individuare e validare una combinazione ottimale di strumenti digitali, sia in termini di efficienza tecnica che di coerenza rispetto agli obiettivi di riduzione delle emissioni operative ed economica. Il metodo intende, inoltre, offrire un modello replicabile su larga scala, capace di adattarsi a contesti disparati, promuovendo la diffusione di pratiche progettuali e gestionali orientate alla riduzione delle emissioni e al perfezionamento delle performance energetiche complessive nel settore dei retail della GDO.

3.1 Struttura del metodo e tipologie di analisi

Le analisi sviluppate nello studio presentato non costituiscono attività indipendenti, ma fasi successive di un unico processo metodologico. In particolare, la ricerca combina tre livelli di uno stesso processo: l'analisi conoscitiva dello stato di fatto, la modellazione e simulazione dinamica degli scenari di intervento degli scenari di intervento.

Il primo livello, quindi l'analisi conoscitiva, riguarda la raccolta dei dati e delle informazioni e la loro classificazione. Tale processo permette di descrivere in modo esaustivo lo stato di fatto dell'edificio. L'acquisizione dei dati geometrici, termofisici, impiantistici, energetici, climatici, gestionali ed economici rientra nel primo livello. Inoltre, soprattutto per la particolarità degli edifici oggetto di analisi, è necessario

condurre un approfondito e dettagliato inventario delle utenze, la ricostruzione dei profili di utilizzo, l'individuazione degli orari di funzionamento e la verifica delle principali criticità legate ai differenti usi dell'energia per differenti livelli di temperatura termodinamica.

Il secondo livello, modellistico-simulativo, riguarda la costruzione del modello solido architettonico dell'edificio e la simulazione del suo comportamento energetico allo stato di fatto. In questa fase il modello BIM è utilizzato per organizzare le informazioni geometriche e costruttive, mentre il modello BEM consente di simulare il comportamento energetico dello stato di fatto e degli scenari di intervento. Il passaggio dal BIM al BEM richiede una fase di selezione e semplificazione delle informazioni rilevanti ai fini energetici.

Il terzo livello, valutativo-comparativo, confronta lo stato di fatto con quelli che sono gli scenari di riqualificazione adatti e soprattutto valutati nel secondo livello di analisi. In questa fase i risultati delle simulazioni vengono analizzati mediante indicatori energetici, ambientali ed economici, al fine di stimarne la loro efficacia ed individuare gli interventi più coerenti con le caratteristiche del punto vendita analizzato.

All'interno di questa gerarchia, la diagnosi energetica assume il ruolo di riferimento metodologico per la fase conoscitiva. Essa consente di ordinare la raccolta dei dati, individuare gli usi energetici prevalenti, riconoscere le criticità del sistema edificio-impianto e orientare la successiva definizione degli scenari di intervento. Nel presente lavoro la diagnosi energetica non è intesa come procedura certificativa autonoma, ma come approccio conoscitivo e operativo a supporto della modellazione energetica e della valutazione degli interventi. Essa non viene intesa come procedura amministrativa autonoma, ma come fase conoscitiva preliminare e funzionale alla modellazione energetica dinamica e alla successiva simulazione di scenari migliorativi.

La progettazione degli edifici, che siano essi già esistenti o siano essi ancora da edificare, deve operare attraverso scelte strategiche sostenibili con strumenti di calcolo che prevedono e monitorano il comportamento dell'edificio tenendo conto della volubilità delle condizioni al contorno, come il clima, la disponibilità di energia da fonti rinnovabili, il comportamento degli occupanti e la gestione di tutti gli impianti tecnologici presenti. Tale approccio costituisce l'unica via per ottimizzare i risultati prestazionali.

Il settore edile, in particolare attinente agli edifici della GDO esistenti, ha tuttora un impatto elevato sull'ambiente. Risulta, pertanto, necessario ridurre il consumo energetico, integrare le forniture di energia rinnovabile e mitigare gli impatti ambientali, al fine di soddisfare le aspettative e promuovere il benessere umano e sostenere la crescita economica.

La simulazione delle prestazioni termiche degli edifici mediante modelli digitali è stata un'area di indagine operativa sin dagli anni '60, con gran parte dei lavori incentrati sul

calcolo dei carichi termici e sull'analisi energetica. Nel tempo, il dominio della simulazione energetica è diventato più ricco e integrato, con disponibilità di strumenti che integrano la simulazione del trasferimento di calore e massa nel tessuto edilizio, i flussi all'interno e quelli che attraversano l'edificio, illuminazione naturale e una vasta gamma di sistemi e componenti. Al contempo, le interfacce grafiche hanno facilitato l'utilizzo dei suddetti strumenti, i quali risultano sempre più efficienti e ampiamente utilizzati [51].

La simulazione energetica dell'edificio è utile per verificare il raggiungimento di risultati adeguati sia in termini di livelli di comfort e qualità dell'aria interna, che in termini di efficienza energetica e corrette soluzioni di gestione del sistema edificio-impianto, è altresì valida al fine di studiare l'integrazione di energie rinnovabili, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale e garantire la conformità degli edifici ai requisiti legislativi oltre che a formulare piani d'azione energetici su qualsivoglia scala.

La pianificazione della progettazione è uno strumento idoneo ad individuare le migliori pratiche ai fini della valutazione delle prestazioni dell'edificio, dell'impatto ambientale e della salute degli utenti in un processo interconnesso. La gestione di un progetto interconnesso consente la graduale evoluzione della descrizione del problema e con una conseguente fase di progettazione progressiva [52].

Per lo sviluppo dei diversi strumenti di valutazione delle prestazioni sono stati compiuti i maggiori sforzi in linea con un processo di progettazione finalizzato all'efficienza energetica degli edifici.

Tale processo è passato da semplici motori di calcolo in regime stazionario a software dinamici altamente complessi, sino a determinare una stima accurata delle prestazioni dell'edificio. Gli strumenti di simulazione sono utilizzati dagli utenti che desiderano avere una previsione del comportamento degli edifici e del loro ambiente nel breve e nel lungo periodo in condizioni specifiche del clima esterno e del funzionamento dei sistemi edilizi. Pertanto, si rende necessario avere una solida conoscenza della gestione dei citati sofisticati strumenti onde conseguire una visione quanto più fedele.

Il crescente impiego di strumenti di simulazione negli ultimi anni è incoraggiato non solo dall'interesse per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, ma anche dai vantaggi derivanti da un investimento iniziale in fase di progettazione piuttosto che da costi più elevati in fase di esecuzione. Eseguire una valutazione delle iterazioni di ottimizzazione dell'edificio all'inizio della progettazione anziché al termine aiuta a risparmiare sui costi di progettazione e sviluppo del progetto.

La diagnosi energetica dell'edificio, secondo il D.lgs. 73 del 14 luglio 2020 [53], si configura come il punto di partenza per una corretta analisi dell'esistente. Infatti, nel caso di edifici esistenti non si può demandare alla certificazione energetica la valutazione dello stato di fatto, ma è necessario capire, attraverso una diagnosi ex ante, le criticità e i punti di forza. Tale attività, intesa come una pura azione progettuale, è una stima del

comportamento del sistema edificio-impianto che si presenta differente per ogni caso specifico. Pertanto, la diagnosi energetica si configura come l'approccio da adottare per l'analisi del reale. Il punto di partenza dell'attività progettuale consiste nell'analisi dei consumi e dei fabbisogni energetici per determinare i potenziali interventi di risparmio e di efficienza. Tale analisi deve approfondire anche lo stato di manutenzione della struttura e di ogni elemento impiantistico al suo interno poiché non è sufficiente basarsi esclusivamente sulla documentazione fornita dal committente. La raccolta dati dei consumi energetici, il costo dell'energia e tutti i dati delle utenze (potenza, fabbisogno e consumo orario, fattore di utilizzo, ore di lavoro, etc...) sono necessari alla costruzione di modelli energetici reali per consentire di ricavare la ripartizione delle potenze e dei consumi per tipo di utilizzo (illuminazione, HVAC, catena del freddo e altri servizi): per cabina elettrica, per reparto, fascia oraria e stagione. La situazione energetica dello stato di fatto viene inquadrata ed analizzata in modo critico confrontando i dati di consumo medio per poi individuare le possibili soluzioni e i loro costi in una fase di fattibilità tecnico-economica.

L'acquisizione di un modello energetico corredato da una diagnosi non solo è utile per la progettazione dei miglioramenti da apportare al sistema edificio-impianto, ma è fondamentale per il proprietario e/o gestore della struttura che, in autonomia o supportato da tecnici competenti, può monitorare i cambiamenti e la gestione di tutte le utenze. Pertanto, la prima fase riveste un ruolo primario nella definizione degli obiettivi di pianificazione energetica, in quanto, la mancanza del suddetto intervento potrebbe addirittura risultare dannoso ai fini della riduzione dei consumi energetici.

Successivamente all'ottenimento di un modello energetico è indispensabile comprendere che la soluzione progettuale da attuare non è unica e migliorativa per tutte le criticità potenzialmente presenti, anzi, tale soluzione potrebbe essere migliorativa per talune condizioni e dannosa per talaltre. Le soluzioni efficienti possono essere molteplici e la loro individuazione deve coinvolgere il complesso delle figure interessate nella gestione energetica dell'immobile. Indubbiamente, progettare una soluzione tecnologicamente efficiente, che però non tenga conto dei suoi effetti su larga scala può anche rivelarsi dannosa.

3.2 Applicazione del metodo e i suoi limiti

L'applicazione del metodo proposto si articola in una sequenza strutturata di fasi operative che consentono di analizzare in modo integrato il sistema edificio-impianto dei retail esistenti della GDO, partendo dalla conoscenza dello stato sino alla definizione e valutazione delle strategie di intervento. Il metodo in esame, oltre che ad uno studio di analisi e ricerca, si applica a casi studio selezionati, che rappresentano differenti tipologie edilizie e impiantistiche tipiche del settore retail esistenti della GDO.

La fase iniziale consiste nel reperire i dati architettonici, impiantistici e i fabbisogni energetici dell'edificio oggetto di studio per una corretta costruzione del modello digitale, sviluppato in ambiente BIM. Tale modello costituisce, però, la base informativa a cui è necessario aggiungere i comportamenti dei gestori della struttura e come il sistema edificio-impianti viene amministrato quotidianamente. L'insieme delle siffatte acquisizioni si ottiene solamente all'esito di un colloquio con i gestori e tramite un monitoraggio condotto nel corso di un periodo prolungato di tempo. Le successive analisi energetiche e ambientali permettono una rappresentazione coerente e condivisa del sistema edificio-impianto. L'interoperabilità tra BIM e strumenti di simulazione energetica, vale a dire con un modello BEM, consente di trasferire le informazioni necessarie a sviluppare simulazioni in regime dinamico per la valutazione del comportamento energetico dell'edificio nelle diverse condizioni operative e climatiche.

Successivamente, il modello energetico viene calibrato attraverso il confronto con i dati reali di consumo ricavati dalle bollette energetiche, dai sistemi di monitoraggio esistenti e, ove possibile, dalle misure strumentali puntuali. Questa fase oltre che essere cruciale per avere un modello energetico reale, risulta fondamentale per garantire l'affidabilità delle simulazioni svolte e contenere gli errori il comportamento simulato e quello reale dell'edificio. Il predetto metodo consente di simulare diversi scenari di intervento, valutando sì l'impatto della singola strategia, ma altresì la combinazione di più strategie con l'individuazione puntuale della riduzione dei consumi energetici, delle emissioni di gas a effetto serra e dei costi di esercizio. Inoltre, con il metodo in esame si analizzano i risultati dei singoli sottosistemi (catena del freddo, sistemi HVAC, illuminazione e consumi generali) rilevandone gli effetti indiretti che gli interventi avanzati hanno sull'intero sistema edificio-impianto. In questo senso, il metodo favorisce una visione sistemica e integrata che supera l'approccio tradizionale basato su interventi settoriali e non coordinati. L'applicazione del metodo consente, infine, di supportare il processo decisionale, fornendo indicazioni quantitative utili al vaglio delle soluzioni più efficaci e sostenibili, anche in funzione dei vincoli economici e gestionali propri del settore della GDO.

I limiti del metodo utilizzato sono legati alla reperibilità dei dati di input dei modelli informatici. Nei retail esistenti della GDO, la documentazione tecnica risulta frequentemente incompleta o non aggiornata, rendendo pertanto necessaria l'adozione di assunzioni semplificative nella modellazione del sistema edificio-impianto. L'assenza di sistemi di monitoraggio energetico avanzati limita la calibrazione accurata dei modelli e condiziona l'affidabilità delle simulazioni. Un ulteriore limite che rileva concerne la complessità del comportamento reale degli utenti e dei sistemi impiantistici. Le simulazioni energetiche, pur essendo basate su modelli dinamici avanzati, non sempre riescono a rappresentare esaustivamente le variabilità legate alle abitudini dei

consumatori, alle modalità operative del personale e alle logiche di gestione degli impianti, che nei retail della GDO possono variare significativamente nel tempo.

Il metodo richiede competenze multidisciplinari e un elevato livello di integrazione tra differenti figure professionali, oltre che tempi e risorse non sempre compatibili con le esigenze operative e decisionali delle aziende della GDO. In particolare, l'adozione di strumenti digitali avanzati come BIM e BEM possono costituire una barriera iniziale, soprattutto in contesti caratterizzati da una gestione energetica tradizionale.

A dispetto di tali limiti, il metodo proposto si configura quale strumento efficace per l'analisi e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dei retail della GDO, offrendo un approccio strutturato, replicabile e adattabile a disparati contesti. I limiti così individuati non compromettono la validità complessiva, ma evidenziano la necessità di un continuo affinamento del processo, in particolar modo attraverso il miglioramento dei sistemi di monitoraggio, l'accuratezza dei dati disponibili e l'integrazione tra progettazione, gestione e controllo operativo degli edifici.

Il metodo proposto e la sua applicazione a casi studio reali riguardanti un'impresa operante nel mercato libero richiedono l'adozione di una serie di assunzioni necessarie a compensare i limiti intrinseci dei casi studio, legati sia alla natura degli edifici analizzati sia agli strumenti di modellazione e simulazione adottati. Le assunzioni proposte sono indispensabili ai fini di rendere il presente lavoro di ricerca efficiente dal punto di vista operativo e computazionale, mentre i limiti individuati consentono di inquadrare correttamente l'ambito di validità dei risultati ottenuti.

Si distinguono, in una prima classificazione, i limiti e le conseguenti assunzioni che riguardano la disponibilità, la reperibilità e la qualità dei dati di input forniti. Per la costruzione dei modelli BIM e BEM è risultato necessario formulare assunzioni semplificative sui materiali costruttivi, sulle stratigrafie opache e trasparenti e sulle caratteristiche prestazionali dei componenti impiantistici, basandosi su dati di letteratura, normative di riferimento e valori tipici per edifici analoghi per epoca costruttiva e destinazione d'uso.

Una seconda classificazione delle assunzioni riguarda i profili di utilizzo dell'edificio e degli impianti. I dati in oggetto derivano da schede compilate dai gestori degli edifici e non da un monitoraggio condotto in situ. Inoltre, le schede occupazionali attinenti ai consumatori sono ottenute dalla lettura delle ricevute fiscali con cadenza oraria. Tuttavia, data la natura di detti edifici, i suddetti profili non riproducono in modo puntuale le variazioni quotidiane e stagionali legate al comportamento degli utenti, alle strategie gestionali del personale e alle politiche commerciali, sebbene siano comunque congrue a rappresentare uno stato di fatto reale.

Sotto il profilo impiantistico, le simulazioni energetiche si basano su modelli semplificati del funzionamento dei sistemi HVAC, della catena del freddo e dei sistemi

di illuminazione. Nello specifico, il comportamento dinamico dei sistemi di refrigerazione, caratterizzato da logiche di controllo complesse, cicli di sbrinamento, parzializzazioni e condizioni di carico variabili, viene rappresentato attraverso modelli che, pur essendo coerenti con le pratiche di simulazione consolidate, non riescono a catturare completamente tutte le non linearità e le condizioni di funzionamento reale.

Un ulteriore limite è all'assenza di un sistema di monitoraggio che permetta una calibrazione del modello secondo consumi orari o sub-orari. Di conseguenza, la validazione dei modelli si fonda principalmente su indicatori di consumo energetico aggregati, con un inevitabile margine di incertezza nelle stime dei singoli contributi di consumo.

Per quanto riguarda i dati climatici, lo studio in esame assume condizioni ricavate da dati di riferimento corrispondenti a dati climatici standard rappresentativi del contesto reale in cui operano i casi studio. Tuttavia, non è possibile rendere espliciti dati climatici estremi che potrebbero influenzare significativamente il comportamento dell'edificio e perciò delle strategie di intervento previste con riferimento specifico al raffrescamento estivo e al funzionamento dei sistemi di refrigerazione.

Infine, le valutazioni economiche associate alle strategie di intervento sono fondate su stime di costo indicative e su parametri medi di mercato senza tenere conto nel dettaglio gli incentivi fiscali variabili nel tempo e le dinamiche di mercato specifiche, che potrebbero influenzare in modo rilevante la fattibilità economica degli interventi. Pertanto, i risultati economici devono essere interpretati come indicazioni di carattere generale a supporto del processo decisionale e non come valutazioni definitive di investimento.

Nel complesso, i limiti e le assunzioni adottati non compromettono la validità del metodo proposto, ma ne definiscono l'ambito di applicazione e interpretazione figurando quali linee guida per gli edifici esistenti destinati a retail della GDO. I risultati sono una stima affidabile di quelle che sono le tendenze e i potenziali miglioramenti energetici ed ambientali per supportare la progettazione e la gestione dei retail esistenti della GDO.

3.2.1 Assunzioni semplificative e limiti previsionali

Il modello sviluppato è finalizzato alla valutazione comparativa delle prestazioni energetiche dei retail alimentari della GDO e delle principali strategie di riqualificazione energetica attualmente disponibili. L'approccio adottato considera principalmente la risposta energetica del sistema edificio-impianto e l'influenza delle strategie di retrofit energetico sui consumi. Inoltre, sebbene non sia stato possibile avere informazioni e dati specifici sulle caratteristiche tecniche dei sistemi frigoriferi, in questo lavoro si è tenuto conto, all'interno delle valutazioni, la variazione dei fabbisogni energetici per

climatizzazione e refrigerazione per ottenere un bilancio energetico globale fisicamente e termodinamicamente attendibile del sistema edificio-impianto.

Al fine di garantire confrontabilità tra gli scenari simulati, il modello assume una configurazione tecnologica sostanzialmente costante nel tempo e non considera esplicitamente l'evoluzione futura delle tecnologie HVAC e della refrigerazione, le future modifiche normative europee e nazionali e l'evoluzione dei comportamenti di consumo e delle modalità operative del retail alimentare.

Pertanto, i risultati ottenuti devono essere interpretati come valutazioni comparative sviluppate in condizioni controllate e non come previsioni deterministiche dell'evoluzione energetica del settore retail alimentare nel lungo periodo.

Nonostante tali semplificazioni, è possibile di evidenziare le principali tendenze evolutive dei fabbisogni energetici e di valutare l'efficacia relativa delle strategie di efficientamento energetico considerate. D'altra parte, la buona conoscenza ed la valutazione comparativo-critica della situazione e condizioni reali attuali costituisce l'indispensabile presupposto per un ulteriore sviluppo della ricerca. Il metodo proposto consente quindi di avere sia data set efficaci ed utili, sia criteri di analisi e valutazione, sia un processo operativo logico di definizione e programmazione (anche spazio-temporale) degli interventi.”

3.3 Obiettivi dell'analisi

L'attività di ricerca oggetto del presente elaborato si propone quale studio della prestazione energetica dei punti di vendita esistenti della GDO nella green economy per la riqualificazione del sistema edificio-impianto finalizzata alla transizione energetica e alla decarbonizzazione del settore. Lo scopo della ricerca è la verifica e l'implementazione di un metodo pratico operativo. Con l'individuazione di diversi casi studio rappresentativi della tipologia edilizia studiata si perfeziona un sistema di identificazione di prototipi affinché si ottenga un metodo replicabile su larga scala. Il metodo proposto, oltre che prendere spunto dai più innovativi studi scientifici internazionali del settore e fornire una base per significativi sviluppi tecnologici, energetici ed economici, ponendo al contempo le necessarie basi per future applicazioni di Digital Twins.

La stretta collaborazione aziendale-universitaria risulta di fondamentale importanza per la valorizzazione del capitale umano e per il consolidamento/applicazione di nuove conoscenze e competenze grazie all'elevata specializzazione ed interdisciplinarietà della tematica. La ricerca in oggetto permette di sviluppare ed analizzare interventi di miglioramento energetico ed ambientale in ottica smart grid (sustainable energy&economy) ed è idonea ad adattarsi ai cambiamenti ambientali, energetici, economici e finanziari, e può applicarsi alle diverse tipologie di punti vendita e centri

commerciali esistenti. Difatti, le soluzioni proposte nello studio consentono di sostenere politiche ambientali orientate alla riduzione del riscaldamento globale GWP, alla limitazione della distruzione dello strato di ozono, alla tutela dell'ambiente e della biodiversità, alla valorizzazione sociale, culturale, per la salute dell'ecosistema e delle persone, nonché una maggiore consapevolezza e partecipazione.

L'obiettivo dell'analisi è la definizione e la validazione di un approccio metodologico integrato per la valutazione e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e ambientali dei retail esistenti della GDO, basato su una visione sistemica e sinergica del sistema edificio-impianto. L'approccio proposto, dunque, consente di combinare strumenti, tecnologie e metodologie eterogenee al fine di garantire un'analisi coerente e approfondita delle principali criticità legate alla sostenibilità energetica nella fase operativa dei retail della GDO.

Nello specifico, l'analisi, come illustra il workflow in figura 3, si propone di perseguire i seguenti obiettivi:

- valutare il potenziale di recupero e riutilizzo del calore di scarto a bassa temperatura generato dai sistemi di refrigerazione alimentare, mediante la sua integrazione con i sistemi HVAC per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di servizi termici;
- analizzare l'efficacia di strategie di controllo avanzato dei sistemi edificio-impianto, basate sull'impiego di tecniche di intelligenza artificiale e apprendimento automatico, applicate in modo integrato alla catena del freddo, ai sistemi HVAC e ai sistemi di illuminazione artificiale, interconnessi attraverso piattaforme di gestione e automazione di tipo Konnex;
- investigare l'integrazione di soluzioni di retrofit in grado di consentire il controllo dinamico della radiazione solare, sia in termini di apporti termici sia di illuminazione naturale, mediante l'impiego di reti di sensori dedicate, piattaforme di controllo basate su AI e tecnologie fotovoltaiche.

Nel complesso, i predetti obiettivi mirano a quantificare i benefici energetici, ambientali e gestionali delle strategie analizzate, nonché a valutare la loro applicabilità e replicabilità nel contesto dei retail della GDO.

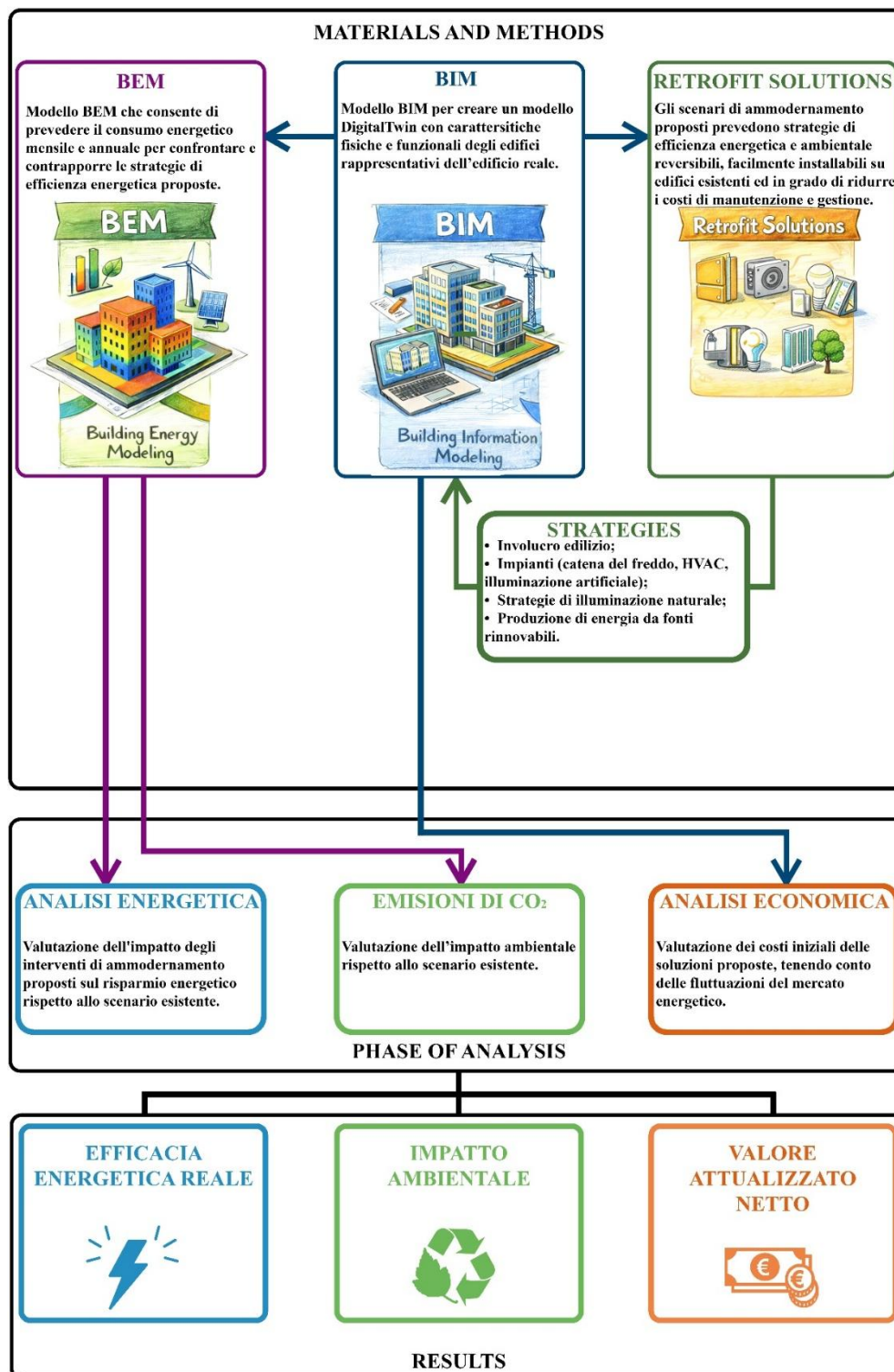


Figura 3. Workflow del metodo proposto.

La figura 3 rappresenta la struttura logica del metodo proposto e costituisce il riferimento organizzativo dell'intero processo di implementazione del metodo. Il workflow rappresenta la struttura organizzativa e processo attuativo di realizzazione-implementazione del metodo attraverso cui i dati disponibili vengono progressivamente trasformati in informazioni utili alla valutazione energetica e alla scelta degli interventi.

La prima fase riguarda la raccolta dei dati geometrici, termofisici, impiantistici, energetici e gestionali. Tali informazioni costituiscono l'input del modello BIM, utilizzato per costruire il modello solido architettonico dell'edificio e le principali caratteristiche tecniche-informative del sistema edificio-impianto. La seconda fase consiste nella selezione e semplificazione delle informazioni rilevanti ai fini energetici e nel loro trasferimento al modello BEM, nel quale vengono definite le zone termiche, i profili di occupazione, gli orari di funzionamento, i carichi interni, i sistemi impiantistici e le condizioni climatiche interne ed esterne.

La terza fase riguarda la calibrazione del modello energetico attraverso il confronto con i consumi reali disponibili. Solo dopo questa verifica il modello viene utilizzato per simulare gli scenari di intervento. Gli scenari sono quindi confrontati rispetto allo stato di fatto mediante indicatori energetici, ambientali ed economici, in modo da individuare le strategie più efficaci e coerenti con le caratteristiche del singolo punto vendita.

Il workflow evidenzia inoltre che la metodologia non considera i sottosistemi energetici come elementi completamente indipendenti. In particolare, nei punti vendita alimentari, refrigerazione commerciale, climatizzazione, illuminazione e involucro edilizio sono interrelate e interagiscono tra loro, pesando diversamente sul bilancio energetico totale del sistema e quindi permettendo di individuare le principali connesse criticità. La modellazione e la valutazione degli scenari devono pertanto essere condotte tenendo conto di tali interdipendenze, anche quando alcune di esse sono rappresentate attraverso assunzioni semplificative.

3.4 La raccolta dati

La raccolta dati integra una fase fondamentale dello studio effettuato giacchè deve poter permettere di quantificare sia in termini di energia che in termini ambientali lo stato di fatto degli edifici analizzati.

Il punto di partenza della raccolta dati è finalizzato alla caratterizzazione tecnica, energetica ed economica del sistema oggetto di analisi, mediante la rilevazione di:

- dimensioni e caratteristiche architettoniche dell'edificio;
- tipologia e caratteristiche degli impianti;
- stato degli impianti (età, manutenzione, etc.);
- fattori di utilizzo degli impianti;
- razionalità degli impianti;

- consumi energetici globali e dei singoli impianti;
- dati sulla produzione e sull'occupazione;
- orari di apertura al pubblico e al solo personale lavorativo;
- costo dei vettori energetici utilizzati;
- costo del denaro per la realtà considerata;
- capitale a disposizione per interventi.

L'aspetto essenziale ai fini di una corretta ed efficace caratterizzazione del sistema edificio-impianto consiste nel comprendere le attitudini dei consumatori, dei lavoratori e dell'amministrazione in termini di efficienza energetica. Considerato che i retail della GDO sono edifici con elevati consumi energetici nell'arco dell'intera giornata e per tutto l'anno, è opportuno accertare la presenza nell'organico della struttura una figura con responsabilità in ambito energetico diretta (energy manager, responsabile acquisti energia, ecc.) e indiretta (conduttori, manutentori, personale). Inoltre, avendo i suddetti edifici una particolare destinazione d'uso, per gli impianti e i macchinari ivi presenti all'interno (banchi frigo, celle frigo, affettatrici, casse ecc.) è indispensabile effettuare un inventario dettagliato che ne riporti le caratteristiche essenziali ai fini della diagnosi. L'acquisizione dei dati, oltre che in modo visivo e diretto, può essere effettuata in vario modo, tramite:

- studio della documentazione presente (bollette, planimetrie, schemi funzionali, ecc.);
- software associati ad un sistema di monitoraggio;
- misure strumentali (energia, potenza);
- raccolta di dati climatici;
- conduzione di rilievi metrologici (dimensioni).

La seconda fase della raccolta dati concerne l'identificazione delle condizioni a contorno. La tipologia edilizia presente che ospita i retail della GDO è la più variegata, e ciò comporta che l'edificio può essere un intero centro commerciale oppure un edificio isolato che ospita solo il retail o, ancora, può trattarsi di locali commerciali ubicati al piano terra di edifici residenziali. Come la tipologia, anche la zona urbanistica in cui il retail è collocato può essere diversa in ogni caso studio. Tali condizioni (tipologia edilizia, zona urbanistica) influiscono direttamente sia sui consumi per la climatizzazione, sia, in taluni casi, sulle scelte impiantistiche (es. sistemazione centrali e percorsi delle reti di distribuzione) o sulle abitudini degli occupanti. Pertanto, durante le operazioni di raccolta dati è fondamentale indagare e acquisire tali dati, i quali contribuiranno a definire ed orientare le scelte progettuali e i risultati.

Ai fini della simulazione dinamica energetica, i dati raccolti sono stati classificati in funzione della loro origine e del loro livello di affidabilità. Sono stati distinti: dati misurati, derivanti da bollette, sistemi di contabilizzazione o rilievi diretti; dati

documentali, ricavati da elaborati progettuali, schede tecniche, libretti impiantistici e documentazione fornita dal gestore; dati osservati, acquisiti mediante sopralluoghi e verifiche in campo; dati stimati, utilizzati in assenza di informazioni dirette e definiti sulla base di caratteristiche tecniche e funzionali, letteratura tecnica o assunzioni coerenti con la destinazione d'uso.

Questa classificazione è rilevante perché il livello di affidabilità dei dati influenza la costruzione del modello BEM e l'interpretazione dei risultati. I dati geometrici e termofisici sono impiegati per la definizione dell'involucro e delle zone termiche; i dati impiantistici sono utilizzati per descrivere i sistemi HVAC di illuminazione; i dati gestionali permettono di impostare profili di funzionamento, orari di apertura, carichi interni e condizioni operative; i consumi reali consentono infine di verificare la coerenza del modello simulativo rispetto al comportamento termofisico ed energetico dell'edificio.

Nei casi delle caratteristiche degli impianti di refrigerazione, in cui i dati non sono stati resi disponibili, sono state adottate assunzioni semplificative in riferimento alla letteratura in materia e tali impianti sono stati modellati in modo semplificato, ma realistico e pertinente. Tali assunzioni non hanno lo scopo di sostituire il dato misurato, ma di rendere possibile la modellazione in un contesto reale caratterizzato da documentazione tecnica non completa, tipico degli edifici esistenti del settore commerciale.

3.5 Strumenti di modellazione

Il presente paragrafo introduce il BIM e ne descrive successivamente l'applicazione al caso di studio. L'acronimo BIM (Building Information Modeling) ha avuto origine nel 2002 dalla competizione tra Stati Uniti, Europa occidentale e il Blocco Sovietico con l'intento di sviluppare un software architettonico sopra il 2D modellazione. L'avvento del BIM ha favorito un approccio digitalizzato e standardizzato nella rappresentazione dei sistemi costruttivi, esistenti o di futura realizzazione, che consente di ottimizzare nonché accelerare i processi di progettazione e controllo dell'opera civile o dell'infrastruttura nel corso dell'intero ciclo di vita. La metodologia proposta permette di progettare, costruire, gestire e mantenere l'edificio integrando le diverse conoscenze in un modello unico che si avvale dell'interoperabilità dei software per conseguire i seguenti vantaggi: maggiore efficienza e produttività, minimizzazione degli errori e riduzione dei tempi di fermo legati all'interoperabilità, nonché riduzione dei costi e condivisione dei dati in tempo reale che agevola un monitoraggio immediato e coordinato del progetto.

Il principio di funzionamento della modellazione BIM si fonda sulla modellazione delle informazioni, che consente di gestire in modo integrato la variabilità spaziale e temporale dei dati nel tempo offrendo una gestione centralizzata, puntuale e dinamica di tutte le informazioni del progetto.

Tramite il software BIM si sviluppano modelli multidimensionali:

- 3D: modello geometrico della struttura contiene informazioni sul volume, sui materiali utilizzati, sull'aspetto architettonico e sulle caratteristiche tecniche;
- 4D: permette di ottenere un modello integrato della variabile temporale in relazione a ciascun materiale e ne identifica il grado di usura nel tempo a partire dalla realizzazione sino all'eventuale rimozione, sostituzione o smaltimento;
- 5D: modello computazionale dei costi di costruzione e gestione;
- 6D: modello di gestione e manutenzione;
- 7D: modello basato sull'analisi ambientale, economica e sociale.

La diffusione della modellazione BIM ha introdotto la necessità di valutare il livello di cura e il risultato ottenibile con il nuovo approccio progettuale. La letteratura scientifica fornisce quindi parametri per identificare i livelli di maturità nell'adozione del BIM. Il lavoro di ricerca dell'associazione italiana ASSOBIM delinea lo stato dell'arte fornendo i riferimenti necessari per definire i livelli minimi di conoscenze da perseguire nei vari ambiti disciplinari, con riguardo a ciò che è espresso in UNI 11337 [54] che conduce all'identificazione dei 5 livelli di maturità. Tali livelli si basano sul BIMMI (BIM Maturity Index); i livelli di Bilal Succar sono 5, ma diventano 6 per il catalano BIM-Cat fino ai livelli "hard and soft" secondo i criteri del TNO olandese con il suo BIM Quickscan. I 5 livelli di maturità individuati da ASSOBIM sono:

- livello "0", non digitale: avviene il trasferimento del contenuto informativo principalmente su carta;
- livello "1", base: il trasferimento delle informazioni avviene attraverso il digitale elaborandone le informazioni, ma la riproduzione su carta rimane;
- livello "2", elementare: per ambiti disciplinari ambientali e tecnici, il trasferimento dei contenuti informativi avviene principalmente attraverso la grafica dei modelli informativi accompagnati da grafica digitale contenente informazioni specifiche per determinate esigenze di dettaglio;
- livello "3", avanzato: l'utilizzo del prodotto e del processo digitale appropriato alle schede informative facilitano il collegamento dei dati tra grafici e modelli informativi ed elaborazione delle informazioni;
- livello "4", ottimale: utilizzato per tutte le aree disciplinari, il trasferimento dei contenuti informativi avviene attraverso modelli, quest'ultimo è realizzato con le virtualizzazioni di coordinate.

La modellazione BIM pone particolare attenzione al Livello di Dettaglio (LOD) degli oggetti parametrici presenti e ciò cambia nel corso delle fasi di progettazione. Per ogni fase del progetto si definisce un livello di dettaglio a partire da un modello puramente concettuale sino ad un livello avanzato. Il LOD è definito non solo dalla definizione grafica dell'elemento, ma è identificato dalle proprietà del materiale utilizzato, dalle caratteristiche tecniche, dalla fase di progettazione, dagli aspetti strutturali, dalla

composizione dei componenti, dalla geolocalizzazione, dalle proprietà termiche. L'organizzazione BIMForum [55] ha definito 6 livelli di sviluppo (LOD) (100.200, 300.350.400.500):

- LOD 100: l'elemento del modello può essere rappresentato graficamente nel modello con un simbolo o una rappresentazione generica, ma non soddisfa i requisiti per LOD 200. Le informazioni relative all'elemento del modello (ad esempio, costo per piede quadrato, tonnellaggio di HVAC, ecc.) possono essere ricavate da altri elementi del modello. Secondo l'interpretazione BIMForum: gli elementi LOD 100 non sono rappresentazioni geometriche. Esempi sono informazioni allegate ad altri elementi o simboli del modello che mostrano l'esistenza di un componente ma non la sua forma, dimensione o posizione precisa. Tutte le informazioni derivate dagli elementi LOD 100 devono essere considerate approssimative;
- LOD 200: l'elemento del modello è rappresentato graficamente all'interno del modello come un sistema, un oggetto o un assieme generico con quantità, dimensioni, forma, posizione e orientamento approssimativi. Al modello possono essere allegate anche informazioni non grafiche. L'interpretazione del BIMForum è nel senso che in questo caso gli elementi LOD siano segnaposto generici. Possono essere riconoscibili come i componenti che rappresentano oppure possono essere volumi nello spazio. Tutte le informazioni derivate dagli elementi LOD 200 devono essere considerate approssimative;
- LOD 300: l'elemento del modello è rappresentato graficamente come un sistema, un oggetto o un assieme specifico in termini di quantità, dimensione, forma, posizione e orientamento. Al modello possono essere allegate anche informazioni non grafiche. L'interpretazione del BIMForum suggerisce che la quantità, la dimensione, la forma, la posizione e l'orientamento dell'elemento così come progettato possono essere misurati direttamente dal modello senza fare riferimento a informazioni non modellate come note o richiami dimensionali. L'origine del progetto è definita e l'elemento è posizionato con precisione rispetto all'origine del progetto;
- LOD 350: il modello è rappresentato graficamente come un sistema, un oggetto o un assieme specifico in termini di quantità, dimensione, forma, posizione, orientamento e interfacce con altri sistemi edilizi. Al modello possono essere allegate anche informazioni non grafiche. L'interpretazione del BIMForum intende che vengono modellate le parti necessarie per il coordinamento dell'elemento con elementi vicini o attaccati. Queste parti includeranno elementi quali supporti e connessioni. La quantità, la

dimensione, la forma, la posizione e l'orientamento dell'elemento così come progettato possono essere misurati direttamente dal modello senza fare riferimento a informazioni non modellate come note o richiami dimensionali;

- LOD 400: il modello è rappresentato graficamente all'interno del modello come un sistema, un oggetto o un assieme specifico in termini di dimensioni, forma, posizione, quantità e orientamento, con informazioni dettagliate, di fabbricazione, di assemblaggio e di installazione. Al modello possono essere allegate anche informazioni non grafiche. L'interpretazione del BIMForum è nel senso che un elemento LOD 400 è modellato con sufficiente dettaglio e precisione per la fabbricazione del componente rappresentato. La quantità, la dimensione, la forma, la posizione e l'orientamento dell'elemento così come progettato possono essere misurati direttamente dal modello senza fare riferimento a informazioni non modellate come note o richiami dimensionali;
- LOD 500: non usato nella pratica di modellazione BIM, ha che il modello è una rappresentazione verificata sul campo in termini di dimensione, forma, posizione, quantità e orientamento. Agli Elementi del Modello possono essere allegate anche informazioni non grafiche. L'interpretazione del BIMForum suggerisce che poiché LOD 500 si riferisce alla verifica sul campo e non è un'indicazione di progressione verso un livello superiore di geometria degli elementi del modello o di informazioni non grafiche, questa Specifica non lo definisce né lo illustra.

3.5.1 Modellazione digitale e gestione energetica avanzata

Nel presente lavoro, la modellazione BIM non è stata utilizzata come semplice restituzione geometrica dell'edificio, ma come ambiente di organizzazione delle informazioni necessarie alla successiva modellazione energetica. Il processo ha previsto, in primo luogo, la ricostruzione della geometria dell'edificio a partire dagli elaborati disponibili e dai rilievi effettuati; successivamente sono state associate agli elementi edilizi le principali informazioni termofisiche, quali stratigrafie, trasmittanze, caratteristiche delle superfici opache e trasparenti e dati dimensionali.

Il passaggio dal modello BIM al modello BEM ha richiesto una fase di semplificazione energetica, necessaria per trasformare il modello geometrico-informativo in un modello adatto alla simulazione dinamica. In questa fase sono state definite le zone termiche, eliminati o semplificati gli elementi geometrici non rilevanti ai fini energetici, verificata la coerenza delle superfici disperdenti e attribuite le condizioni al contorno. Tale operazione è fondamentale, poiché il livello di dettaglio necessario per la modellazione BIM non coincide necessariamente con quello richiesto per la simulazione energetica.

Il modello BEM è stato quindi configurato inserendo i dati climatici, i profili di occupazione, gli orari di funzionamento, i carichi interni, i sistemi di illuminazione, le caratteristiche degli impianti HVAC e, anche se in modo semplificato e derivante da assunzioni, le informazioni relative alla refrigerazione commerciale. La costruzione del modello energetico ha seguito un criterio progressivo: inizialmente è stato definito lo stato di fatto, successivamente il modello è stato confrontato con i consumi reali e infine sono stati implementati gli scenari di intervento.

L'interoperabilità tra BIM e BEM è intesa non come trasferimento automatico e integrale di tutte le informazioni, ma come processo controllato di selezione, verifica e rielaborazione dei dati rilevanti ai fini della simulazione. Questa scelta è coerente con la complessità degli edifici analizzati con carichi elettrici elevati, orari di funzionamento estesi e vincoli operativi che rendono necessaria una modellazione energetica specificamente adattata al caso studio.

L'integrazione tra BIM, BEM e con un approccio propedeutico alla costruzione ed implementazione di un Digital Twin rappresenta una delle principali prospettive efficaci per la gestione energetica avanzata degli edifici retail della GDO.

L'approccio integrato consente di sviluppare modelli dinamici in grado di combinare i dati geometrici e costruttivi dell'edificio con le simulazioni energetiche in regime dinamico. Inoltre, il modello digitale permette un monitoraggio in tempo reale integrato a sistemi IoT e strategie di controllo predittivo, che oltre a permettere un'ispezione immediata e una gestione efficiente del sistema edificio-impianto, ne agevola e rende ottimale lo sviluppo di soluzioni progettuali future.

L'utilizzo di piattaforme interoperabili consente, in prospettiva, una gestione maggiormente adattiva dei consumi energetici, migliorando l'efficienza operativa dei sistemi HVAC e refrigerazione e supportando attività di manutenzione predittiva.

Nel contesto dei retail alimentari, caratterizzati da elevata complessità impiantistica e forte variabilità dei carichi energetici, tali strumenti assumono un ruolo rilevante nel supporto alle future strategie di decarbonizzazione del settore.

Nel presente lavoro il riferimento al Digital Twin deve essere inteso in senso metodologico e prospettico, e non come implementazione completa di un gemello digitale operativo. Un Digital Twin in senso stretto presuppone infatti una connessione dinamica e continuativa tra sistema fisico e modello digitale, alimentata da dati rilevati in campo mediante sensori, sistemi di monitoraggio e piattaforme di gestione, con possibilità di aggiornamento, retroazione e supporto decisionale operativo.

Nel caso dei punti vendita analizzati, la disponibilità dei dati non consente l'implementazione di un Digital Twin pienamente dinamico. Il lavoro sviluppa invece una struttura BIM-BEM interoperabile, calibrata sulla base dei dati disponibili e orientata alla predisposizione di un ambiente digitale che possa, in successive fasi applicative, essere

integrato con sistemi IoT, sensoristica in continuo e in tempo reale e piattaforme di gestione e programmazione energetica. Per tale ragione, l'approccio proposto può essere definito come propedeutico al Digital Twin, poiché costruisce le basi informative e modellistiche necessarie per uno sviluppo futuro verso sistemi digitali dinamici di monitoraggio e controllo.

3.6 Analisi dei cambiamenti climatici

In modo inequivocabile le attività antropiche in rapido aumento sul nostro pianeta stanno riscaldando il clima ad un ritmo sempre più veloce [56]. Il ritmo di tali attività, se non controllato, rappresenta una seria minaccia per il futuro del nostro ecosistema quindi, inevitabilmente, anche per l'ambiente costruito [57]. L'attività dell'uomo e le sue conseguenze, innescano una risposta climatica importante per l'ecosistema e per le future generazioni. Nel contesto del sistema terrestre, la risposta climatica si manifesta come un fattore di amplificazione del flusso di carbonio, agendo attraverso i suoi effetti sulla secchezza della superficie terrestre [58]. Tra gli effetti rientrano, ad esempio, lo scongelamento del permafrost [59], l'essiccazione delle zone umide [60], l'aumento della frequenza e dell'intensità degli incendi boschivi [61], nonché l'incremento della CO₂ dagli ecosistemi terrestri e oceanici diminuendone la capacità di assorbimento di quest'ultima [62]. Tutto questo provoca un aumento degli eventi catastrofici (ad esempio, inondazioni, uragani, siccità, condizioni meteorologiche estreme, ecc.) e di eventi non catastrofici come l'innalzamento del livello del mare [63].

Gli scenari climatici futuri al 2050 e al 2070 sono stati introdotti con la finalità di analisi e di affidabilità degli interventi di riqualificazione energetica. Tali scenari non devono essere interpretati come previsione dell'assetto reale dell'edificio e dei suoi impianti negli anni considerati.

In particolare, l'applicazione ed implementazione del metodo trascura le fasi legate alle trasformazioni tecniche e tecnologiche, impiantistiche ed energetiche nonché dei mercati economici-finanziari. Infatti, i punti vendita sono soggetti a cicli di ristrutturazione, riconfigurazione degli spazi, aggiornamento impiantistico e sostituzione tecnologica generalmente molto più brevi rispetto all'orizzonte temporale 2050–2070. Anche se la letteratura dimostra che, soprattutto le tecnologie di refrigerazione, seguono aggiornamenti molto meno veloci rispetto ad altre tecnologie impiantistiche come l'illuminazione o la climatizzazione. Inoltre, le decisioni degli operatori privati sono spesso orientate da tempi di ritorno dell'investimento sensibilmente inferiori a 30 anni.

L'utilizzo degli scenari climatici futuri ha quindi lo scopo di valutare la risposta energetica dell'edificio e degli scenari di intervento rispetto a condizioni climatiche progressivamente differenti, con particolare riferimento all'aumento delle temperature

esterne, alla variazione dei fabbisogni di raffrescamento e riscaldamento e alla possibile modifica dell'efficacia relativa delle strategie di retrofit.

L'analisi assume carattere di analisi della robustezza degli scenari proposti nella riqualificazione del sistema edificio-impianto e non di carattere gestionale di lungo periodo. In questa ottica gli scenari futuri consentono di isolare l'effetto della variabile climatica sul comportamento energetico dell'edificio, mantenendo invariati gli altri parametri modellistici, salvo diversa indicazione.

Nello specifico, per esplicitare la metodologia adottata, si analizzano gli effetti degli scenari proposti per un clima tipico del centro Italia che rappresenta la zona di studio della presente ricerca.

I dati meteorologici necessari al corretto studio vengono ottenuti tramite registrazioni storiche provenienti dalle stazioni meteorologiche regionali installate in prossimità dell'edificio. Se tali dati non sono disponibili, è necessario effettuare una campagna di monitoraggio basata su un apparato sperimentale dedicato.

L'Anno Meteorologico Tipico (TMY) è stato ottenuto tramite il database di climate.onebuilding.org [64] per valutare la prestazione energetica dell'edificio analizzato in condizioni meteorologiche statisticamente rappresentative. Il TMY è un insieme di dati meteorologici con valori di dati per ogni ora dell'anno per una determinata posizione geografica. I dati sono selezionati tra i dati orari per l'intero periodo di tempo disponibile, attualmente 2005-2020 in PVGIS 5.2 e 2005-2016 in PVGIS 5.1 [65]. PVGIS genera un TMY seguendo la procedura ISO 15927-4 [66].

I dati meteorologici sono stati inseriti nel BEM per valutare in modo accurato il consumo energetico e le prestazioni ambientali. Successivamente, il file climatico TMY è stato utilizzato per generare i file climatici previsti per gli anni futuri 2050 e 2070. I dati dei file climatici degli scenari futuri sono stati generati utilizzando il software Meteonorm [67]. La tecnica di morphing applicata utilizza dati climatici storici, incorporando misurazioni meteorologiche rappresentative, insieme a modelli di cambiamento climatico globale previsti ottenuti attraverso la modellazione numerica al computer [68]. Questa combinazione genera una nuova serie di scenari climatici futuri previsti. Sfruttando i dati climatici registrati come base per le previsioni future, questo approccio garantisce la continuità temporale e il ridimensionamento spaziale.

Questo studio considera lo scenario del cambiamento climatico A1B [69], che si basa sul presupposto che ci sarà un aumento della temperatura dell'aria di un massimo di 4,4 °C fino alla fine del 21° secolo.

Le condizioni di riscaldamento e raffreddamento sono state analizzate sulla base della stazione climatica del Servizio Meteorologico Nazionale per lo scenario A1B. Le seguenti equazioni (1) e (2) [13][70][71] sono state utilizzate per calcolare rispettivamente i gradi giorno di riscaldamento (HDD) e i gradi giorno di raffreddamento (CDD) [13][70][71].

$$HDD = \sum_1^z (T_{ht} - T_a) \quad (1)$$

$$CDD = \sum_1^z (T_a - T_{ct}) \quad (2)$$

dove z è il numero di giorni di riscaldamento, T_{ht} è la soglia di riscaldamento, T_{ct} è la soglia di raffreddamento e T_a è la temperatura media dell'aria di un giorno di riscaldamento o raffreddamento, rispettivamente.

La tabella 4 mostra i diversi HDD e CDD negli anni studiati. L'aumento previsto delle temperature è evidente nei due scenari meteorologici futuri.

Year	HDD	CDD
Current	2470	35
2050	1737	169
2070	1614	218

Tabella 4. HDD e CDD nelle condizioni dell'anno in corso, 2050 e 2070.

Nella figura 4, il valore t è una distribuzione gaussiana espressa tramite l'equazione (3) [72].

$$t = \frac{H}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_e - T_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

dove H rappresenta il totale delle ore di riscaldamento, σ è la deviazione standard calcolata secondo l'equazione (4) [72], con T_p è la temperatura di progetto, T_e è la temperatura esterna in °C e T_m è la temperatura esterna media nei gradi giorno di riscaldamento espressa dall'equazione (5).

$$\sigma = \frac{20 - T_p}{5} \quad (4)$$

$$T_m = \frac{HDD}{days} \quad (5)$$

La figura 4 illustra la distribuzione delle ore durante il periodo di riscaldamento nei vari intervalli di temperatura per l'anno in corso (2022), 2050 e 2070. Dall'analisi dei dati, come si può individuare anche dalle curve del plotter in figura 4, si registra un notevole spostamento nella distribuzione delle ore verso intervalli di temperatura più elevati man mano che ci spostiamo dal 2022 al 2070. Ciò indica che è previsto un aumento complessivo delle temperature nel tempo.

Nell'anno in corso la distribuzione è più concentrata negli intervalli di temperatura più bassi, con picchi intorno ai 10-12°C. Ci sono relativamente meno ore nelle fasce di temperatura più elevate, con un forte calo dopo 20-22°C. Nel 2050, il picco si sposta verso destra, concentrandosi attorno agli intervalli 12-14°C e 14-16°C. Si registra un

aumento di circa il 30% nel numero di ore negli intervalli di temperatura più elevati (ad esempio, 16-18°C ed oltre) rispetto alle condizioni attuali. Nel 2070, il picco continua a spostarsi ulteriormente a destra, attorno alle temperature 14-16°C e 16-18°C. Dall'analisi dei dati si ha circa il 31% in più di ore in intervalli di temperatura ancora più elevati (superiori ai 20°C). Inoltre, nel 2070, gli intervalli di temperatura più bassi (inferiori a 7°C) vedranno una drastica riduzione (circa -42%) del numero di ore. Lo spostamento verso temperature più elevate nel corso dei decenni indica una chiara tendenza al riscaldamento, che è coerente con le proiezioni dei modelli climatici globali in scenari di continue emissioni di gas serra.

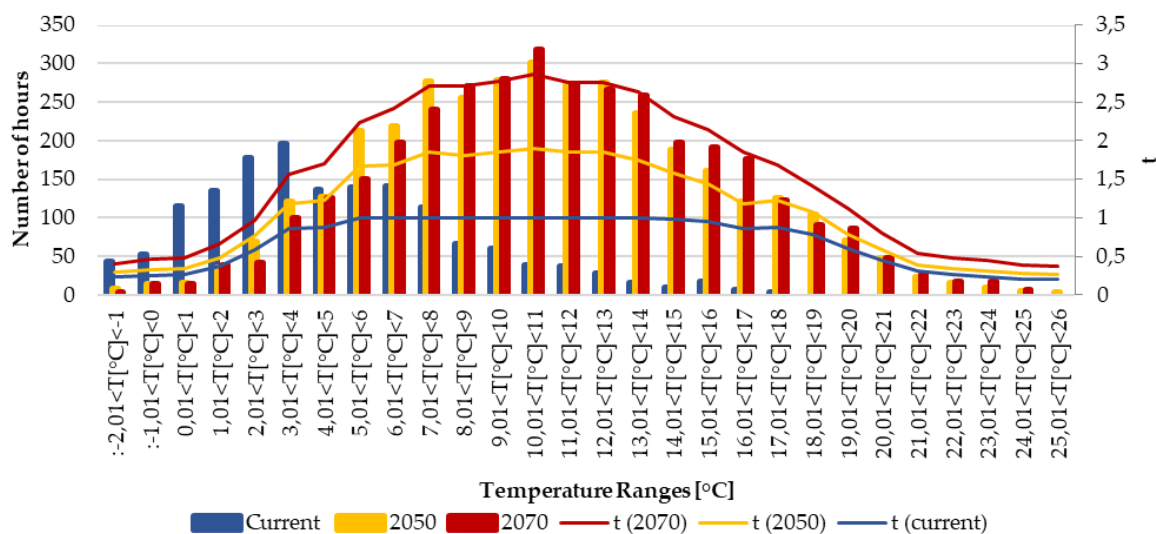


Figura 4. Distribuzione delle ore durante il periodo di riscaldamento (22 ottobre – 7 aprile) in vari intervalli di temperatura ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$) per l'anno 2022, 2050 e 2070.

La figura 5 illustra la distribuzione delle ore durante il periodo di raffreddamento (non riscaldamento) nei vari intervalli di temperatura per l'anno 2022, 2050 e 2070.

Nell'anno 2022 la distribuzione è più concentrata nell'intervallo 18-22°C. Si registra un notevole spostamento nella distribuzione delle ore verso intervalli di temperatura più elevati man mano che ci spostiamo dal 2022 al 2070. Ciò indica un previsto aumento complessivo delle temperature nel tempo.

Nell'anno in corso la distribuzione si concentra maggiormente negli intervalli di temperatura più bassi, con picchi intorno ai 10-12°C. Nel 2050 e nel 2070, il picco si sposta verso destra, concentrandosi attorno alle temperature 24-25°C e 28-29°C. Nel 2070, il picco continua a spostarsi più a destra, attorno agli intervalli 14-16°C e 16-18°C.

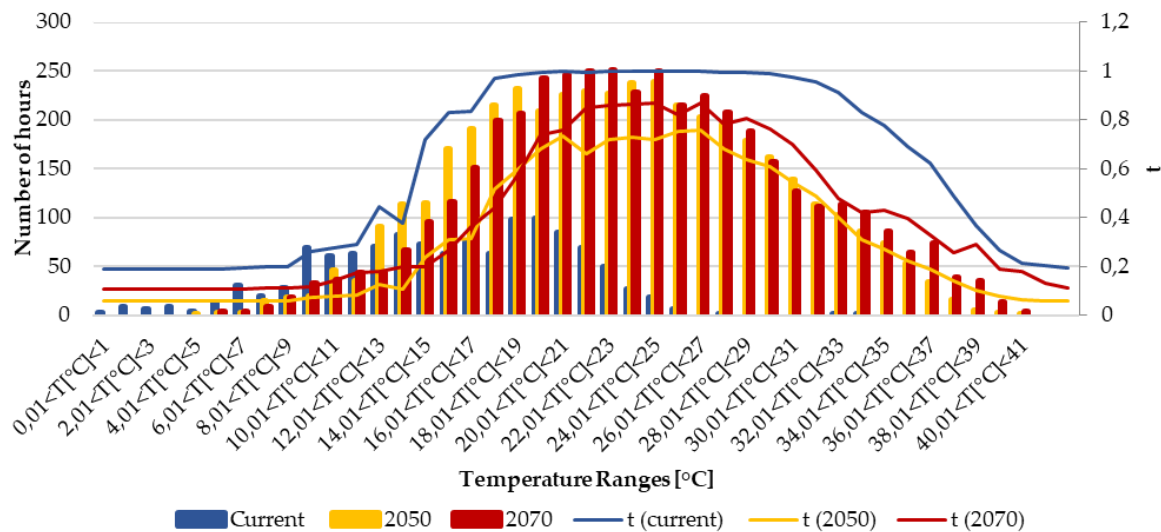


Figura 5. Distribuzione delle ore durante il periodo di raffreddamento (non riscaldamento) (5 giugno – 5 settembre) in vari intervalli di temperatura ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$) per l'anno 2022, 2050 e 2070.

I risultati denotano l'effettivo profilo di consumo energetico (baseline) evidenziando i principali fattori che contribuiscono nella specifica attività dei retail alimentari, quali refrigerazione, illuminazione, sistema HVAC e altre apparecchiature. Il consumo energetico dello stato di fatto (baseline) è stato analizzato utilizzando i risultati delle simulazioni dinamiche BEM nello scenario climatico negli anni 2022, nel 2050 e nel 2070.

3.7 Definizione delle strategie

Definire le strategie proposte è fondamentale nel metodo adottato poiché rappresenta il passaggio dallo stato di fatto alla formulazione di soluzioni ottimali ed operative, finalizzate al miglioramento delle prestazioni energetiche e ambientali del sistema edificio-impianto.

Le soluzioni proposte, oltre che essere di facile applicazione ed economicamente vantaggiose per l'imprenditore, sono definite secondo un approccio sistemico e integrato. La singola strategia è valutata ed analizzata in un'ottica interattiva, considerando il concorso di altre strategie. Ciò consente un approccio settoriale, favorendo una valutazione reale e complessiva del sistema.

La selezione delle strategie segue criteri tecnici, energetici, ambientali ed economici. Dal punto di vista energetico, gli interventi sono individuati in funzione del loro potenziale di riduzione dei consumi e dei picchi di domanda, nonché del miglioramento dell'efficienza dei singoli sottosistemi. Dal punto di vista ambientale, viene considerato l'impatto in termini di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e di integrazione di

soluzioni a basso impatto ambientale. Dal punto di vista economico e gestionale, le strategie sono valutate tenendo conto della fattibilità tecnica, dei costi di investimento, dei tempi di ritorno e della compatibilità con le esigenze operative tipiche dei punti vendita della GDO.

Gli scenari di intervento simulati consentono di valutare in modo quantitativo e qualitativo l'efficacia della singola soluzione e l'integrazione con le altre rispetto allo stato di fatto.

In coerenza con l'assetto del metodo ivi proposto, le strategie sono state suddivise in quattro principali categorie: interventi sull'involucro edilizio, interventi sugli impianti, interventi sui sistemi di illuminazione artificiale e integrazione delle fonti di energia rinnovabile. La classificazione precedentemente accennata consente una lettura chiara e strutturata delle soluzioni analizzate, mantenendo al contempo una visione unitaria e integrata del processo di riqualificazione energetica.

3.7.1 Involucro

Gli interventi di riqualificazione energetica fondati sullo studio dell'involucro edilizio dell'edificio possono prevedere l'impiego di diverse tecnologie a seconda della superficie su cui intervenire. La definizione degli interventi sull'involucro edilizio consente di migliorare la prestazione energetica dell'edificio, garantendo il rispetto dei valori della norma UNI EN ISO 6946 [73].

In particolare, per le pareti verticali dell'involucro opaco degli edifici esistenti, le tecnologie di maggiormente utilizzate comprendono:

- l'isolamento, sia interno che esterno, dell'involucro esistente con materiali caratterizzati da una bassa trasmittanza termica;
- sistemi con pareti ventilate;
- l'isolamento corretto dei ponti termici;

Per quanto riguarda, invece, le coperture di edifici esistenti, le tecniche di intervento possono essere, come per l'involucro verticale, effettuate con l'interposizione di materiali a bassa trasmittanza termica sia dall'interno che dall'esterno. Inoltre, soprattutto negli edifici di nuova realizzazione, risulta interessante la realizzazione di coperture verdi che permettono di ridurre la trasmittanza termica del tetto e di ottenere i relativi benefici ambientali ed estetici. Tuttavia, tale soluzione si rivela di difficile applicazione negli edifici retail esistenti, in quanto la realizzazione comporta costi elevati, disincentivando l'imprenditore ad adottarla.

Infine, per le superfici trasparenti, la tecnica più frequentemente applicata consiste nella sostituzione degli infissi esistenti con nuovi infissi dotati di vetrate termoisolante a due o più lastre con intercapedine di aria o gas argon.

L'obiettivo perseguito da questo lavoro è quello di procedere alla riqualificazione energetica dell'edificio intervenendo tramite soluzioni di facile applicazione e replicabilità negli edifici esistenti salvaguardando gli ingombri in pianta ed evitando disagi sia ai consumatori lavoratori; limitando i periodi di sospensione delle attività, ma soprattutto contenendo la spesa in modo da consentire un tempo di ritorno dell'investimento quanto più accettabile possibile. Per realizzare ciò, gli interventi previsti sono:

- l'isolamento esterno dell'edificio con materiali a bassa trasmittanza termica;
- l'isolamento della copertura esistente;
- la sostituzione degli infissi esistenti con infissi con migliori prestazioni termiche.

3.7.2 Impianti

La razionalizzazione energetica dell'edificio avviene anche mediante azioni mirate all'incremento del rendimento globale medio stagionale degli impianti tecnologici, attraverso interventi di natura impiantistica, gestionale e regolativa.

Negli edifici del retail appartenenti alla GDO, i consumi energetici sono caratterizzati da un'elevata incidenza dei sistemi di refrigerazione alimentare e degli impianti di climatizzazione, che nel loro complesso possono rappresentare la quota prevalente del fabbisogno energetico annuale. Tale configurazione energetica rende strategico l'intervento sui sottosistemi frigoriferi, non solo in termini di efficienza intrinseca delle macchine, ma anche in un'ottica di integrazione termica con il resto dell'edificio.

Nel presente lavoro vengono analizzate soluzioni tecniche contraddistinte da un'elevata applicabilità, ridotto grado di invasività e ampia replicabilità sull'intero patrimonio edilizio della GDO. Tra le varie soluzioni, assume particolare rilevanza il recupero del calore di scarto proveniente dagli impianti di refrigerazione commerciale. Il calore rigettato ai condensatori, opportunamente intercettato mediante scambiatori di calore e sistemi di accumulo inerziale, può essere valorizzato per il preriscaldamento dell'aria di rinnovo nelle unità di trattamento aria e per l'integrazione al sistema di riscaldamento degli ambienti.

Ulteriore intervento di comprovata efficacia risulta essere la chiusura dei banchi frigoriferi aperti mediante l'installazione di porte o sistemi trasparenti scorrevoli. I banchi aperti determinano, infatti, elevati carichi termici latenti e sensibili dovuti a infiltrazioni d'aria ambiente, con conseguente aumento del lavoro dei compressori, dell'accumulo di brina sugli evaporatori e compromissione delle condizioni termoigrometriche interne. La chiusura dei banchi favorisce la riduzione delle potenze frigorifere richieste, il miglioramento della stabilità termica del prodotto, la diminuzione dei cicli di sbrinamento e la riduzione dei carichi per il sistema di climatizzazione ambiente.

Dal punto di vista sistemico, tali interventi generano un effetto sinergico tra refrigerazione e climatizzazione, riducono le interferenze termo-fluidodinamiche tra i sottosistemi e consentono una gestione più efficiente dei carichi interni. Nel loro insieme, le suddette strategie contribuiscono al miglioramento dell'Indice di Prestazione Energetica dell'edificio, alla riduzione dei costi operativi e all'incremento della riduzione delle emissioni operative del settore retail della GDO, configurando un modello di intervento tecnicamente fondato, economicamente sostenibile e facilmente estendibile su larga scala.

3.7.3 Illuminazione

Fin dalla Direttiva Europea 2002/91/CE [23] è stata dedicata particolare attenzione ai consumi energetici legati all'illuminazione artificiale degli ambienti. Nel caso degli edifici destinati ai retail della Grande Distribuzione Organizzata, tale voce di consumo rappresenta circa il 30% del totale dell'energia elettrica utilizzata. Ne consegue che l'efficientamento dei sistemi di illuminazione artificiale costituisce un'azione prioritaria e necessaria ai fini della riduzione dei consumi energetici complessivi.

Le soluzioni di retrofit degli impianti di illuminazione rappresentano quindi una delle strategie più efficienti e di facile implementazione negli edifici esistenti per migliorare le prestazioni energetiche, in virtù della loro elevata incidenza sul totale dei consumi. I retrofit dell'impianto di illuminazione consentono di ottenere riduzioni significative dei fabbisogni energetici tramite l'adozione di tecnologie ad alta efficienza, senza necessità di interventi invasivi sull'impianto esistente o sulle attività commerciali, aspetto particolarmente rilevante per edifici caratterizzati da orari di apertura prolungati e continuità di esercizio.

Gli interventi di retrofit comprendono principalmente la sostituzione delle sorgenti luminose tradizionali con sistemi a LED ad elevata efficienza e lunga vita utile, l'ottimizzazione della distribuzione luminosa in funzione delle specifiche esigenze dei reparti di vendita e l'integrazione di sistemi DALI e Konnex per un efficiente e corretto controllo e regolazione del flusso luminoso. Nello specifico, l'adozione di sistemi di dimmerazione, sensori di presenza e soprattutto di illuminamento naturale, nonché protocolli di comunicazione digitali quali sistemi DALI e Konnex, consentono di adeguare velocemente le esigenze di illuminamento alle condizioni operative e ambientali, riducendo le ore di funzionamento a pieno carico e migliorando il comfort visivo sia per gli utenti che per i lavoratori.

Oltre ai benefici energetici diretti, il retrofit dell'illuminazione produce effetti indiretti positivi sulla gestione termica degli ambienti, contribuendo alla riduzione dei carichi interni e, conseguentemente, dei fabbisogni dei sistemi HVAC. Tali soluzioni, se integrate all'interno di un sistema di gestione energetica dell'edificio, permettono inoltre di

monitorare le prestazioni nel tempo e di massimizzare l'efficacia degli interventi, rendendo il retrofit dell'impianto di illuminazione una misura chiave nei processi di riqualificazione energetica dei retail della GDO.

Per quanto riguarda nello specifico la modellazione dell'illuminazione nel modello BEM dei casi studio, questa è stata sviluppata distinguendo tra lo stato di fatto dell'impianto di illuminazione artificiale e gli scenari di intervento basati sulla massimizzazione dell'uso della luce naturale attraverso un suo controllo dinamico e sulla regolazione del flusso luminoso dei corpi illuminanti prevalentemente LED per una combinazione ottimale tra luce naturale ed artificiale. La modellazione energetica dell'impianto dedicato all'illuminazione è stata sviluppata tramite EnergyPlus con interfaccia grafica DesignBuilder, utilizzando oggetti di lighting schedule e daylighting control per rappresentare il funzionamento dell'impianto di illuminazione e la riduzione del flusso artificiale in funzione dell'illuminazione naturale disponibile.

Per lo stato di fatto, il sistema di illuminazione è stato rappresentato mediante la potenza elettrica installata degli apparecchi, la distribuzione degli apparecchi nelle diverse zone dell'edificio, gli orari di funzionamento e i profili di accensione associati all'utilizzo del punto vendita. Il consumo elettrico annuo per illuminazione è quindi determinato dalla combinazione tra potenza installata, fattore di utilizzo e durata di funzionamento.

Nel modello BEM, il carico elettrico per illuminazione è stato assegnato alle zone termiche interessate come carico interno associato al funzionamento degli apparecchi illuminanti. Tale carico contribuisce al consumo elettrico diretto e, quando considerato nel bilancio termico del sistema edificio-impianto, anche agli apporti termici interni che incidono sui fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento.

Le simulazioni riguardano non solo le condizioni illuminotecniche, ma anche tutte le condizioni legate agli effetti indiretti sia sui consumi, non solo dell'illuminazione, ma in generale del sistema edificio-impianto e degli effetti sui carichi termici successivamente all'introduzione di illuminazione naturale.

Per valutare le prestazioni degli interventi di introduzione di illuminazione naturale (quali lucernai) ed efficientamento dell'illuminazione artificiale, sono stati definiti e calcolati tre Key Performance Indicators (KPIs):

- Efficacia energetica reale;
- Controllo dell'illuminazione;
- Impatto ambientale.

Un valore pari a 1 degli indicatori proposti rappresenta il valore massimo raggiungibile indicando la prestazione ottimale per il parametro considerato. La definizione di ciascun KPI considerato è:

- **Efficacia energetica reale:** definito dall'espressione (6), è definito come il rapporto tra il risparmio elettrico effettivo ottenuto e il risparmio massimo ottenibile, corrispondente al consumo elettrico di base nelle condizioni esistenti. Fornisce una misura quantitativa dell'efficacia con cui le strategie di miglioramento delle prestazioni energetiche si comportano rispetto al loro potenziale teorico. Quantifica inoltre la capacità di uno scenario di ammodernamento di ridurre il consumo totale di elettricità rispetto alla condizione di base. Rappresenta l'effettivo risparmio energetico ottenuto, tenendo conto delle interazioni tra tutti gli usi finali (illuminazione, HVAC, refrigerazione).

Il KPI si calcola dividendo il risparmio energetico realizzato per il massimo risparmio possibile. Utilizzando questa metrica è possibile valutare l'efficacia degli aggiornamenti architettonici e degli interventi tecnologici nel ridurre la domanda di energia. È definito da:

$$\text{Efficacia energetica reale} = \frac{\text{Energia risparmiata [kWh]}}{\text{Massimo risparmio di elettricità ottenibile [kWh]}} \quad (6)$$

dove Energia risparmiata è il consumo annuo di elettricità di base meno il consumo di elettricità dopo la ristrutturazione, e il massimo risparmio di elettricità possibile è il consumo di elettricità di base, perché rappresenta l'energia massima che potrebbe essere risparmiata se l'edificio non consumasse elettricità dalla rete.

Questo parametro adimensionale consente un confronto coerente dei risparmi energetici e aiuta a identificare e gestire i principali fattori che determinano il consumo energetico. Un valore pari a 1 rappresenta il massimo risparmio energetico teorico, mentre 0 equivale a nessun miglioramento.

- **Controllo dell'illuminazione:** definito dall'espressione (7), questo parametro viene calcolato come il rapporto tra il risparmio di energia di illuminazione dopo l'implementazione della soluzione di retrofit e il consumo di energia di illuminazione di base. Misura l'efficacia delle strategie di controllo dell'illuminazione, tra cui l'uso dell'illuminazione naturale, l'integrazione efficace con l'illuminazione artificiale (ad esempio, diodi a emissione luminosa (LED) con sistemi DALI (Digital Addressable Lighting Interface) e integrazione IoT). Un rapporto più elevato indica un sistema di illuminazione più efficiente, che riflette migliori prestazioni energetiche pur mantenendo livelli di illuminazione adeguati per diverse attività visive. I livelli appropriati di illuminazione vengono valutati mediante l'analisi del livello di radiazione solare interna. Inoltre, si ritiene che la progettazione di soluzioni di retrofit con analisi dell'irradiazione solare interna non raggiunga livelli di disagio o livelli dannosi per i prodotti alimentari. È definito da:

$$\text{Controllo dell'illuminazione} = \frac{\text{Energia per l'illuminazione risparmiata [kWh]}}{\text{Uso di energia per l'illuminazione stato di fatto [kWh]}} \quad (7)$$

dove il consumo energetico dello scenario di illuminazione è il consumo annuo di elettricità solo per l'illuminazione dopo l'ammodernamento e il consumo energetico di base dell'illuminazione è il consumo di elettricità per l'illuminazione prima dell'ammodernamento. Un valore pari a 1 è il massimo risparmio energetico teorico e 0 equivale a nessun miglioramento.

- **Impatto ambientale:** definito dall'espressione (8), questo KPI quantifica le emissioni, l'uso delle risorse e gli impatti ambientali e di ciascuno scenario di efficientamento proposto. Tiene conto di tutti gli scambi con l'ambiente (materiali, uso del suolo, acqua, energia ed emissioni) ed è espresso come il rapporto tra CO₂ risparmiata e l'effetto del riscaldamento globale dello scenario di base, calcolato utilizzando l'Eco-Indicator 99 [74]. Questo parametro quantifica le emissioni di CO₂ associate ai materiali e ai processi di costruzione durante l'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla costruzione alla fine del suo ciclo di vita, inclusi trasporto, metodi di costruzione e funzionamento del sistema. Misura i benefici ambientali degli interventi architettonici e tecnologici proposti: valori più alti indicano un minore impatto ambientale. Questo indicatore supporta la valutazione della sostenibilità e della prestazione energetica delle diverse strategie garantendo che le soluzioni selezionate contribuiscono a ridurre l'impronta di carbonio.

$$\text{Impatto ambientale} = \frac{\text{CO}_2 \text{risparmiata [kg CO}_2\text{e]}}{\text{GW effect [kg CO}_2\text{e]}} \quad (8)$$

Viene proposta una diagnosi energetica dell'edificio utilizzando un flusso di lavoro basato sul modello BIM per definire in modo corretto e reale l'architettura dell'edificio, i sistemi al suo interno e il contesto urbano esistente, generando un modello virtuale che funge da set di dati centrale per lo sviluppo di scenari di ammodernamento. Questo modello supporta quindi simulazioni dettagliate dell'illuminazione diurna, delle prestazioni HVAC e degli impatti ambientali.

Il modello BIM integra le diverse zone dell'edificio con diverse destinazioni d'uso, vale a dire, aree di vendita per prodotti specifici (frutta e verdura, carne e pesce, prodotti refrigerati, panetteria, prodotti generali e area di pagamento), magazzino, spazi per uffici, con la necessità di regolamentazione della circolazione e dell'accessibilità (ad esempio, dipendenti e clienti) e l'interazione di diversi sistemi come componenti edilizi e strutturali, sistema di illuminazione, HVAC, banchi refrigeranti e sistemi di gestione e regolazione. Il BIM rappresenta quindi un modello digitale dettagliato dell'edificio, integrando dati sulle caratteristiche architettoniche e termofisiche, sui sistemi di ammissione e controllo della luce diurna e sulle prestazioni energetiche complessive dell'edificio e dei suoi sistemi tecnici.

L'interoperabilità dei modelli BIM e BEM si propongono come tramite per l'ottenimento dei risultati energetici sviluppati tramite una simulazione energetica

dinamica per rappresentare accuratamente le prestazioni di base dell'edificio e valutare l'impatto degli interventi di ammodernamento proposti sul risparmio energetico e sull'impatto ambientale. Infatti, con tali modelli, oltre che ad ottenere le informazioni energetiche, è possibile ottenere dei modelli di impatto ambientale sia dello stato di fatto che dello stato di progetto disponendo di uno strumento che consente l'analisi della CO₂. Ciò significa che le prestazioni energetiche e ambientali di ogni scenario possono essere valutate utilizzando un unico modello virtuale. In questo contesto, si calcolano le prestazioni ambientali come CO₂ risparmiata, consentendo una valutazione comparativa della sostenibilità di scenari alternativi di progettazione e ammodernamento.

Il modello BIM è interoperabile con software di modellazione parametrica che consentono di ottenere le configurazioni geometriche desiderate per la costruzione dei lucernai proposti negli scenari futuri. In questo ambiente, le relazioni basate sui vincoli consentono la rapida generazione di configurazioni di ammodernamento alternative e la riconfigurazione dinamica dei componenti del tetto. La geometria del tetto è parametrizzata per esplorare diverse configurazioni del lucernario variando geometria, orientamento, tipo di vetratura e strategie di controllo. Questo approccio automatizza la generazione di scenari di progettazione e consente la loro valutazione in termini di comfort termico interno, prestazioni energetiche e impatto ambientale in diverse condizioni climatiche e profili di utilizzo.

3.7.4 Fonti di energia rinnovabile

La produzione di energia rinnovabile in loco, negli edifici destinati a retail della GDO, si realizza quasi sempre esclusivamente con la radiazione solare. Ciò è possibile perché nella maggioranza dei casi dei retail della GDO si hanno a disposizione grandi metrature per le coperture che permettono l'installazione di impianti fotovoltaici di grandi dimensioni. Tuttavia, la produzione di energia rinnovabile tramite pannelli fotovoltaici PV ha il limite di non generare energia durante le ore di buio perciò, considerata la presenza di banchi frigo e altri macchinari della catena del freddo perennemente in funzione, non si riesce a sopperire del tutto al consumo energetico durante l'intera giornata. Pertanto, il piano si basa sull'installazione di un impianto fotovoltaico di grande potenza nominale destinato a operare in parallelo alla rete elettrica di distribuzione. Gli impianti sono sempre dimensionati considerando un autoconsumo di circa il 100%. Evidentemente, il vantaggio economico risiede nella possibilità di non dover acquistare energia elettrica, riducendo così l'esposizione alle fluttuazioni del mercato.

Gli impianti fotovoltaici progettati in questa tipologia di edifici, sono collocati sempre sulla copertura al fine di massimizzare lo sfruttamento anche delle superfici di parcheggio esterno.

Per quanto concerne la stima di producibilità, poiché l'irraggiamento solare è una sorgente di energia aleatoria e solo statisticamente prevedibile, si fa riferimento alle produzioni derivanti dalle analisi energetiche dinamiche che sfruttano ed elaborano dati acquisiti con medie statistiche raccolte in tabelle di anni-tipo.

Nel settore dell'edilizia commerciale destinata alla Grande Distribuzione Organizzata (GDO), lo sfruttamento dell'energia solare rappresenta una strategia rilevante per la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti associate alla fase operativa degli edifici. L'integrazione delle fonti rinnovabili attraverso la produzione di energia tramite la radiazione solare può avvenire secondo due approcci distinti ma complementari: solare passivo e solare attivo, caratterizzati da differenti livelli di integrazione architettonica e impiantistica.

Le strategie di solare passivo comprendono l'insieme degli accorgimenti progettuali e costruttivi integrati nell'organismo edilizio, che consentono di massimizzare l'apporto solare e di ridurre i fabbisogni energetici senza il ricorso a impianti tecnici dedicati. Tali soluzioni si traducono nell'orientamento ottimale dell'edificio e delle superfici vetrate, l'uso controllato di lucernari e shed per l'illuminazione naturale delle aree, l'adozione di sistemi di schermatura solare (frangisole, brise-soleil) e l'impiego di elementi costruttivi ad elevata inerzia termica, quali pareti massicce, sistemi a cambiamento di fase (PCM) o soluzioni di accumulo termico passivo. Le suddette strategie risultano particolarmente efficaci nel mitigare i carichi termici estivi e migliorare il comfort interno, riducendo indirettamente il fabbisogno energetico dei sistemi HVAC.

I sistemi di solare attivo, invece, prevedono l'impiego di impianti tecnologici dedicati alla captazione, conversione e utilizzo dell'energia solare. Questi sistemi sono prevalentemente finalizzati alla produzione di energia elettrica e termica a supporto dei rilevanti carichi energetici. La trasformazione dell'energia solare in energia utile comporta inevitabili perdite di rendimento in ciascuna fase di conversione, in modo significativo nel caso della conversione fotovoltaica e ulteriormente accentuate qualora l'energia elettrica o termica venga successivamente trasformata mediante sistemi di cogenerazione o macchine ausiliarie.

Gli impianti di captazione solare più diffusi nel settore dei retail della GDO sono costituiti da pannelli fotovoltaici e collettori solari termici, mentre i sistemi ibridi fotovoltaico-termici (PVT) risultano, attualmente, meno diffusi a causa della maggiore complessità impiantistica e dei costi di investimento. I moduli fotovoltaici consentono la conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica, generalmente autoconsumata per alimentare i carichi elettrici continui dell'edificio, mentre i collettori solari termici trasformano l'energia solare in calore utilizzabile per la produzione di acqua calda sanitaria, per il preriscaldamento dei fluidi di impianto o, in casi più avanzati, per l'integrazione con sistemi di cogenerazione o trigenerazione.

Le tecnologie solari a bassa temperatura, tipicamente adottate negli edifici comprendono sistemi in cui un fluido termovettore (liquido o aria) viene riscaldato mediante collettori solari piani o sottovuoto, operanti a temperature generalmente inferiori a 100 °C e, in condizioni di regime, non superiori a 150 °C per i collettori a tubi evacuati. Tali sistemi risultano particolarmente adatti alle applicazioni di tipo civile e terziario, in cui le temperature di esercizio richieste sono compatibili con i servizi di riscaldamento e produzione di acqua calda.

Le tecnologie solari a media ed alta temperatura sono basate su sistemi a concentrazione parabolica lineare o puntuale che consentono di raggiungere temperature superiori ai 300 °C, ma risultano attualmente poco diffuse in ambito edilizio-impiantistico. Il loro impiego è, fino ad oggi, limitato a impianti sperimentali o a centrali di produzione di energia elettrica, sebbene i recenti sviluppi tecnologici ne prospettino una possibile applicazione futura anche su scala ridotta, sia per la generazione distribuita di energia elettrica sia per la produzione di calore di processo, eventualmente in combinazione con sistemi energetici tradizionali.

4. I casi studio

4. I casi studio

Lo studio sviluppato si concentra su casi studio dell'insegna Conad, acronimo di Consorzio Nazionale Dettaglianti. Il Conad si sviluppa quale società cooperativa a responsabilità limitata (S.c.a.r.l.) attiva nella GDO dal 1962 con l'obiettivo di riunire sotto un unico gruppo piccoli imprenditori del commercio al dettaglio promuovendo in tutto il territorio nazionale i prodotti locali. Il modello cooperativo di Conad consente ai negozianti di unirsi per ottenere vantaggi logistici, commerciali e di marketing, mantenendo però la propria autonomia imprenditoriale. Il sistema Conad si articola in una rete capillare di punti vendita gestiti direttamente dai soci affiliati che diventano i pilastri delle differenti cooperative presenti nel territorio nazionale. Il marchio Conad è presente sotto cinque differenti cooperative (Conad Nord Ovest, Conad Centro Nord, Commercianti Indipendenti Associati, Conad Adriatico e PAC2000A Conad), che a loro volta fanno parte del consorzio nazionale. Nello specifico, i casi studio della ricerca condotta si concentrano nel centro Italia e sono affiliati alla cooperativa PAC 2000A Conad, la quale conta oltre 1257 punti vendita dislocati in Umbria, Lazio, Campania, Calabria e Sicilia come illustrato in figura 6 e si conferma la più grande delle cinque cooperative.

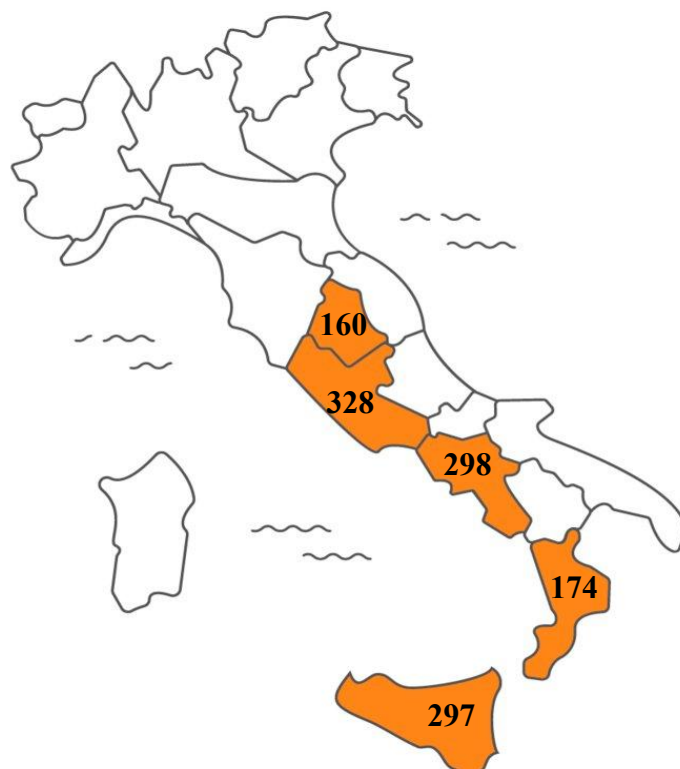


Figura 6. Distribuzione dei punti di vendita affiliati a PAC 2000A Conad nel territorio nazionale.

4.1 Generalità e descrizione delle tipologie di edifici

La GDO è un sistema di vendita al dettaglio e consiste principalmente in supermercati e ipermercati, differenziati tra loro in base alle dimensioni. A seconda della classificazione richiesta, un punto di vendita si divide nei vari reparti o dal punto di vista dell'utilizzo dell'area calpestabile disponibile:

- Area di vendita, cioè la zona aperta al pubblico dove sono esposte le merci destinate alla vendita; in questa area sono comprese anche le superfici occupate da banchi, scaffalature e dalle casse;
- Superficie accessoria, cioè la zona non aperta al pubblico, compresi i magazzini, depositi, uffici e locali destinati alla lavorazione delle merci.

Le diverse zone sopra descritte si suddividono a loro volta in base all'organizzazione delle merci all'interno del punto di vendita. Quest'ultimo sarà caratterizzato principalmente dalle seguenti aree:

- Area vendita prodotti vari;
- Gastronomia;
- Macelleria;
- Ortofrutta;
- Pescheria;
- Area casse.

Ogni reparto elencato richiede la presenza dei diversi elementi riportati nella tabella 5 e di differenti impianti atti a consentire la corretta conservazione dell'alimento e, di conseguenza, offrire al cliente un servizio appropriato.

Reparto	Elementi necessari
Area di vendita prodotti vari	Scaffalature per i prodotti che non richiedono una conservazione ad alte o basse temperature
Gastronomia	Forni, banco caldo, boiler, girarrosto, cappa gastronomia, cappa girarrosto, affettatrici, retro-banco refrigerato, abbattitori, tavolo per le farciture, lampade insetticida e schermi per la gestione delle code
Macelleria	Affettatrici, tritacarne, compattatore, scaldabagno, lampade insetticida e schermi per la gestione delle code
Ortofrutta	Bilancia etichettatrice, lampade insetticida
Pescheria	Macchinari per la pulizia del pesce, fabbricatore di ghiaccio, acquario, pompa tritarifiuti, lampade insetticida e schermi per la gestione delle code.

Tabella 5. Elementi presenti in base al reparto.

4.1.1 Il sistema di refrigerazione alimentare nella GDO

Il complesso sistema della refrigerazione alimentare nei supermercati è composto generalmente dalle centrali frigorifere che producono il flusso freddo e dalle utenze (banchi frigo e celle) che distribuiscono il flusso freddo e conservano le merci alla temperatura richiesta. Generalmente, nei punti di vendita la refrigerazione si suddivide in:

- Refrigerazione alimentare a Temperatura Normale (TN): la temperatura d'aria all'uscita di evaporatore è compreso tra 0 e 6 °C;
- Refrigerazione alimentare a Bassa Temperatura (BT): la temperatura d'aria all'uscita di evaporatore è compreso tra -6 e -20°C.

Nel presente lavoro di tesi, le celle alimentari e alcuni banchi frigo chiusi, come quelli per le merci surgelate, sono a BT; gli altri banchi frigo aperti o chiusi sono a TN per conservare merci quali carne e pesce. All'interno di tali edifici viene considerata preventiva la separazione tra la zona fredda e la zona a temperatura ambiente per permettere una migliore efficienza dal punto di vista energetico.

I banchi frigo siti nelle due zone sopra descritte si differenziano tra di loro generalmente per la presenza o meno di chiusure che permettono una migliore conservazione della loro temperatura interna. Infatti, la maggior parte dei banchi frigo a temperatura normale sono aperti, mentre tutti i terminali a bassa temperatura sono dotati di chiusure vetrate. Non si tratta, tuttavia, di una scelta ottimale dal punto di vista energetico; la soluzione più compatibile, sia dal punto di vista energetico sia ambientale, consiste nella chiusura di tutti i banchi frigo, sebbene il mantenimento del banco a temperatura normale sempre aperto è una scelta estetica e di comfort per il consumatore. Analizzando nel dettaglio la refrigerazione, si riportano in tabella 6 i tipi di fluido refrigerante utilizzati maggiormente nei supermercati.

Fluidi refrigeranti	Nomenclatura	Temperatura di evaporazione [°C]	ODP	GWP [KgCO ₂ / Kg]
R404A	Composto di tri-tetra-penta- fluoroetano	-46.2	0	3800
R143A	Tetra- fluoroetano	-26.1	0	1300
R744	Anidride carbonica	-78.4	0	1

Tabella 6. Fluidi refrigeranti più comuni per il funzionamento del sistema di refrigerazione alimentare dei retail della GDO.

Nel mondo della GDO, le caratteristiche ideali di un fluido refrigerante consistono in un basso impatto ambientale, con un GWP quanto più prossimo allo 0 e un ODP pari a 0, bassa infiammabilità ed elevata efficienza termodinamica e cioè un alto calore latente di evaporazione, alta temperatura critica e pressione e un campo di volatilità il più ristretto possibile.

Tendenzialmente, i sistemi di refrigerazione alimentare nei retail della GDO si dividono in:

- Sistema di refrigerazione tradizionale (figura 7);
- Sistema di refrigerazione a cascata (figura 8).

Nelle configurazioni impiantistiche per la refrigerazione alimentare, i sistemi tradizionali sono senza combinazione tra le due centrali frigorifere a temperatura diversa come illustrato nella figura 7.

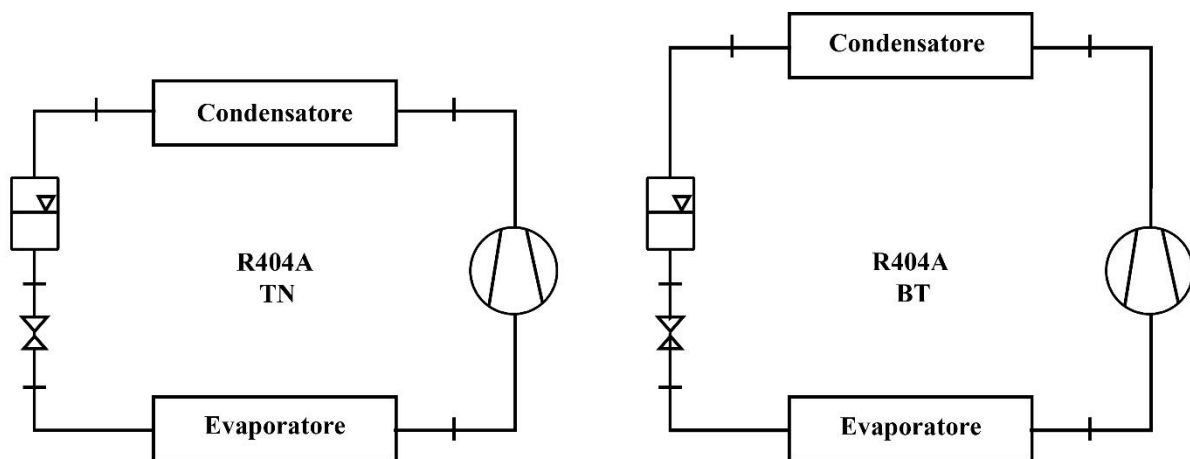


Figura 7. A sinistra sistema di refrigerazione tradizionale per temperatura normale (TN), a destra sistema di refrigerazione tradizionale per bassa temperatura (BT).

Mentre, nelle configurazioni della refrigerazione alimentare a cascata, le centrali frigorifere per la TN e BT sono collegate tra di loro come in figura 8.

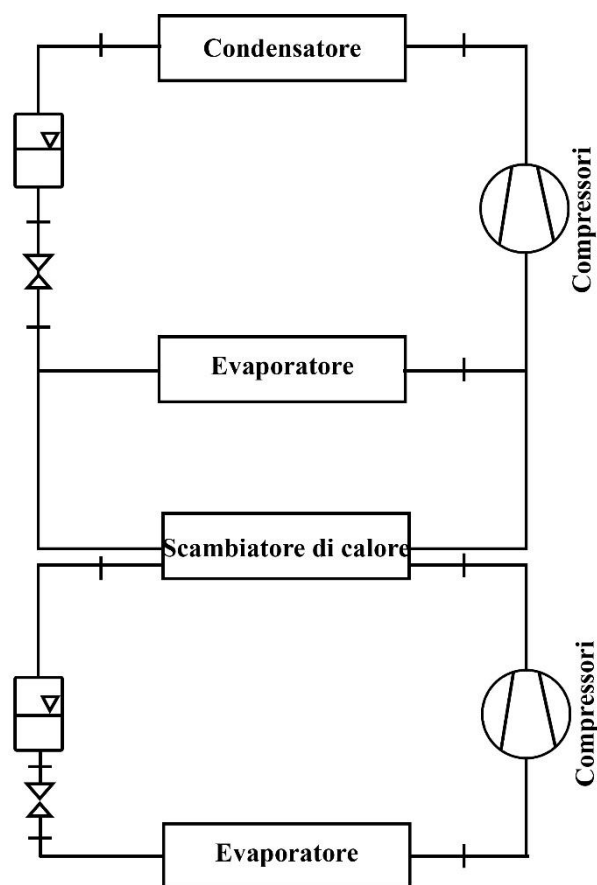


Figura 8. Sistema di refrigerazione a cascata, sopra temperatura normale (TN) e sotto bassa temperatura (BT).

Nei sistemi di refrigerazione alimentare i compressori usati sono quelli alternativi semi-ermetici che permettono una temperatura d'aspirazione a $-30/-35^{\circ}\text{C}$. Generalmente, in questi sistemi il gruppo dei compressori si sviluppa con tre o quattro componenti disposti in parallelo in modo da ottenere una portata maggiore e quindi soddisfare meglio la richiesta dei punti di vendita.

Generalmente, i sistemi di refrigerazione più diffusi nei punti di vendita analizzati sono a cascata, questo perché sono maggiormente efficienti.

4.1.2 Sistema HVAC nei retail della GDO

Come detto precedentemente, il consumo per il riscaldamento e raffrescamento degli ambienti è molto elevato in funzione della loro destinazione d'uso e della componente di comfort sia per i consumatori che per i lavoratori. Attualmente i retail della GDO si sviluppano tipicamente in grandi metrature e questo fa sì che si rendano necessari impianti di condizionamento capaci di soddisfare la domanda sia per il riscaldamento idoneo degli

ambienti che per il raffrescamento. Nella maggioranza dei retail della GDO questo è affidato ad impianti alimentati ad energia elettrica e solitamente si tratta di impianti a pompa di calore.

In questi impianti, l'aria prelevata dall'esterno viene incanalata nell'impianto per poi essere climatizzata e immessa nel locale. I sistemi più moderni, al fine di ottenere un risparmio energetico, creano un mix tra l'aria esterna e l'aria di ritorno per far sì che la miscela d'aria immessa nell'impianto abbia una temperatura che sia il più vicino possibile a quella di immissione. Questi sistemi hanno una unità esterna e una unità interna; infatti, durante la stagione estiva l'unità esterna funziona da condensatore e l'unità interna da evaporatore, viceversa nella stagione invernale.

4.2 Casi studio e workflow metodologico

I casi studio presentati costituiscono gli edifici per l'applicazione operativa del workflow metodologico descritto nella metodologia. La loro descrizione non ha quindi una funzione esclusivamente illustrativa, ma rappresenta la fase di acquisizione, organizzazione e verifica degli input necessari alla costruzione dei modelli e alla successiva valutazione degli scenari di intervento.

Per ciascun caso studio sono state raccolte informazioni relative alle caratteristiche architettoniche, termofisiche, impiantistiche, energetiche e gestionali dell'edificio. Tali informazioni sono state utilizzate in modo differenziato nelle diverse fasi del metodo: i dati geometrici e costruttivi hanno supportato la costruzione del modello BIM; le caratteristiche dell'involucro, degli impianti e dei profili d'uso sono state impiegate per la definizione del modello BEM; i consumi energetici reali hanno costituito il riferimento per la verifica e la calibrazione del modello; i dati climatici hanno consentito la valutazione energetica ed ambientale degli scenari.

In questo senso, viene rappresentato il passaggio intermedio tra la formalizzazione metodologica della metodologia e la discussione e presentazione dei risultati. La descrizione dei casi studio consente infatti di esplicitare come il metodo sia stato applicato a edifici reali, caratterizzati da disponibilità dei dati, vincoli gestionali e configurazioni impiantistiche differenti.

Il collegamento tra le fasi del workflow e le informazioni acquisite nei casi studio è sintetizzato nella tabella 7. Nella tabella 7 ciascuna informazione raccolta viene ricondotta alla corrispondente fase metodologica per sintetizzare e collegarla al suo uso nel modello e nelle analisi.

Fase del workflow metodologico	Informazioni raccolte nei casi studio	Uso nel modello e nelle analisi
Raccolta dati	Elaborati grafici progettuali e rilievi	Ricostruzione geometrica e definizione delle zone funzionali
Modellazione BIM	Geometria, involucro, stratigrafie, superfici opache e trasparenti	Costruzione del modello geometrico-informativo
Modellazione BEM	Trasmittanze, profili di utilizzo, orari, carichi interni, impianti	Simulazione energetica in regime dinamico
Definizione dei sottosistemi	HVAC, refrigerazione, illuminazione, utenze ausiliarie	Disaggregazione dei consumi per servizio energetico
Dati climatici	Localizzazione, zona climatica, file meteo	Definizione delle condizioni al contorno
Dati energetici reali	Bollette e consumi annuali o mensili	Validazione e calibrazione del modello
Criticità	Analisi dello stato di fatto	Definizione delle strategie di riqualificazione
Scenari di intervento	Involucro, HVAC, refrigerazione, illuminazione e energie rinnovabili	Confronto tra stato di fatto e configurazioni migliorative

Tabella 7. Fasi del workflow, informazioni acquisite nei casi studio e il loro uso nel modello e nelle analisi condotte.

4.3 Descrizione dei casi studio selezionati

La selezione dei casi studio è stata effettuata con l'obiettivo di applicare e verificare il metodo proposto su edifici reali appartenenti alla categoria dei punti vendita alimentari della GDO. I casi non sono stati scelti per rappresentare l'intero settore della Grande Distribuzione Organizzata, ma per analizzare una sottocategoria omogenea di edifici caratterizzati da elevati consumi energetici con vincoli gestionali connessi alla continuità dell'attività commerciale che di fatto costituiscono nodi energetici di grande peso nella rete del sistema complesso GDO. L'attività di ricerca si è concentrata su una tipologia limitata dei retail della GDO e cioè solo quella di retail di medie dimensioni che principalmente sono collocate all'interno di edifici che ospitano anche altre tipologie di negozi in quanto sono ad oggi la tipologia maggiormente diffusa e che maggiormente richiede necessità di avere una riqualificazione energetica ed ambientale. D'altra parte,

questa scelta è stata indirizzata dalla stessa Società Cooperativa PAC2000A Conad che ha supportato e finanziato questa stessa attività di ricerca.

La verifica, l'efficacia, l'accettabilità e la replicabilità del metodo proposto sono dimostrate attraverso l'analisi di una serie di casi studio rappresentativi del patrimonio edilizio esistente della GDO. La selezione dei casi studio, oltre a costituire una fase importante del lavoro, in quanto consente di confrontare il metodo teorico con situazioni reali, rappresenta un elemento fondamentale per valutare l'applicabilità del metodo a differenti configurazioni architettoniche, impiantistiche e gestionali.

I casi studio selezionati sono retail esistenti della GDO localizzati in contesti climatici e territoriali differenti con il preciso obiettivo di valutare l'influenza delle condizioni al contorno sul comportamento energetico del sistema edificio-impianto. Tale eterogeneità consente di testare la flessibilità del metodo e di valutare l'adattabilità a diverse tipologie di punti vendita. Inoltre, gli edifici selezionati rappresentano il patrimonio edilizio dei retail esistenti della GDO tipico con un'elevata intensità di utilizzo energetico, funzionamento prolungato degli impianti durante l'arco della giornata e dell'anno, e una forte incidenza dei consumi legati alla catena del freddo, ai sistemi HVAC e all'illuminazione artificiale.

La scelta dei casi studio deriva dalla reperibilità dei dati e soddisfa il criterio di rappresentatività. Nello specifico, sono stati selezionati edifici esistenti con differenti dimensioni, risalenti a varie epoche costruttive e diversi livelli di efficienza energetica, al fine di considerare un'ampia gamma di situazioni operative tipiche della tipologia di edificio analizzata.

I criteri adottati per la selezione sono stati i seguenti:

- appartenenza a una rete aziendale strutturata, tale da garantire una certa omogeneità gestionale e organizzativa;
- retail della GDO di medie dimensioni e collocati all'interno di centri commerciali o gallerie commerciali;
- disponibilità di dati geometrici, impiantistici, energetici e gestionali sufficienti alla modellazione;
- differenziazione per configurazione architettonica, dimensione, localizzazione e soluzioni impiantistiche;
- rappresentatività rispetto a punti vendita esistenti soggetti a interventi di riqualificazione energetica.

Per ciascun caso studio si fornisce dapprima una descrizione generale dell'edificio e del contesto di riferimento, cui segue l'analisi dello stato di fatto energetico e ambientale. Mediante l'applicazione del metodo proposto, vengono sviluppati i modelli del sistema edificio-impianto e ne vengono simulate ed analizzate le diverse strategie di intervento,

con l'obiettivo di quantificare i potenziali benefici in termini di riduzione dei consumi energetici, delle emissioni di gas a effetto serra e dei costi di esercizio.

L'analisi comparata dei casi studio permette infine di individuare criticità ricorrenti, soluzioni tecnologiche efficaci e linee guida operative utili alla definizione di strategie di riqualificazione energetica replicabili su scala più ampia. In questo modo, i casi studio non rappresentano singole applicazioni isolate, ma diventano strumenti di validazione del metodo e di supporto alla definizione di un approccio sistemico alla transizione energetica dei retail della GDO.

La rappresentatività dei casi studio deve quindi essere intesa in senso tipologico e metodologico, e non statistico. I risultati ottenuti non sono finalizzati a definire valori medi generalizzabili all'intero comparto GDO, ma a verificare la capacità del workflow proposto di analizzare edifici reali, individuare criticità energetiche e confrontare scenari di intervento in condizioni operative complesse.

4.3.1 Caso di studio “Conad Anagni”

Il territorio di Anagni si colloca nell'area centro-orientale della Regione Lazio, in posizione dominante rispetto alla media Valle del fiume Sacco, lungo il margine occidentale dei rilievi dei Monti Ernici. Il contesto geomorfologico è caratterizzato da una marcata articolazione altimetrica, con un settore collinare e sub-montano a maggiore acclività e una fascia di pianura alluvionale sviluppata lungo il fondovalle del Sacco, che ha storicamente accolto le principali infrastrutture e gli insediamenti produttivi.

Il centro urbano di Anagni si sviluppa prevalentemente sul crinale collinare, a una quota media di circa 420 m s.l.m., con affacci diretti sulla valle sottostante. La morfologia dell'area è contraddistinta da pendii moderati e versanti terrazzati, impostati su litologie di natura calcarea e marnosa, con tessuto edilizio compatto di impianto storico, cui si affiancano espansioni più recenti nelle aree periferiche e di fondovalle. Il territorio comunale ricade all'interno della classificazione climatica nazionale secondo il DPR 412/93 [30, 44] e successive modifiche introdotte dalla Legge 10/91 [44], risultando compreso nella zona climatica D. In tale zona sono incluse le aree caratterizzate da Gradi Giorno (GG) compresi tra 1401 e 2100; nello specifico, per il Comune di Anagni il valore dei GG è pari a circa 1911.

Il caso studio descritto è il Conad sito ad Anagni (FR) in Via Francesco Rotabile, situato all'interno di un contesto urbano caratterizzato dalla presenza di edifici con ai piani terra attività commerciali e ai piani superiori a carattere residenziale. Infatti, il punto di vendita è situato al piano terra di un edificio costruito nel 2012 e al di sopra di esso vi sono residenze civili. Il punto di vendita ha orari di apertura al pubblico dal lunedì al sabato dalle 8:30 alle 20:30 e la domenica dalle 9:00 alle 20:00.

Il punto vendita si sviluppa su singolo piano e presenta una struttura portante in pilastri di calcestruzzo armato gettato in opera. Inoltre, nonostante la presenza dei piani superiori, il locale adibito che ospita il supermercato, al di sopra è privo di altre strutture in elevazione presentando una copertura piana che al centro presenta una parte di copertura a doppia falda con struttura in legno. L'involucro dell'edificio è realizzato con il sistema costruttivo a "cassa vuota" e pertanto presenta due laterizi con interposto un'intercapedine d'aria dello spessore di 4cm e ha una copertura piana impermeabilizzata con guaina bituminosa e la parte a doppia falda con manto di copertura con coppi di laterizio; i serramenti esistenti sono di tipo tradizionale. Le pareti esterne esistenti presentano una trasmittanza termica (U) di $0.351 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, una resistenza termica (R) di $2.847 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Allo stesso modo, la copertura piana ha un valore U di $0.345 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ e la copertura a doppia falda un vale U di $0.211 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Pertanto, l'involucro esterno ha valori di trasmittanza termica (U) superiori all'attuale valore limite normativo e questa è una prima criticità che si riscontra nello studio dell'edificio.

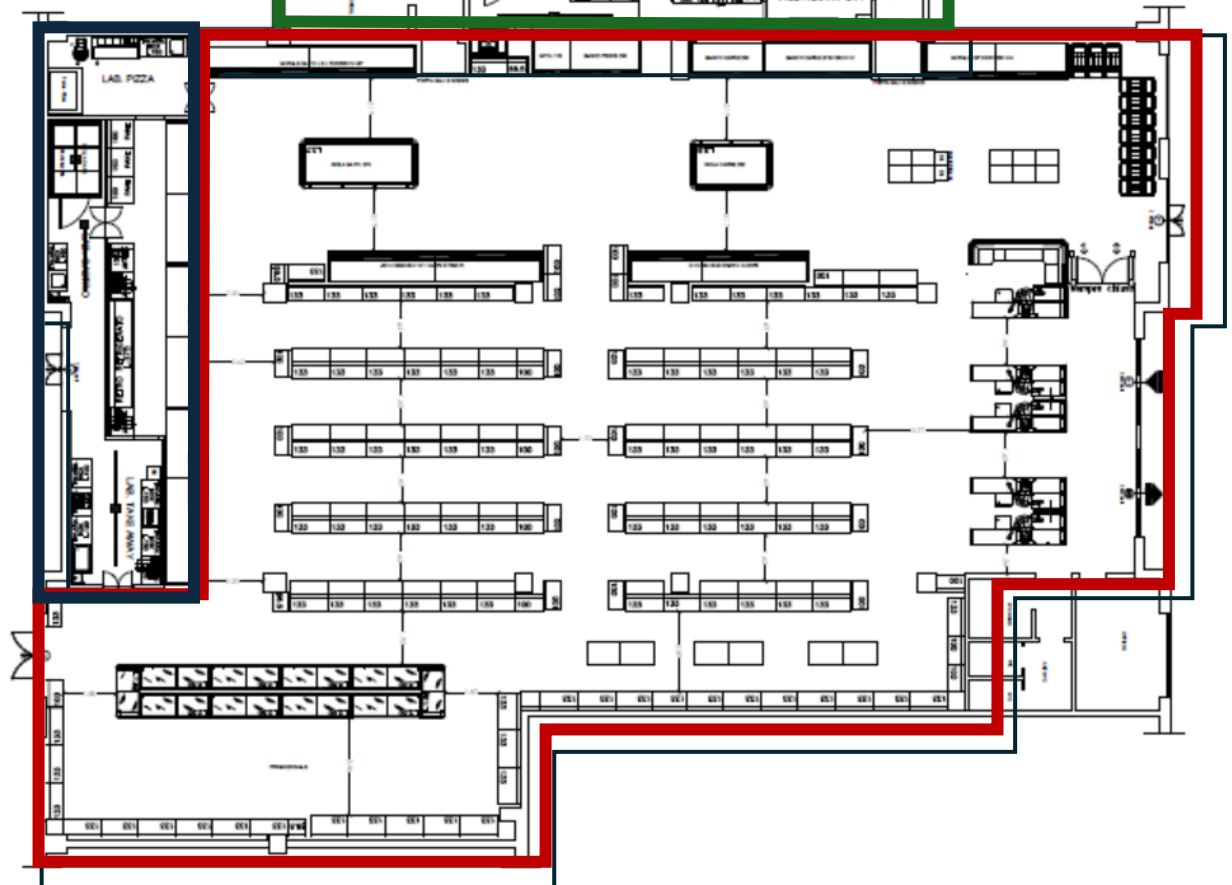


Figura 9. Identificazione del punto di vendita all'interno del territorio di Anagni.

All'interno del punto vendita, come identificato nella planimetria in figura 10, si distinguono tre aree di lavoro principali: area vendita, laboratori e magazzino. All'interno dell'area vendita sono presenti i seguenti reparti:

- alimentari;
- non alimentari;
- carni vendita assistita e libero servizio;
- pesce vendita assistita e libero servizio;
- ortofrutta confezionato e sfuso;

-



77

Gli impianti di climatizzazione degli ambienti sono costituiti da n. 6 gruppi frigoriferi ad espansione diretta a ciclo reversibile e quindi un impianto VRV con pompa di calore, equipaggiati con cinque compressori del tipo ermetico Scroll, funzionanti con gas ecologico R410A. Nello specifico, i 5 gruppi frigoriferi alimentano le 5 Unità di Trattamento Aria (UTA) della zona di esposizione e vendita, mentre, la rimanente UTA è dislocata nell'area lavorazione carni. La distribuzione del fluido termovettore avviene attraverso tubazioni in rame esternamente rivestite con guaina tubolare a cellule chiuse di spessore conforme a quanto prescritto dal D.P.R. 412/93 [30], attuativo della Legge 9 gennaio 1991 n° 10 [44]. Nella tabella 8 sono elencati gli impianti di generazione esistenti suddivisi per aree servite. Il sistema di regolazione e controllo adottato è un sistema multi-zona, che comanda le unità di trattamento aria permettendo la regolazione ed il comando degli impianti. Il sistema è del tipo elettronico e provvede all'attivazione dei circuiti interessati attraverso termoregolatori in ambiente, ottimizzando la funzione dei parametri impostati e dei consumi energetici.

Area servita	Tipologia	N° di unità	Potenza nominale [kW]	
			P.T.	P.F.
Area di vendita	Unità esterna pompa di calore	5	19.50	16.50
Laboratorio carni	Unità esterna pompa di calore	1	19.50	16.50

Tabella 8. Impianti di climatizzazione presenti nella struttura.

Nello specifico, dalle UTA canalizzate, l'aria viene immessa in ambiente attraverso appositi diffusori in tessuto acrilico in filato di poliestere. Le UTA installate sono del tipo pensile a soffitto complete di filtrazione a filtri rigenerabili con batteria di raffreddamento-riscaldamento e dotate di ventilante di mandata. La portata complessiva delle UTA è di 16.000 mc/h. I ricambi d'aria dell'ambiente sono garantiti da un recuperatore di calore aria/aria a flussi incrociati della portata di 4.500 mc/h completo di sezioni filtranti e da un cassetto di immissione della portata di 2.750 mc/h con sezione di filtrazione. L'impianto di immissione aria ha una portata totale di 7.250 mc/h, di cui 2.700 mc/h a servizio dell'area vendita e 4.550 mc/h a servizio dei laboratori, corridoi, disimpegni, servizi igienici e smistamento merci. L'estrazione dell'aria ambiente è effettuata per 3.100 mc/h dalla zona del banco pescheria e laboratorio. L'impianto di estrazione aria ha una portata totale di 7.140 mc/h., di cui 4.050 mc/h garantiti dal recuperatore di calore aria/aria a flussi incrociati, 2.100 mc/h dal cassetto di estrazione della cappa del laboratorio pizza e 1.140 mc/h dai due estrattori dei servizi igienici e smistamento merci. Il sistema di estrazione ed immissione riesce a garantire nel suo

complesso il rinnovo d'aria degli ambienti e a mantenere in sovrappressione gli ambienti onde evitare l'ingresso di aria esterna non trattata. Le prese di aria esterna del recuperatore e del cassonetto di immissione sono ubicate in posizione lontana da fonti inquinanti e comunque ad una altezza superiore a 3 mt dal piano calpestio.

La zona adibita alla pescheria è dotata di un impianto di estrazione aria della portata di 3.100 mc/h tramite il recuperatore di calore, al fine di creare una depressione e assicurare il costante rinnovo dell'aria in ambiente ed impedire la dispersione negli ambienti prospicienti di odori peculiari del reparto. Attraverso la cappa del forno nella zona preparazione cibi caldi è collocato un estrattore d'aria dall'ambiente che permette l'esportazione di 1.750 mc/h. Invece, l'immissione d'aria è effettuata tramite diffusori di mandata con una portata totale di 1.500 mc/h. La depressione creata nel reparto assicura il costante rinnovo dell'aria ambiente impedendo la dispersione degli odori negli ambienti prospicienti.

Il reparto per la lavorazione delle carni è dotato di un impianto autonomo a tutta aria del tipo ad espansione diretta, costituito da una UTA con evaporatore per installazione a soffitto ad incasso di tipo split. L'UTA è alimentata dal rispettivo gruppo frigorifero posizionato all'esterno in copertura. L'immissione e l'estrazione dell'aria è garantita dal recuperatore di calore dedicato al reparto, attraverso condotte in acciaio zincato e griglie di mandata e di estrazione. La portata di immissione ed estrazione è di 480 mc/h.

La produzione di acqua calda sanitaria avviene tramite scaldacqua ad alimentazione elettrica ubicati nei locali destinati ai servizi igienici, le cui caratteristiche di questi sono riportate in tabella 9.

Tipologia	Marca e modello	N° di unità	Caratteristiche
Scaldacqua elettrico C50 litri – CHAFFOTEAUX	CHAFFOTEAUX 50 Litri	6	Potenza nominale: 1.2 kW Pressione max: 8 bar Collegamento elettrico 230 V T _{max} d' esercizio: 75 °C Grado di protezione (IP): IPX1 T _{riscaldamento} ($\Delta T = 45\text{ °C}$) 2h 20 min

Tabella 9. Impianti di produzione di acqua calda sanitaria.

Gli impianti di refrigerazione esistenti si compongono di una centrale frigorifera BT e una TN, ciascuna dotata di un proprio condensatore. Il tutto è situato all'esterno, sulla copertura dell'edificio, ma non è stato possibile reperire dati specifici sulle attrezzature presenti.

4.3.2 Caso di studio “Conad Santa Maria degli Angeli, Assisi”

Il territorio di Assisi si colloca nella zona orientale della Regione Umbria, in posizione baricentrica rispetto alla Valle Umbra, e si estende dal versante occidentale del Monte Subasio fino alla pianura alluvionale del fiume Chiascio. Il contesto geomorfologico è caratterizzato da una netta articolazione altimetrica, con aree collinari e pedemontane a maggiore acclività e zone pianeggianti a vocazione prevalentemente agricola e insediativa. La frazione di Santa Maria degli Angeli si colloca nella porzione pianeggiante meridionale del territorio comunale, all'interno della Valle Umbra, a quota media di circa 210 m s.l.m. L'area è caratterizzata da morfologia sostanzialmente pianeggiante, su depositi alluvionali recenti, con tessuto urbano continuo e prevalentemente di impianto moderno. Il contesto è connotato da una destinazione mista residenziale, commerciale e ricettiva, con presenza di infrastrutture viarie di livello sovracomunale e servizi pubblici. La città è collocata all'interno della classificazione climatica secondo il DPR 412/93 [30] e implementate dalla Legge 10/91 [44] nella zona E. In tale zona climatica sono incluse le aree caratterizzate dai Gradi Giorno (GG) compresi tra 2101 e 3000 e nello specifico i GG per Santa Maria degli Angeli sono 2535.

Il caso studio descritto è il Conad Superstore, situato all'interno del centro commerciale “Le Cave” sito ad Assisi (PG) in Via Fratelli Matteucci Snc, località Santa Maria Degli Angeli e inaugurato nel luglio 2013. La struttura è di proprietà di “Gespac Srl”, società appartenente al gruppo “PAC 2000 A Società Cooperativa”. Il punto di vendita ha orari di apertura al pubblico dal lunedì al sabato dalle 8:30 alle 20:30 e la domenica dalle 9:00 alle 20:00.

Il centro commerciale che ospita il punto di vendita è stato inaugurato nel 2013 ed è dotato di altri spazi commerciali per la maggior parte ad oggi incompleti ed inutilizzati. Il complesso è inserito in un contesto caratterizzato da media densità abitativa ed è situato nelle immediate vicinanze del raccordo per l'immissione nella Strada Statale 75.

Il punto vendita si sviluppa su singolo piano, presenta una struttura portante in pilastri di calcestruzzo armato prefabbricato e in opera con tamponamenti in pannelli prefabbricati in calcestruzzo. L'involucro dell'edificio è composto internamente da un isolante termico standard e ha una copertura piana impermeabilizzata con guaina bituminosa; i serramenti esistenti sono di tipo tradizionale. Le pareti esterne esistenti presentano una trasmittanza termica (U) di $0.302 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, una resistenza termica (R) di $3.313 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Allo stesso modo, la copertura ha un valore U di $0.331 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Pertanto, l'involucro esterno ha valori di trasmittanza termica (U) superiori all'attuale valore limite normativo e questa è una prima criticità che si riscontra nello studio dell'edificio.



Figura 11. Identificazione del punto di vendita all'interno del territorio di Santa Maria degli Angeli, Assisi.

All'interno del punto vendita, come identificato nella planimetria in figura 12, si distinguono tre aree di lavoro principali: area vendita, laboratori e magazzino. All'interno dell'area vendita sono presenti i seguenti reparti:

- alimentari;
- non alimentari;
- carni vendita assistita e libero servizio;
- pesce vendita assistita e libero servizio;
- ortofrutta confezionato e sfuso;
- panetteria vendita assistita;
- banco salumi e formaggio;
- gastronomia vendita assistita;
- enoteca.

L'area vendita ha un proprio sistema di climatizzazione estiva ed invernale mentre altre aree del punto vendita sono dotate di sistemi di climatizzazione autonomi. Gli impianti di climatizzazione hanno un sistema di gestione automatizzato, ciò nonostante questo, la gestione di tale impianto avviene manualmente. Nella tabella 10 sono elencati gli impianti di generazione esistenti suddivisi per aree servite.

Area servita	Tipologia	Marca e modello	N° di unità	Potenza nominale [kW]	
				P.T.	P.F.
Area di vendita	Unità esterna pompa di calore	Daikin ZQ250C7Y1B	5	26.40	24.10
Laboratori	Unità esterna pompa di calore	Daikin REYQ8P9Y1B	1	25.00	22.40
Spogliatoi	Unità esterna pompa di calore	Daikin 2MXS50H	1	5.70	5.00
Locale tecnico	Unità esterna pompa di calore	Daikin FFQ25B	1	3.20	2.50

Tabella 10. Impianti di climatizzazione presenti nella struttura.

Nello specifico, nell'area di vendita la climatizzazione invernale ed estiva avviene mediante un impianto di tipo a tutt'aria a parziale ricircolo, costituito da:

- n. 5 unità esterne monosplit dotate di inverter e situate sulla copertura dell'edificio;
- n. 5 unità interne ad incasso per installazione nel controsoffitto, dotate di ventilatore direttamente accoppiato e batteria di scambio termico;
- la distribuzione avviene mediante n. 5 canali aerulici a sezione circolare sui quali sono installati dei diffusori circolari in alluminio per l'immissione di aria in ambiente;
- l'estrazione avviene tramite griglie di ripresa aria in acciaio installate a parete nella zona perimetrale dell'area vendita confinante con l'area dei laboratori.

Nella zona ospitante i laboratori e gli uffici la climatizzazione è assicurata da un impianto a pompa di calore a espansione diretta che si compone dei seguenti elementi:

- n. 1 unità esterna multisplit situata sulla copertura dell'edificio;
- n. 5 unità interne a cassetta per installazione ad incasso a soffitto, situate in particolare nel laboratorio panetteria/pasticceria, nel laboratorio cucina/gastronomia, due unità nel laboratorio carni e infine un'unità di potenza inferiore in un ufficio;
- n. 3 estrattori d'aria del tipo cassonato situati rispettivamente nel laboratorio pesce, nel laboratorio cucina e nel laboratorio pasticceria in quanto questi

hanno necessità di un impianto dedicato per consentire una corretta esposizione e conservazione degli alimenti.

La climatizzazione invernale ed estiva all'interno del blocco bagni e spogliatoi avviene mediante un impianto a pompa di calore a espansione diretta che consiste nei seguenti elementi:

- n. 1 unità esterna multisplit situata sulla copertura dell'edificio;
- n. 2 unità interne a cassetta per installazione ad incasso a soffitto;
- n. 2 griglie di ripresa d'aria collegate a canali di estrazione d'aria in copertura.

È presente, infine, un locale tecnico posto nei pressi dell'ingresso al punto vendita, all'interno del quale è presente un condizionatore autonomo a pompa di calore costituito da una unità esterna monosplit e da una unità interna a cassetta per installazione ad incasso a soffitto.

Il sistema di trattamento dell'aria primaria per l'intero edificio è costituito da:

- unità di recupero calore a flussi incrociati con recuperatori di calore di tipo rotativo entalpico aria-aria, situato sulla copertura dell'edificio;
- un canale aria di rinnovo a sezione rettangolare che attraversa longitudinalmente l'area dei laboratori;
- un canale di estrazione aria a sezione rettangolare al quale sono collegate svariate griglie di ripresa e bocchette circolari situate nei laboratori e nel magazzino.

La produzione di acqua calda sanitaria per l'intero punto vendita avviene mediante n. 4 collettori solari a tubi sottovuoto, installati sulla copertura dell'edificio con una struttura metallica che ne determina l'inclinazione. È inoltre presente un bollitore dotato di resistenza elettrica collegata sia ai collettori solari, sia allo scambiatore di recupero calore di condensazione dei banchi frigo. I componenti dell'impianto per la produzione di acqua calda sanitaria sono riportati in tabella 11.

Tipologia	Marca e modello	N° di unità	Caratteristiche
Collettore solare a tubi sottovuoto	IMMERGAS CSV14	4	Sup. assorbente: 2.36 m ²
Accumulo con doppio scambiatore	CORDIVARI BOLLY 2	1	Capacità: 1000 l
Resistenza elettrica integrativa	FIT /	1	Potenza: 9000 W

Tabella 11. Impianti di produzione di acqua calda sanitaria.

Gli impianti di refrigerazione esistenti si compongono di una centrale frigorifera BT e una TN, ciascuna dotata di un proprio condensatore. Il tutto è situato all'esterno, sulla copertura dell'edificio.

La centrale BT è dotata di n.3 compressori ed il suo condensatore ha ventilatori asincroni; la centrale TN è dotata di n.3 compressori e n.1 inverter ed il suo condensatore è dotato di ventole elettroniche. La tabella 12 riporta la tipologia e le potenze assorbite degli impianti di refrigerazione.

Tipologia	N° di unità	Potenza elettrica assorbita [kW]
BT	1	13.00
Condensatore BT	1	0.50
TN	1	35.00
Condensatore TN	1	2.00

Tabella 12. Impianti di refrigerazione.

Si specifica che i dati sopra indicati non corrispondono alle potenze nominali, ma alle potenze con le quali le macchine funzionano prevalentemente. La potenza elettrica assorbita dalle macchine di refrigerazione è dato estremamente variabile a seconda delle condizioni di lavoro e di altri fattori, quali la richiesta frigorifera delle utenze e/o la stagionalità.

La cabina di trasformazione MT/BT, situata esternamente all'edificio principale, è costituita dall'insieme dei dispositivi dedicati alla trasformazione della tensione fornita dalla rete di distribuzione elettrica in media tensione. Qui sono presenti un quadro in media tensione, un trasformatore e un quadro elettrico generale.

All'interno del magazzino del punto vendita è presente un locale adibito a Power Center, dal quale si hanno le partenze verso i numerosi quadri di protezione all'interno delle specifiche aree come laboratori, uffici e spogliatoi. Sia il Power Center che i vari quadri presentano dei multimetri per il monitoraggio dei carichi elettrici.

L'illuminamento degli ambienti del punto vendita è realizzato prevalentemente mediante corpi illuminanti a neon che risultano apparecchi dalla scarsa efficienza: in particolare, nell'area vendita sono presenti neon su binari, mentre nella zona casse sono presenti faretti ad incasso nel controsoffitto, nei laboratori sono presenti plafoniere da incasso a controsoffitto, mentre nell'area magazzino sono presenti neon in plafoniere in plastica.

4.3.3 Caso di studio “Conad Roma”

La città di Roma si colloca nella porzione centro-occidentale della Regione Lazio e si estende tra il settore collinare vulcanico dei Colli Albani e l'ampia pianura alluvionale del fiume Tevere, fino al litorale tirrenico. Il contesto geomorfologico è caratterizzato da una morfologia articolata, con alternanza di rilievi di origine vulcanica, terrazzi fluviali e aree pianeggianti, che hanno storicamente condizionato lo sviluppo urbano della città.

Nello specifico, il punto di vendita oggetto di studio è sito in Via Roberto Malatesta situata nel quadrante orientale del territorio della città metropolitana, all'interno del Municipio V, in una porzione prevalentemente pianeggiante del settore urbano romano, a una quota media di circa 60 m s.l.m.

Il contesto urbano in cui è situato il punto di vendita è caratterizzato da una destinazione d'uso prevalentemente residenziale, integrata da funzioni commerciali di vicinato, servizi pubblici e infrastrutture per la mobilità urbana, tra cui assi viari di rilevanza cittadina e la presenza della linea metropolitana C. L'area si inserisce all'interno della classificazione climatica nazionale secondo il DPR 412/93 [30] e successive modifiche introdotte dalla Legge 10/91 [44], ricadendo nella zona climatica D. In tale zona sono comprese le aree caratterizzate da GG compresi tra 1401 e 2100; nello specifico, per il Comune di Roma il valore dei GG è pari a 1415.

Il caso studio descritto è il Conad, situato all'interno di una galleria commerciale situata al piano terra di un edificio residenziale degli anni '70. Gli orari di apertura al pubblico sono dal lunedì al sabato dalle 8:30 alle 20:30 e la domenica dalle 8:30 alle 20:30.

Il punto vendita si sviluppa su singolo piano, presenta una struttura portante in pilastri di calcestruzzo armato gettati in opera e tamponamenti a cassa vuota in laterizio. Il locale ospitante il punto di vendita è circondato da edifici, ciononostante la sua area sovrastante è sgombra da altre strutture; pertanto, il solaio del supermercato è anche la copertura di quest'ultimo. La copertura piana presenta esternamente una impermeabilizzazione con guaina bituminosa; i serramenti esistenti sono di tipo tradizionale. Le pareti esterne esistenti presentano una trasmittanza termica (U) di $0.904 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, una resistenza termica (R) di $1.107 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Allo stesso modo, la copertura ha un valore U di $1.147 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Pertanto, l'involucro esterno e la copertura hanno valori di trasmittanza termica (U) superiori all'attuale valore limite normativo individuano quindi una prima criticità nello studio dell'edificio.



Figura 13. Identificazione del punto di vendita all'interno della Città di Roma.

Come descritto nel caso precedente e illustrato in figura 14, nel punto di vendita analizzato si individuano le diverse zone principali: area vendita, laboratori e magazzino.

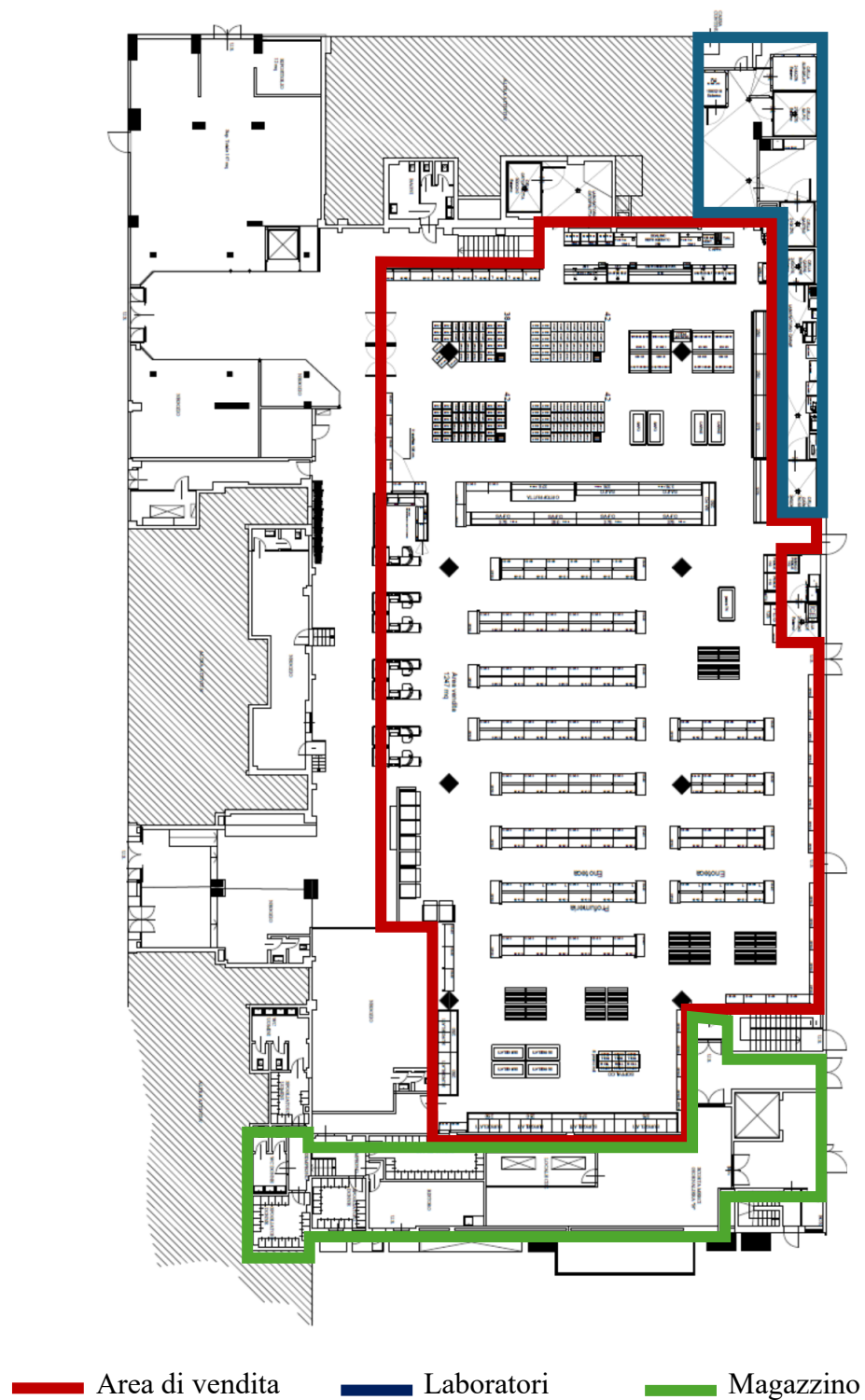


Figura 14. Planimetria del punto di vendita con individuazione delle tre aree di lavoro principali.

Il sistema di climatizzazione invernale ed estiva del punto vendita è costituito da un impianto VRV, ovvero un impianto a pompa di calore ad espansione diretta di gas refrigerante a portata volumetrica variabile, in grado di collegare e gestire più unità interne. Il sistema è composto da n. 4 unità esterne riportate in tabella 13 e varie unità interne collocate nei seguenti ambienti:

- area vendita;
- reparto frutta;
- reparto verdura;
- area casse;
- reparto surgelati;
- area magazzino.

Inoltre, il punto di vendita è dotato di due lame d'aria collocate agli ingressi in modo da mantenere la temperatura interna costante riducendo l'ingresso di aria calda d'estate e di aria fredda d'inverno. Ciò consente di ridurre il consumo di energia, aiuta a non disperdere il riscaldamento o il raffrescamento e migliorare il comfort interno degli ambienti, impedisce correnti d'aria fastidiose per i clienti e il personale. Nei punti di vendita alimentari, inoltre, le lame d'aria consentono di ridurre polveri, smog e insetti ostacolando l'ingresso degli agenti esterni e proteggendo i banchi refrigerati.

La distribuzione e l'immissione di aria in ambiente avviene mediante canali aeraulici a sezione circolare dotati di microfori. Sono inoltre presenti n.2 recuperatori di calore.

Per la gestione degli impianti ci si avvale di un sistema di supervisione costituito da un pannello di comando che permette di gestire le funzioni dell'impianto di climatizzazione.

Tipologia	Marca e modello	N° di unità	Potenza nominale [kW]	
			P.T.	P.F.
Unità esterna pompa di calore	Daikin RYMQ-12T7Y1B	2	33.50	37.50
Unità esterna pompa di calore	Daikin RYMQ-14T7Y1B	2	40.00	45.00

Tabella 13. Impianti di climatizzazione presenti nella struttura.

La produzione di acqua calda sanitaria è prodotta tramite scaldacqua ad alimentazione elettrica ubicati nei locali destinati ai servizi igienici, le caratteristiche di questi sono riportate in tabella 14.

Tipologia	Marca e modello	N° di unità	Caratteristiche
Scaldacqua elettrico C50 litri – CHAFFOTEUX	CHAFFOTEUX 50 Litri	6	Potenza nominale: 1.2 kW Pressione max: 8 bar Collegamento elettrico 230 V T_{max} d' esercizio: 75 °C Grado di protezione (IP): IPX1 $T_{riscaldamento}$ ($\Delta T = 45$ °C) 2h 20 min

Tabella 14. Impianti di produzione di acqua calda sanitaria.

L'impianto di refrigerazione è costituito da una centrale TN installata nel 2020 dotata di n. 3 compressori di cui solo uno con inverter e una BT installata nell'anno 2003 dotata di n. 3 compressori privi di inverter, tali impianti sono installati nella sala motori. All'esterno dell'edificio sono presenti due condensatori, uno per ciascuna centrale frigorifera. La tabella 15 riporta le potenze delle componenti dell'impianto di refrigerazione.

Tipologia	N° di unità	Potenza elettrica assorbita [kW]
Compressori Bitzer centrale frigo BT	3	32.11
Ventole BT	5	0.37
Compressori Bitzer centrale frigo TN	3	23.07
Ventole TN	8	0.25

Tabella 15. Impianti di refrigerazione.

L'impianto di illuminazione dei locali e quello dedicato all'indicazione delle uscite di sicurezza dell'intero punto vendita è costituito sia da corpi illuminanti a LED di recente installazione che da corpi illuminanti tubolari fluorescenti ed alogeni.

4.4 Validazione dei modelli

La validazione del modello energetico rappresenta una fase essenziale del metodo, poiché consente di verificare la coerenza tra il comportamento simulato e il comportamento reale dell'edificio. Nel presente lavoro, la validazione è stata effettuata attraverso il confronto tra i consumi energetici simulati e i consumi reali disponibili per i casi studio.

La validazione è stata condotta considerando i principali usi energetici dell'edificio, con particolare riferimento a refrigerazione commerciale, HVAC, illuminazione e utenze ausiliarie. Quando i dati disponibili non consentivano una disaggregazione completa dei

consumi, il confronto è stato effettuato sui consumi complessivi o sulle categorie energetiche disponibili, esplicitando il relativo limite metodologico.

Il modello BEM del sistema edificio-impianto si fonda sulla ricostruzione reale, integrando non solo le caratteristiche impiantistiche e architettoniche, ma anche i dati energetici idonei a rappresentare fedelmente la realtà. Analizzando i dati reali reperibili (consumi energetici, programmi di occupazione, programmi di utilizzo degli impianti), permettono di generare un modello rappresentativo dell'edificio analizzato.

I protocolli di calibrazione utilizzano alcuni indici di validazione per quantificare i risultati. Tali indici considerano il divario tra valori effettivi e previsti e la loro correlazione [75]. La procedura di validazione è finalizzata al confronto dei valori derivanti dalle simulazioni energetiche in regime dinamico e i valori reali registrati tramite la lettura dei consumi riportati nelle bollette o con monitoraggi continuativi al fine di ridurre l'intensità dell'errore misurato in termini di errore di distorsione media normalizzato (NMBE) definito dall'equazione (9) e coefficiente di variazione dell'errore quadratico medio (CV(RMSE)) definito dall'equazione (10). Tale processo avviene sulla base del riferimento alla linea guida ASHRAE per il processo di calibrazione [76] e seguendo le fasi principali della procedura.

Definendo M come i dati monitorati o registrati dalla lettura delle bollette, S come i risultati della simulazione e N il numero dei dati reperiti, vengono applicati i seguenti indici:

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{N} \times 100 \text{ [%]} \quad (9)$$

$$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{N}} \times 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

Il valore espresso dall'NMBE quantifica la somma degli errori tra i dati misurati o ottenuti dalla lettura delle bollette e quelli simulati in ciascun intervallo di misurazione. Esso funge da forte indicatore della distorsione complessiva all'interno del modello, cattura la discrepanza media tra i dati misurati e quelli simulati. Tuttavia, poiché le distorsioni positive e negative possono compensarsi a vicenda, viene calcolata una metrica di errore aggiuntiva per fornire una valutazione più completa dell'accuratezza del modello, mediante l'equazione (10).

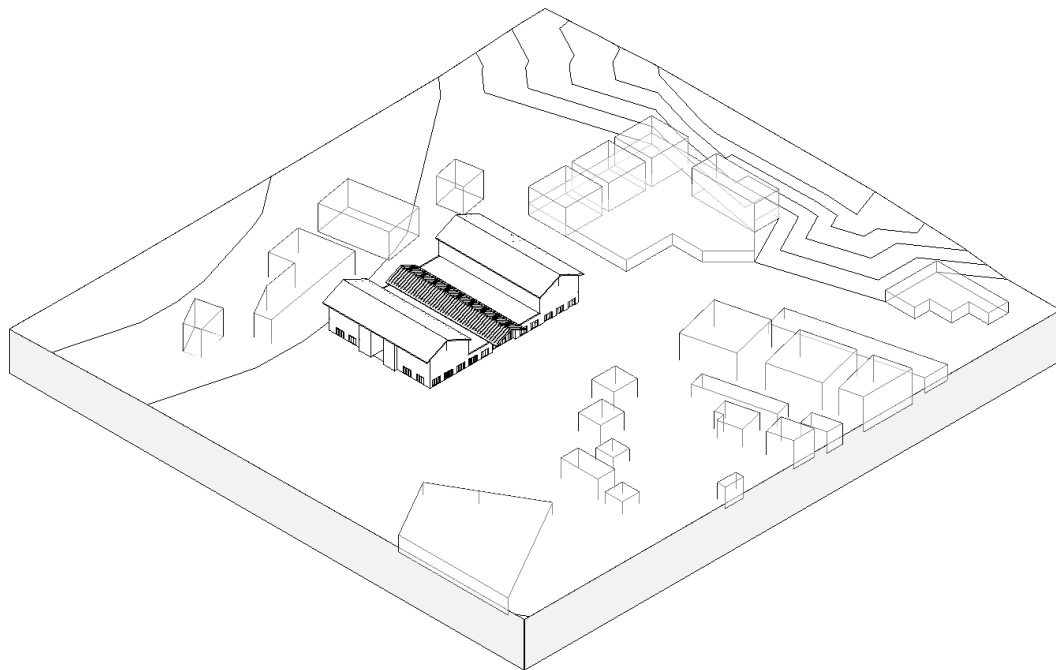
Secondo la linea guida ASHRAE [76], le soglie di tolleranza per la calibrazione dell'uso dell'energia sono $CV(RMSE) < 15\%$ e $-5\% < NMBE < 5\%$.

I modelli BEM sono stati calibrati utilizzando i dati sul consumo di elettricità del 2022 per garantire previsioni realistiche. I dati meteorologici reali della stazione meteorologica locale per lo stesso anno sono serviti come condizioni al contorno per il processo di calibrazione.

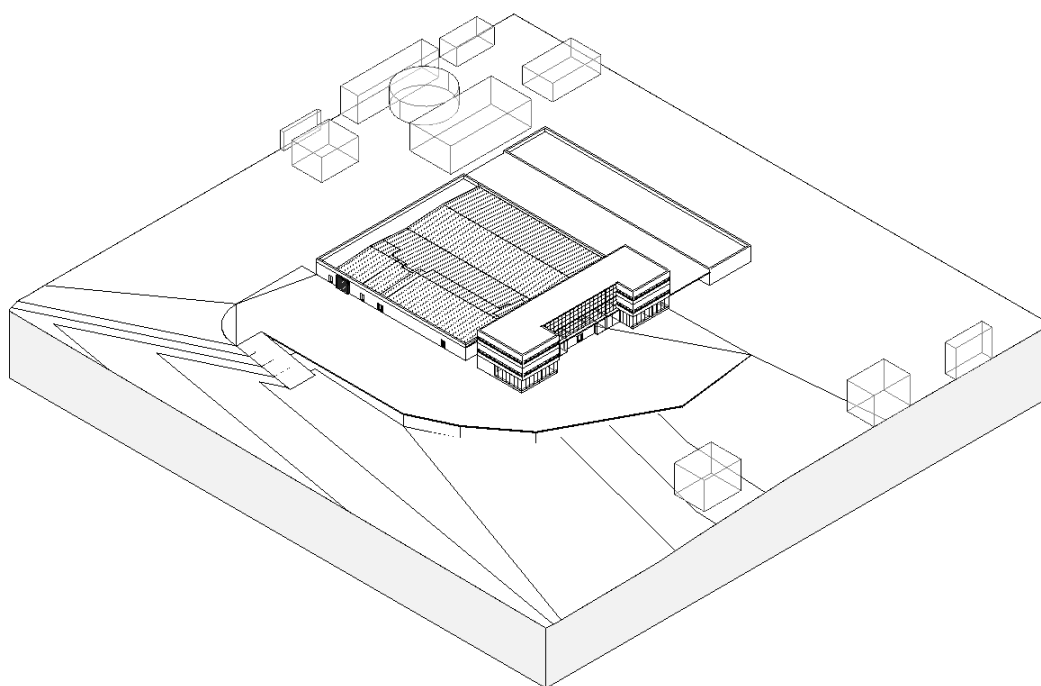
Per ottenere un modello BEM accurato, sono state necessarie varie modifiche al modello iniziale, che hanno portato a un processo di calibrazione iterativo. Nello specifico, i dati di input per i sistemi energetici sono stati regolati dinamicamente, inclusa la potenza dei macchinari e i programmi di funzionamento del sistema.

4.5 Modellazione energetica dei casi di studio

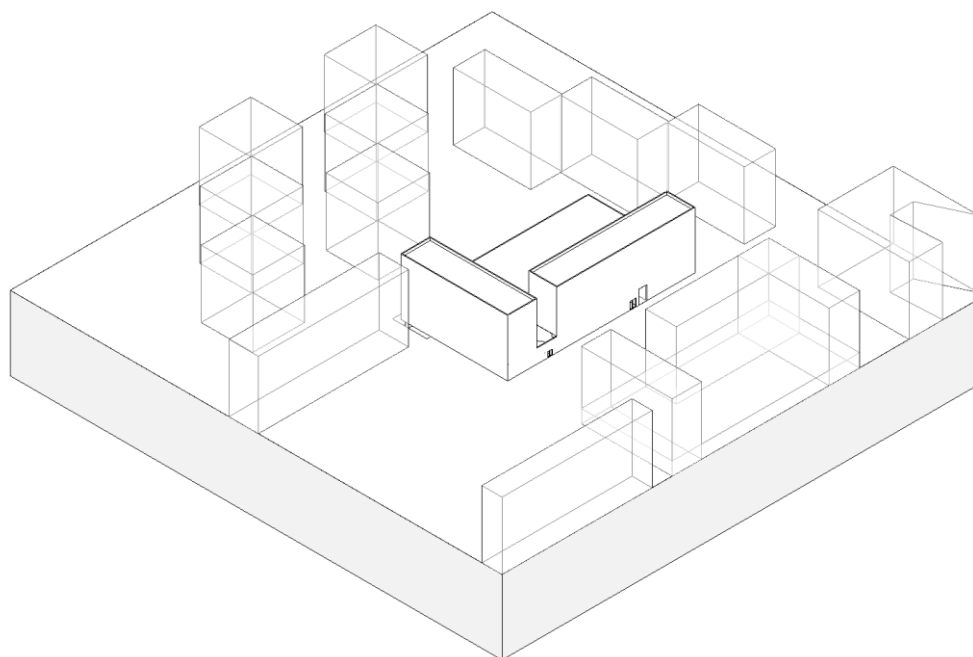
Tramite l'ausilio di un software di modellazione energetica che utilizza la tecnologia BIM e BEM è stato possibile ricostruire il modello geometrico, energetico e termofisico del sistema edificio-impianto dei casi studio come rappresentato in figura 15. L'utilizzo di un software BIM rende agevole ricostruire gli edifici nella loro forma e dimensione a partire dalle planimetrie reperite nella documentazione iniziale.



a)



b)



c)

Figura 15. Modelli BIM dei casi studio selezionati. a) caso studio di Anagni; b) caso studio di Santa Maria degli Angeli, Assisi; c) caso studio di Roma.

Nel modello sono stati inseriti come dati di input per tutti gli edifici riportati nelle tabelle 16, 17, 18 e 19.

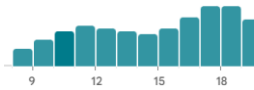
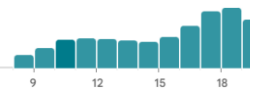
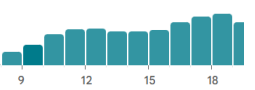
Parametro	Conad Anagni	Conad SMA	Conad Roma
Zona climatica	D (1911 GG)	E (2289 GG)	D (1415 GG)
Superficie utile	1279 m ²	1852 m ²	1816 m ²
Superficie area vendita	990 m ²	1217 m ²	1235
Superficie laboratori	70 m ²	125 m ²	250 m ²
Superficie magazzini	219 m ²	510 m ²	331 m ²
Volume totale	6662 m ³	11833 m ³	6900 m ³
Volume condizionato	6155 m ³	11782 m ³	9580 m ³
Orario di apertura	6:00 – 21:00	6:00 – 21:30	6:00 – 21:30
Orario di apertura al pubblico e profilo occupazionale	8:30 – 20:30	8:30 – 21:00	8:30 – 21:00
			
Numero dipendenti	16	20	22
Numero medio occupanti	42	51	72

Tabella 16. Caratteristiche funzionali dei casi studio.

Parametro	Conad Anagni	Conad SMA	Conad Roma
Consumo annuo totale	376 MWh/anno	827 MWh/anno	768 MWh/anno
Consumo refrigerazione annuo	67 MWh/anno	539 MWh/anno	460 MWh/anno
Consumo HVAC annuo	134 MWh/anno	103 MWh/anno	113 MWh/anno
Consumo illuminazione annuo	175 MWh/anno	185 MWh/anno	195 MWh/anno
Consumo medio mensile	31 MWh/mese	69 MWh/mese	64 MWh/mese
Consumo refrigerazione medio mensile	5 MWh/mese	45 MWh/mese	35 MWh/mese
Consumo HVAC medio mensile	11 MWh/mese	9 MWh/mese	13 MWh/mese
Consumo medio illuminazione mensile	15 MWh/mese	15 MWh/mese	16 MWh/mese

Consumo medio settimanale	8 MWh/mese	18 MWh/mese	17 MWh/mese
Consumo refrigerazione medio settimanale	1.5 MWh/mese	11 MWh/mese	9 MWh/mese
Consumo HVAC medio settimanale	2.5 MWh/mese	3 MWh/mese	3 MWh/mese
Consumo medio illuminazione settimanale	4 MWh/mese	4 MWh/mese	5 MWh/mese
Superficie vetrata	57 m ²	126 m ²	55 m ²

Tabella 17. Consumi energetici dei casi studio.

I consumi riportati in tabella 17 sono espressi in termini di energia elettrica finale acquistata dalla rete e sono stati determinati a partire dai dati disponibili per ciascun punto vendita. In particolare, i valori comprendono i contributi riconducibili ai principali usi energetici dell'edificio: refrigerazione commerciale, climatizzazione, illuminazione.

Nei casi studio, allo stato di fatto, come espresso anche nella tabella 18 non sono presenti impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili, pertanto, il totale dell'energia usata è prelevata dalla rete. I valori riportati devono pertanto essere interpretati come base di riferimento per la calibrazione dei modelli e per la successiva valutazione degli scenari di intervento, e non come indicatori assoluti generalizzabili a tutti i punti vendita della GDO alimentare.

Parametro	Conad Anagni	Conad SMA	Conad Roma
	Due sistemi separati: uno per area vendita e magazzino e uno e area preparazione dei cibi.	Due sistemi separati: uno per l'area vendita e preparazione dei cibi e uno per il magazzino.	Unico sistema per tutta la struttura.
	Area vendite e magazzino:	Area vendita e preparazione cibi:	
	-5 UTA e 5 HP;	-5 UTA e 5 HP;	-4 UTA e 4 HP;
	-Portata d'aria: 3200 m ³ /h;	-Portata d'aria: 5340 m ³ /h;	-portata d'aria: 1920 m ³ /h;
	-COP: 3.05;	-COP: 3.05;	-COP: 3.74;
	-EER: 3.11;	-EER: 3.01;	-EER: 4.10;
	-capacità di riscaldamento totale: 19.5 kW;	-capacità di riscaldamento totale: 27 kW;	-capacità di riscaldamento totale: 20.6 kW;
	-capacità di raffreddamento totale: 16.5 kW.	-capacità di raffreddamento totale: 25 kW.	-capacità di raffreddamento totale: 40 kW.
	Area preparazione dei cibi:	Magazzino:	
	-1 UTA e 1 HP;	-1 UTA e 1 HP;	
	-Portata d'aria di 930 m ³ /h;	-Portata d'aria: 10260 m ³ /h;	
	-COP: 3.42;	-COP: 4.38;	
	-EER: 3.21;	-EER: 4.31;	
	-capacità di riscaldamento totale: 8 kW;	-capacità di riscaldamento totale: 22.4 kW;	
	-capacità di raffreddamento totale: 7.1 kW.	-capacità di raffreddamento totale: 25 kW.	

- CFL con potenza pari a 18W, 35W e 58W.
- Assenza controllo automatico dell'illuminazione;
- I: variabile;
- E: 100-1000 lx;
- nt: medio-alta;
- η : 60–100 lm/W;
- Distribuzione fotometrica: asimmetrica;
- T_c : 2700–6500 K;
- R_a : 70–95
- Coordinata cromatica: variabile;
- Unif. cromatica: 3–7 step;
- Fatt. manutenzione del flusso: 70–90% a fine vita;
- UGR: <19;
- Flicke: ridotto;
- k: 30 sec;
- g: 8.000-20.000 h

- CFL con potenza pari a 32W, 35W, 58W e 70W.
- Assenza controllo automatico dell'illuminazione;
- I: variabile;
- E: 100-1000 lx;
- nt: medio-alta;
- η : 60–100 lm/W;
- Distribuzione fotometrica: asimmetrica;
- T_c : 2700–6500 K;
- R_a : 70–95
- Coordinata cromatica: variabile;
- Unif. cromatica: 3–7 step;
- Fatt. manutenzione del flusso: 70–90% a fine vita;
- UGR: <19;
- Flicke: ridotto;
- k: 30 sec;
- g: 8.000-20.000 h

Magazzino e area casse:

- CFL con potenza pari a 18 W, 36 W e 56 W.
- Assenza controllo automatico dell'illuminazione;
- I: variabile;
- E: 100-1000 lx;
- nt: Medio-alta;
- η : 60–100 lm/W;
- Distribuzione fotometrica: asimmetrica;
- T_c : 2700–6500 K;
- R_a : 70–95
- Coordinata cromatica: variabile;
- Unif. cromatica: 3–7 step;
- Fatt. manutenzione del flusso: 70–90% a fine vita;
- UGR: <19;
- Flicke: ridotto;
- k: 30 sec;
- g: 8.000–20.000 h

Area vendita:

- LED con potenza pari a 36W e 43W;
- Assenza controllo automatico dell'illuminazione;
- I: variabile;
- E: 100-1500 lx;
- nt: molto elevata;
- η : 80-200 lm/W;
- Distribuzione fotometrica: controllata;
- T_c : 2200–6500 K;
- R_a : 80–98
- Coordinata cromatica: variabile;
- Unif. cromatica: 1–5 step;
- Fatt. manutenzione del flusso: 80–95% dopo 50.000 h;
- UGR: <19;

Illuminazione naturale	Pareti finestrate: 57 m ²	Pareti finestrate: 90 m ² Lucernai: 36 m ²	-Flicke: molto basso; -k: immediato; -g: 25.000-100.000 h Pareti finestrate: 45 m ² Lucernai: 10 m ²
Produzione di energia da rinnovabili	Assente.	N. 4 collettore solare Sup. assorbente: 2.36 m ²	Assente.

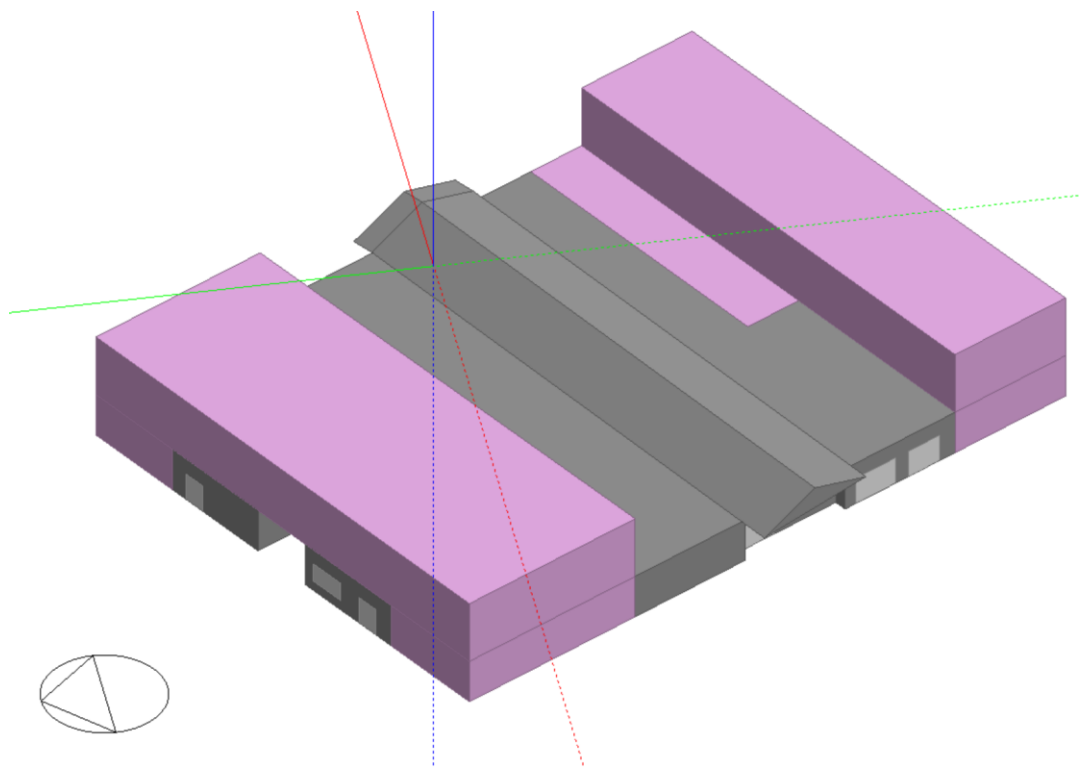
Tabella 18. Caratteristiche degli impianti dei casi studio.

Parametro	Conad Anagni	Conad SMA	Conad Roma
Principali criticità	- elevate dispersioni termiche; - elevati carichi HVAC soprattutto nel periodo estivo; - sistema di illuminazione obsoleto.	- consumi elevati della catena del freddo; - gestione impiantistica; - comportamento energetico estivo; - elevata incidenza della refrigerazione; - forte interazione tra catena del freddo e HVAC; - aumento dei carichi estivi; - gestione impiantistica non completamente ottimizzata; - sistema di illuminazione obsoleto.	- involucro scarsamente performante; - carichi interni elevati; - alte temperature urbane; - elevate dispersioni termiche; - forte sensibilità alle condizioni climatiche esterne; - aumento dei consumi HVAC; - ridotta inerzia energetica; - forte dipendenza dalla climatizzazione estiva; - sistema di illuminazione obsoleto.

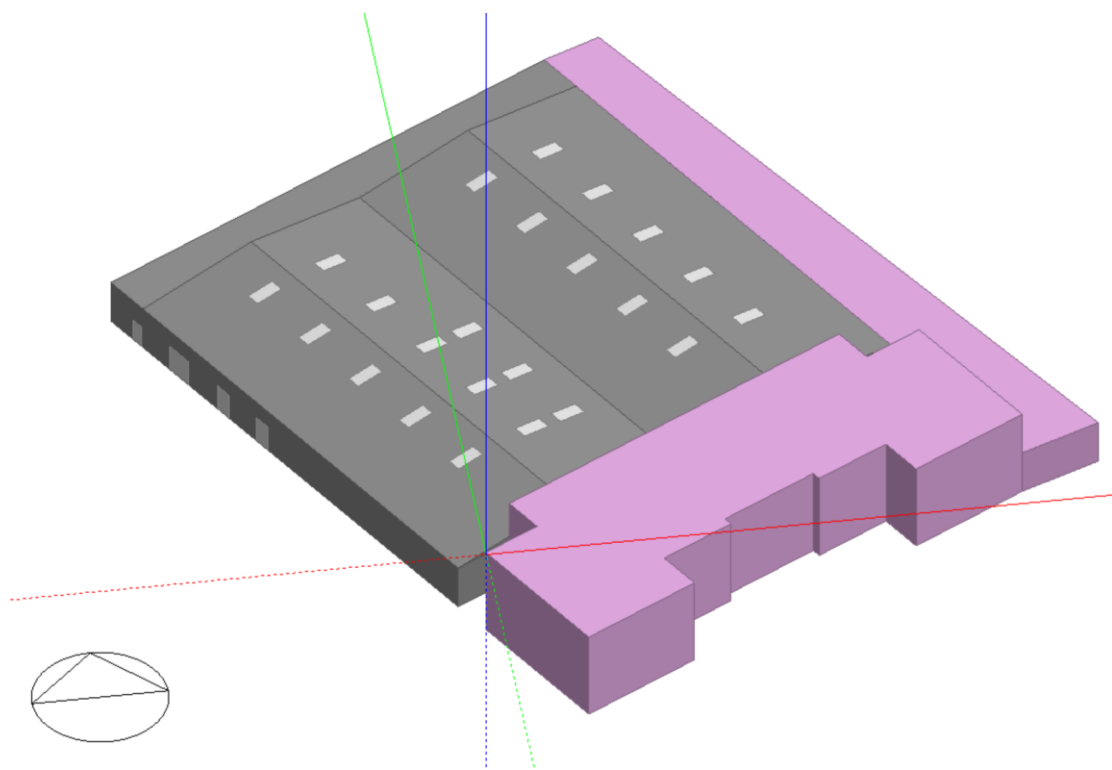
- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Integrazione di pannelli fotovoltaici in copertura; - Relamping con integrazione di sistemi di controllo intelligente, LED COB e DALI. - Integrazione di sistemi di controllo e regolazione ottimali (quali, KONNEX, IoT, ecc.); - Integrazione dell'illuminazione naturale con sistemi adattabili e adattivi integrati in copertura. | <ul style="list-style-type: none"> - Isolamento dell'involucro edilizio mediante materiali ecocompatibili; - Integrazione di pannelli fotovoltaici in copertura e nelle aree esterne idonee (percorsi pedonali, pensiline e parcheggi); - Relamping con integrazione di sistemi di controllo intelligente, LED COB e DALI. - Integrazione di sistemi di controllo e regolazione ottimali (quali, KONNEX, IoT, ecc.); - Recupero del calore di scarto a bassa temperatura dal ciclo di refrigerazione da utilizzare per il riscaldamento - Integrazione dell'illuminazione naturale con sistemi adattabili e adattivi integrati in copertura. - Chiusura dei banchi frigo. | <ul style="list-style-type: none"> - Integrazione di pannelli fotovoltaici in copertura; - Relamping con integrazione di sistemi di controllo intelligente, LED COB e DALI. - Integrazione di sistemi di controllo e regolazione ottimali (quali, KONNEX, IoT, ecc.); - Integrazione dell'illuminazione naturale con sistemi adattabili e adattivi integrati in copertura. |
|--|--|--|

Tabella 19. Criticità e strategie prioritarie dei casi studio.

Con la definizione del modello BIM degli edifici che riporti tutte le caratteristiche termofisiche ed impiantistiche sono stati ricostruiti i modelli energetici riportati in figura 16 per analizzare lo stato di fatto dei casi studio selezionati.



a)



b)

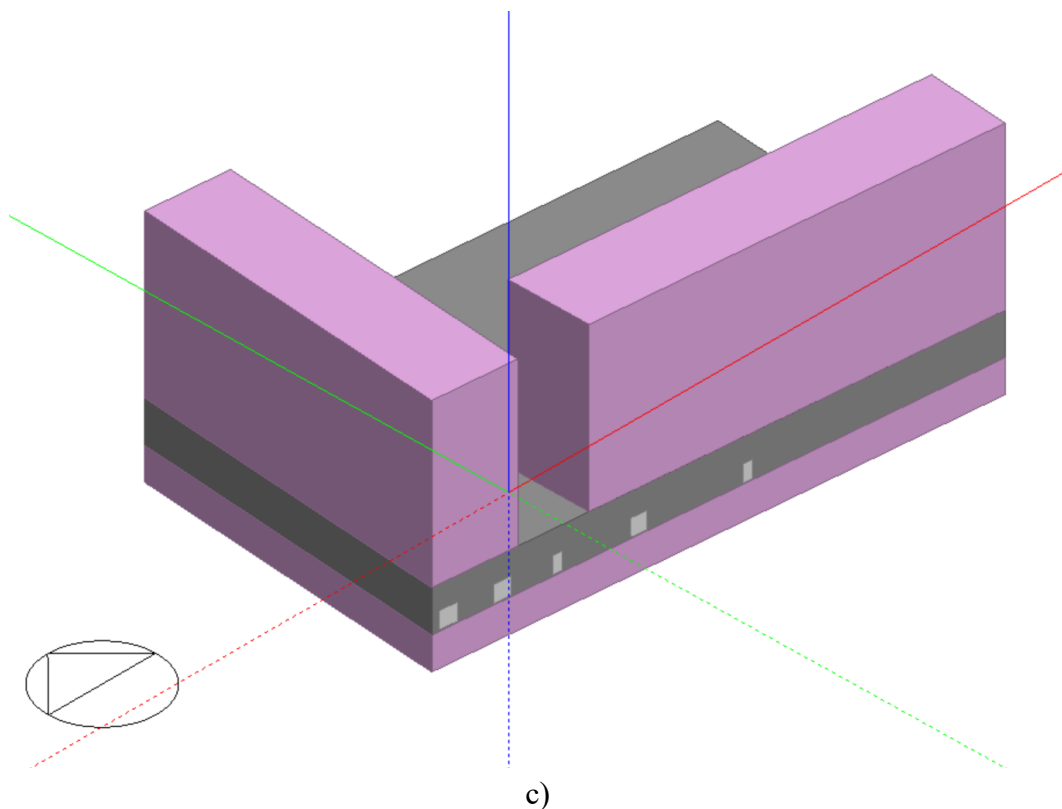
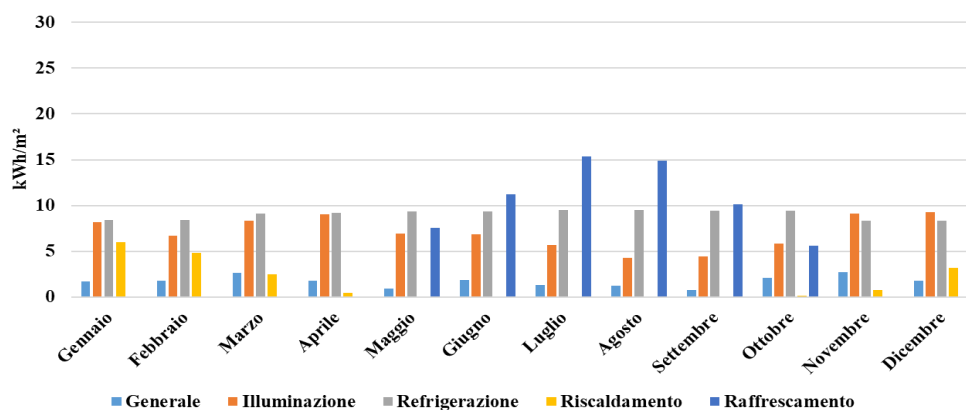


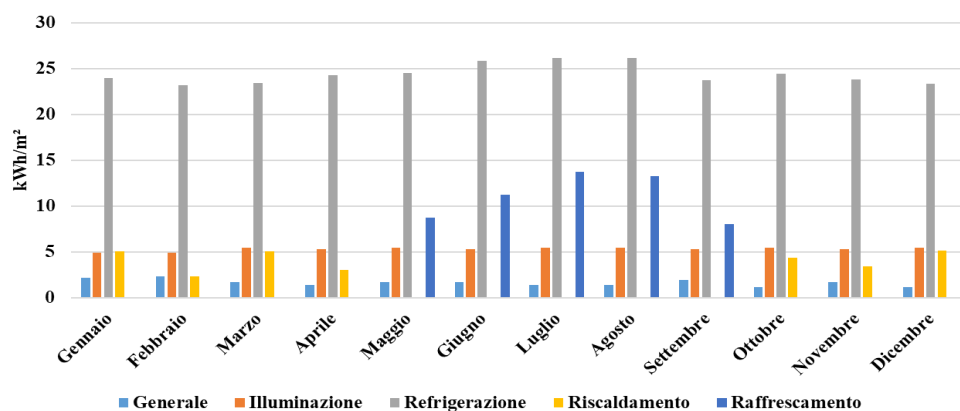
Figura 16. Modelli BEM dei casi studio selezionati. a) caso studio di Anagni; b) caso studio di Santa Maria degli Angeli, Assisi; c) caso studio di Roma.

L'analisi dei consumi energetici nello stato di fatto costituisce il presupposto metodologico per la corretta analisi energetica dei casi studio selezionati. Tale fase è finalizzata alla ricostruzione quantitativa e qualitativa del comportamento energetico reale dei casi studio, attraverso l'analisi dei dati di consumo storici e la descrizione dettagliata del sistema edificio-impianto nelle condizioni operative attuali.

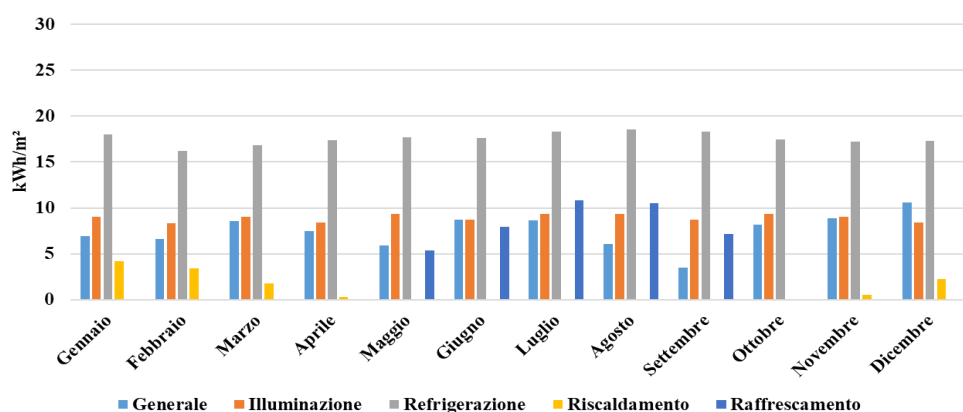
Per ciascun caso studio, i consumi energetici sono analizzati in riferimento ai principali servizi energetici presenti – refrigerazione alimentare, HVAC, illuminazione artificiale e consumi generali – al fine di individuare il contributo di ciascun sottosistema al fabbisogno energetico complessivo. Tale scomposizione evidenzia le componenti a maggiore intensità energetica, nonché le interazioni tra i diversi impianti, particolarmente rilevanti nei retail della GDO, nei quali i carichi interni e i sistemi di refrigerazione influenzano in modo significativo il bilancio termico dell'edificio. I dati di consumo rilevati nello stato di fatto dei singoli casi studio sono riportati nei grafici in figura 17.



a)



b)



c)

Figura 17. Consumi energetici espressi in kWh/m² dei principali servizi energetici presenti: refrigerazione, HVAC, illuminazione e consumi generali (funzionamento casse, IT, ventilazione, ausiliari, movimentazione merci, ecc...) a) caso studio di Anagni; b) caso studio di Santa Maria degli Angeli, Assisi; c) caso studio di Roma.

L'analisi dello stato di fatto energetico dei casi studio selezionati evidenzia come il vettore energetico principale sia l'energia elettrica che rappresenta la quasi totalità dei consumi complessivi. Tale risultato è coerente con le caratteristiche tipiche dei retail della GDO, nei quali la refrigerazione alimentare, l'illuminazione artificiale e i sistemi HVAC sono prevalentemente alimentati da energia elettrica. La ripartizione dei consumi mostra una netta prevalenza della catena del freddo, che incide significativamente sul bilancio energetico complessivo, seguita dai sistemi di illuminazione e dagli impianti HVAC in tendenza con lo stato di fatto dei retail della GDO.

Analizzando in dettaglio quelli che sono i consumi energetici legati alla catena del freddo risulta che questi sono i principali consumi in tutti i casi studio, con percentuali variabili in funzione della tipologia di banchi frigoriferi installati, della presenza o meno di vetrine refrigerate chiuse e delle logiche di funzionamento degli impianti. I modelli energetici evidenziano, inoltre, una forte interconnessione tra la refrigerazione e il carico termico degli ambienti.

Per quanto riguarda i consumi degli impianti di illuminazione artificiale degli ambienti, essi risultano elevati in tutti i casi studio. I dati evidenziano come questi consumi non rappresentano solo un carico diretto, ma contribuiscono in modo indiretto ai carichi termici interni, influenzando il sistema HVAC specialmente durante il periodo estivo.

Per quanto riguarda i sistemi HVAC, i consumi energetici risultano fortemente dipendenti dalle caratteristiche dell'involucro edilizio, dalle condizioni climatiche locali e dalle strategie di gestione adottate. Nei dati dei casi studio selezionati, in linea con i consumi dei retail della GDO, i consumi energetici per il raffrescamento sono nettamente più elevati di quelli per il riscaldamento.

L'analisi complessiva dei profili di consumo su base temporale evidenzia una marcata variabilità giornaliera e stagionale, strettamente legata agli orari di apertura dei punti vendita, ai carichi interni e al funzionamento degli impianti. In particolare, considerata la destinazione d'uso degli ambienti, i consumi energetici risultano elevati e continui durante l'intero arco giornaliero, dovuto principalmente alla necessità del funzionamento costante della catena del freddo.

Nel complesso, l'analisi energetica dei casi studio rileva una serie di criticità ricorrenti, tra cui l'elevata intensità energetica, la scarsa integrazione tra i diversi sottosistemi e l'assenza di sistemi avanzati di monitoraggio e controllo. Tali elementi confermano la necessità di un approccio integrato alla riqualificazione energetica, in grado di considerare simultaneamente involucro, impianti, illuminazione e fonti di energia rinnovabile. I risultati ottenuti costituiscono, pertanto, la base conoscitiva per la definizione degli scenari di intervento e per la valutazione comparativa delle strategie di efficientamento energetico.

4.6 Relazione tra analisi energetica dei casi studio e definizione degli scenari di riqualificazione

L'analisi energetica dei casi di studio selezionati ha consentito di individuare le principali criticità energetiche e impiantistiche associate agli edifici retail della GDO. In particolare, i risultati ottenuti hanno evidenziato significative differenze tra i punti vendita in termini di distribuzione dei consumi energetici, configurazione impiantistica, caratteristiche geometriche, dell'involucro edilizio e influenza delle condizioni climatiche locali. Le differenze rilevate hanno costituito la base metodologica per la definizione degli scenari di riqualificazione energetica sviluppati nel successivo capitolo. Gli interventi proposti non derivano univocamente da un approccio parametrico, ma sono stati definiti considerando il confronto dei parametri/indicatori energetico-termodinamici e delle criticità derivanti, tra i casi di studio.

In particolare, le strategie di efficientamento non si basano sullo studio dei singoli consumi, ma su una ricerca di decarbonizzazione e riduzione dei consumi energetici del sistema edificio-impianto.

Gli scenari sviluppati nel successivo capitolo devono pertanto essere interpretati secondo una duplice prospettiva:

- scenari specifici derivanti dalle criticità osservate nei casi studio;
- scenari parametrico-comparativi finalizzati a valutare la potenziale efficacia delle strategie di retrofit per configurazioni comparabili del settore retail alimentare.

Tale impostazione consente di mantenere il collegamento metodologico tra l'analisi sperimentale dei casi studio e la successiva valutazione delle strategie di riqualificazione energetica.

5. Risultati

5. Risultati

Il presente capitolo presenta i risultati dell'applicazione del workflow metodologico descritto nella metodologia ai casi studio selezionati. Le analisi sono organizzate in tre linee applicative, corrispondenti ai principali sottosistemi energetici che caratterizzano i punti vendita alimentari della GDO andando quindi a descrivere la valutazione energetica complessiva e gli scenari generali di retrofit, l'approfondimento relativo alla catena del freddo e alla sua interazione con il sistema HVAC, e la valorizzazione dell'illuminazione naturale come strategia di riduzione dei consumi elettrici per illuminazione artificiale.

Le tre linee non devono essere interpretate come studi autonomi, ma come applicazioni complementari dello stesso metodo. In ciascun caso, infatti, l'analisi muove dalla caratterizzazione dello stato di fatto, passa attraverso la modellazione energetica e la definizione di scenari, e giunge alla valutazione comparativa dei risultati. Tale articolazione consente di verificare il metodo su livelli diversi: l'edificio nel suo complesso, il sottosistema refrigerazione — HVAC e il sottosistema illuminazione naturale/artificiale.

Questa impostazione è coerente con la natura integrata dei punti vendita alimentari, nei quali i consumi non dipendono da un singolo componente, ma dall'interazione tra involucro, impianti, refrigerazione commerciale, illuminazione, profili di utilizzo e gestione operativa. Pertanto, i risultati sono discussi evidenziando non solo il risparmio ottenibile dai singoli interventi, ma anche il contributo di ciascuna strategia alla costruzione di un protocollo operativo replicabile per la riqualificazione energetica dei punti vendita alimentari esistenti.

I risultati presentati costituiscono il riferimento quantitativo per le valutazioni comparative e per la successiva discussione critica delle strategie proposte.

5.1 Interventi generali di riqualificazione energetica

L'analisi delle criticità e dello stato di fatto e delle prestazioni energetiche della tipologia di edificio oggetto di studio mettono in evidenza gli elementi più rilevanti che contraddistinguono il fabbisogno energetico di un edificio ad uso retail della GDO, consentendo di individuare possibili interventi di retrofit. Particolare riguardo si ha in riferimento alla stagione estiva, in quanto le temperature elevate fanno emergere le criticità del sistema edificio-impianto. Tali criticità sono rappresentate soprattutto dai consumi elevati per il raffrescamento degli ambienti e per il funzionamento di tutta la catena del freddo, infatti, quest'ultima con temperature esterne più elevate necessita di alzare i regimi di funzionamento delle macchine e conseguentemente aumentare i consumi. Le proposte di retrofit energetico sono incentrate sul miglioramento dell'involucro esterno, sull'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili,

sull'efficientamento degli impianti di illuminazione e lo studio di soluzioni progettuali innovative per il recupero del calore di scarto derivante dalla catena del freddo.

Gli interventi sopra descritti sono stati applicati ad un caso di studio selezionato e cioè un edificio commerciale che esemplifica un edificio rappresentativo di un supermercato in Italia, infatti, il caso studio selezionato è situato a Santa Maria degli Angeli, Assisi.

Lo sviluppo del modello BEM dell'edificio oggetto di studio valuta i potenziali benefici ottenibili attraverso interventi di riqualificazione energetica. La figura 16 mostra il modello BEM dell'edificio utilizzato per le analisi (figura 18a), le zone termiche interne (figura 18b) e la vista aerea dell'edificio nei suoi dintorni (figura 18c).

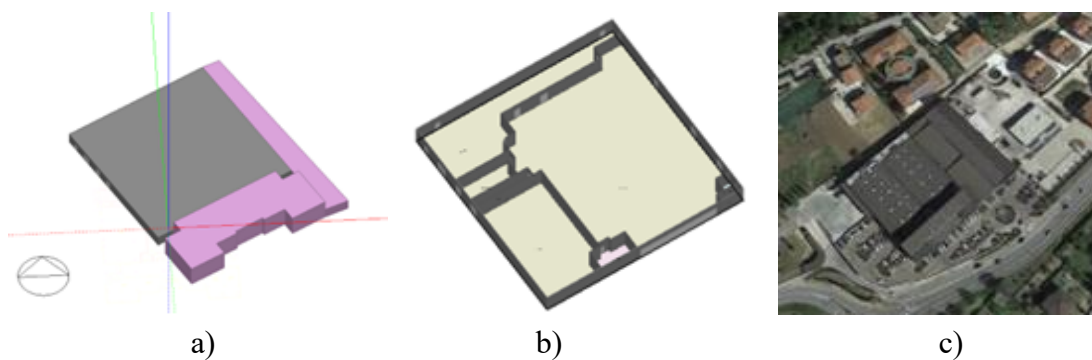


Figura 18. Edificio del caso di studio: (a) vista assonometrica del modello BEM (il volume grigio è l'edificio del caso di studio, mentre i volumi rosa rappresentano le zone circostanti nel centro commerciale, adiacenti alla zona analizzata); (b) vista assonometrica delle zone termiche nel modello BEM e (c) vista aerea dell'edificio.

Il modello BEM dell'edificio è stato calibrato con i dati mensili sul consumo di elettricità per l'anno 2022 (compresi HVAC, refrigerazione, illuminazione, preparazione degli alimenti, ventilazione e processi secondari) per ottenere una previsione realistica di quelli che sono i consumi energetici degli scenari futuri. Come condizioni al contorno per la calibrazione sono stati utilizzati i dati meteorologici reali della stazione meteorologica locale dell'anno 2022.

Gli indici NMBE e CV(RMSE) calcolati per il modello calibrato, riportati nella tabella 20, sono ampiamente inclusi nell'intervallo di tolleranza secondo lo standard di riferimento ASHRAE [13]. Infatti, quando si considerano i valori mensili, il modello è considerato calibrato quando $CV(RMSE) < 15\%$ e $-5\% < NMBE < 5\%$.

Mese	Consumi misurati [MWh]	Consumi simulati [MWh]	NMBE [%]	CV(RMS E) [%]
Gennaio	67	66	-	-
Febbraio	61	60	-	-
Marzo	66	65	-	-
Aprile	62	63	-	-
Maggio	74	74	-	-
Giugno	81	81	-	-
Luglio	88	86	-	-
Agosto	85	85	-	-
Settembre	64	72	-	-
Ottobre	60	65	-	-
Novembre	56	63	-	-
Dicembre	58	65	-	-
Annuale	822	846	-3.1	3.0

Tabella 20. Consumo mensile di elettricità: confronto tra i dati misurati dell'edificio e del modello energetico calibrato.

Molti fattori, quali esempio l'architettura dell'edificio, le condizioni al contorno, ecc., vengono presi in considerazione per identificare le soluzioni di efficienza energetica e di integrazione delle energie rinnovabili più adatte per l'edificio. Per valutare le prestazioni degli scenari di ammodernamento, il metodo proposto esplora diversi criteri: riduzione del consumo energetico, riduzione delle emissioni di CO₂ e risparmio economico.

In questo studio, gli scenari di retrofit proposti sono strategie di efficienza energetica reversibili e facilmente installabili, per ridurre anche i costi di manutenzione. I costi di investimento derivano dalla somma del calcolo dei costi dei materiali e degli interventi sulla base dei costi standard di mercato. Di conseguenza, sono ritenuti adatti a vari edifici. Nello specifico, questo studio esamina e analizza sei scenari di retrofit delineati come segue:

- **Scenario A) Isolamento dell'involucro edilizio mediante materiali ecocompatibili.** In particolare, le pareti esterne esistenti presentano attualmente una trasmittanza termica (U) di 0.302 W/m² K, una resistenza termica (R) di 3.313 W/m² K, una trasmittanza termica periodica (Yie) di 0.072 W/m² K, uno sfasamento (ϕ) di 9.83 h e uno smorzamento (fd) di 0.255, ovvero superiore all'attuale valore limite normativo. Nello scenario di retrofit, alle pareti esterne viene aggiunto uno strato di isolamento termico in EPS con grafite ($\lambda=0.031$ W/m K) dello spessore di 10 cm. Pertanto, il nuovo valore U è pari a 0.152 W/m² K, il valore R è pari a 6.579 W/m² K, Yie è pari a 0.003 W/m² K, ϕ è pari a 13.45 h e fd è pari a 0.017, ovvero conforme agli attuali requisiti per gli edifici [77]. Allo

stesso modo, la copertura esistente ha un valore U di $0.331 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Nello scenario di ammodernamento, alla copertura viene aggiunto uno strato di 10 cm dello stesso EPS. Il nuovo valore U è pari a $0.181 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ secondo[77]. Il costo di investimento previsto per lo scenario A, vale a dire l'ammodernamento dell'involucro opaco, è pari a circa 50.000 €, compresi i materiali e i costi di intervento.

- **Scenario B) Ulteriore isolamento dell'involucro edilizio mediante materiali ecocompatibili e integrazione di pannelli fotovoltaici.** Nel dettaglio, questo scenario prevede le stesse soluzioni per l'involucro edilizio implementate nello scenario A e aggiunge 585 m^2 di pannelli fotovoltaici per garantire una potenza di picco pari a 117 kWp ottenibile sfruttando il tetto con esposizione favorevole. Per lo scenario B, il calcolo dell'investimento iniziale è stato effettuato sulla base di un'indagine di mercato approfondita che ha portato alla stima del costo di 1.100 €/kWp. Pertanto, l'investimento iniziale totale (I_0) è di 128.700 € + il costo dell'isolamento dell'involucro edilizio di circa 50.000 €. Il costo totale dell'investimento per lo scenario B è pari a circa 178.700 €.
- **Scenario C) Integrazione di pannelli fotovoltaici nel tetto dell'edificio e nelle aree esterne idonee che comprendono percorsi pedonali, pensiline e parcheggi.** Pertanto, 881 m^2 di pannelli fotovoltaici sono integrati per garantire una potenza di picco pari a 180 kWp ottenibile sfruttando il tetto con esposizione favorevole e i percorsi pedonali, pensiline e parcheggi all'esterno dell'edificio. Il costo per lo scenario C è previsto sulla base della stessa stima del costo dello scenario B pari a 1.100 €/kWp. Pertanto, l'investimento iniziale totale (I_0) è di 170.800 €.
- **Scenario D) Sostituzione degli impianti di illuminazione esistenti con tecnologia LED sia per l'illuminazione interna che per quella esterna.** Il costo di investimento previsto per lo scenario D è pari a 54.800 €.
- **Scenario E) Recupero del calore di scarto a bassa temperatura dal ciclo di refrigerazione da utilizzare per il riscaldamento.** Il calore di scarto recuperato viene utilizzato principalmente per ridurre il consumo energetico del sistema HVAC in inverno. Il costo di investimento previsto per lo scenario E è pari a 30.000 €.

Inizialmente lo studio ha preso in considerazione anche l'implementazione di un tetto verde. Tuttavia, non è adatto a questa specifica applicazione edilizia perché richiederebbe la ristrutturazione dell'intero tetto a causa dei limiti di carico. Ciò sarebbe molto più costoso dei potenziali benefici energetici ed economici ottenibili attraverso questa soluzione. Pertanto, questa strategia è stata esclusa.

Questo approccio prende in considerazione non solo l'efficienza energetica, ma anche il risparmio economico e quindi la proposta si traduce nell'ottenere una maggiore resilienza alle fluttuazioni dei mercati energetici e finanziari. Il modello BEM calibrato viene utilizzato per analizzare le prestazioni energetiche dell'edificio reale e il potenziale miglioramento dovuto agli scenari proposti.

Gli scenari di riqualificazione energetica analizzati sono definiti a partire dalle criticità emerse nella caratterizzazione dello stato di fatto e dalla distribuzione dei consumi tra i principali sottosistemi energetici del punto vendita. Ciascuno scenario rappresenta una specifica strategia progettuale finalizzata a modificare uno o più termini del bilancio energetico dell'edificio.

In questa sezione vengono mostrati e discussi i risultati ottenuti per ogni scenario in termini di consumo energetico rispetto al consumo energetico simulato dello scenario edilizio reale. La tabella 21 mostra il consumo annuo di elettricità in termini di energia finale acquistata dalla rete (compreso il funzionamento del sistema HVAC, della catena del freddo, dell'illuminazione dei locali, dell'illuminazione specifica dei banchi alimentari e refrigerati e delle attrezzature per la preparazione degli alimenti) confrontando i risultati ottenuti negli scenari precedentemente proposti con lo scenario attuale.

Scenario	Consumi [MWh/anno]	Risparmio energetico [%]
Stato di fatto	846	-
A	841	0.6
B	670	20.8
C	608	29.0
D	753	10.9
E	841	0.6
F	812	4.0

Tabella 21. Confronto dei consumi energetici: scenari attuali e post-intervento.

Considerando i programmi operativi e la notevole domanda energetica della catena del freddo alimentare, lo scenario C si propone come la soluzione migliore per ridurre al minimo il consumo energetici in un'ottica di replicabilità e raggiungimento di risparmi energetici legati all'energia prodotta da fonti rinnovabili e quindi in ottica di una economica green.

I vari scenari hanno impatti diversi sui consumi energetici dell'edificio in esame, infatti alcuni mostrano effetti minimi, mentre altri dimostrano riduzioni sostanziali.

Il risultato ottenuto per lo scenario A relativo all'isolamento dell'involucro evidenzia un risparmio energetico limitato rispetto allo stato di fatto. Tale esito è coerente con la specificità energetica dei punti vendita alimentari, nei quali il consumo complessivo è

dominato da carichi elettrici interni, refrigerazione commerciale, illuminazione e funzionamento continuo degli impianti, mentre il peso relativo delle dispersioni dell'involucro può risultare meno determinante rispetto ad altre tipologie edilizie. L'intervento sull'involucro, pur rilevante in termini di qualità edilizia e comfort, non risulta in questo caso la strategia più incisiva sul consumo energetico complessivo, soprattutto se confrontata con interventi su refrigerazione, illuminazione e produzione da fonti rinnovabili.

Nel contesto della nostra analisi, gli scenari A e E non contribuiscono in modo significativo alla riduzione dei consumi energetici. Al contrario, gli scenari B e C mostrano impatti considerevoli sulla riduzione dei consumi energetici, dovuti principalmente all'aumento della produzione di elettricità da fonti rinnovabili. Inoltre, gli scenari B e C consentono una minore dipendenza dall'energia acquistata dalla rete e pertanto aumentano la resilienza dell'edificio alle fluttuazioni del mercato dell'energia.

Lo scenario D, che si concentra sulla sostituzione degli apparecchi di illuminazione convenzionali con tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico, risulta una soluzione che con un intervento mirato e di facile implementazione, permette di ottenere un ottimo risultato in termini di riduzione dei consumi energetici. Infatti, un'analisi più dettagliata, mostra che si ottiene una significativa riduzione del consumo energetico legato all'illuminazione, stimato circa al 60%. L'efficienza delle tecnologie di illuminazione svolge un ruolo fondamentale negli sforzi complessivi di risparmio energetico soprattutto in edifici con la destinazione d'uso a retail della GDO considerando che l'uso di energia elettrica per l'illuminazione rappresenta circa il 30% del totale.

Lo scenario E, che ha come obiettivo quello di ridurre il consumo energetico associato al riscaldamento e pertanto durante la stagione invernale, si traduce, nel dettaglio ad una riduzione del 20% del consumo energetico legato al riscaldamento, ma che nel complesso ha come risultato una diminuzione dello 0.6% del consumo totale durante tutto l'anno. Tuttavia, è essenziale evidenziare che tale scenario dimostra un impatto sostanziale, soprattutto nei climi più freddi, dove le richieste di riscaldamento sono più elevate.

In sintesi, i risultati sottolineano la natura multiforme delle strategie di riduzione del consumo energetico la necessità di un approccio che tenga conto dell'innovazione tecnologica, delle condizioni climatiche regionali e delle complessità intrinseche dei sistemi energetici. Sfruttando le intuizioni di questo studio si possono sviluppare interventi mirati per migliorare l'efficienza energetica e portare avanti gli obiettivi di decarbonizzazione del settore.

Lo studio presentato è destinato a promuovere lo sviluppo di strategie di efficientamento energetico nel settore del commercio al dettaglio di prodotti alimentari. I risultati possiedono il potenziale per incentivare gli imprenditori a promuovere un cambiamento gestionale e di programmazione di interventi sugli edifici, contribuendo, in

ultima analisi, a realizzare obiettivi più ampi di sostenibilità ambientale, economica e sociale.

5.1.1 Riqualificazione energetica e cambiamenti climatici

L'analisi di quelli che sono i risultati delle riqualificazioni energetiche dei punti di vendita in un'ottica di cambiamenti climatici è necessaria per una corretta valutazione dei risultati. In risposta a questo è necessario prevedere gli effetti che i comuni interventi di riqualificazione energetica hanno sul nostro ambiente costruito considerando quelli che saranno gli scenari climatici futuri. In particolare, questa ricerca, analizza gli effetti degli scenari proposti sul caso studio di Santa Maria degli Angeli, Assisi che rappresenta un edificio con elevati consumi energetici durante l'arco dell'intera giornata.

La tabella 22 riassume il consumo totale mensile relativo al consumo dell'energia elettrica (compreso il sistema HVAC, la refrigerazione, l'illuminazione artificiale relativi agli ambienti destinati alla vendita, l'illuminazione specialistica dei banchi e le attrezzature per la preparazione degli alimenti) nei diversi scenari climatici.

La tabella 23 mostra, come previsto, che gli scenari futuri, caratterizzati dall'aumento della temperatura dell'aria esterna come illustrato nella sezione precedente, porteranno ad un aumento significativo del consumo energetico, in particolare durante l'estate (giugno-agosto). Le proiezioni per il 2070 mostrano un potenziale aumento del consumo energetico di circa il 30% a giugno e del 50% a luglio e agosto per l'HVAC e del 4% a giugno e del 6% a luglio e agosto per la refrigerazione. Nel complesso, nel caso di studio analizzato, si stima un aumento del consumo energetico totale del 5% entro il 2050 e del 6% entro il 2070 rispetto alla situazione attuale. Queste tendenze sottolineano l'esigenza di promuovere strategie di ammodernamento efficaci per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici mitigando l'impatto che il cambiamento climatico ha su quest'ultimi, in particolare con riguardo agli edifici di vendita al dettaglio di prodotti alimentari su larga scala.

Mese	Anno	Consumi HVAC [MWh]	Consumi refrigerazione [MWh]	Consumi totali [MWh]
Gennaio	2022	9	44	66
	2050	11	43	67
	2070	11	44	68
Febbraio	2022	4	43	60
	2050	3	43	59
	2070	4	43	60
Marzo	2022	9	43	65
	2050	8	43	66
	2070	8	43	66
Aprile	2022	5	45	63
	2050	6	45	64
	2070	6	45	64
Maggio	2022	16	45	74
	2050	18	45	76
	2070	19	45	77
Giugno	2022	20	48	81
	2050	26	48	87
	2070	26	50	89
Luglio	2022	25	48	86
	2050	35	50	98
	2070	38	50	101
Agosto	2022	24	48	85
	2050	34	49	96
	2070	36	51	100
Settembre	2022	15	44	72
	2050	18	44	75
	2070	19	44	76
Ottobre	2022	8	44	65
	2050	9	44	66
	2070	9	44	66
Novembre	2022	6	44	63
	2050	6	44	64
	2070	6	44	64
Dicembre	2022	9	43	65
	2050	9	43	66
	2070	9	43	66

Tabella 22. Consumi energetici mensili (HVAC, refrigerazione e totale) negli anni 2022, 2050 e 2070.

Di seguito, lo studio oltre ad analizzare in dettaglio i vari consumi energetici, propone, in tabella 23 il consumo elettrico totale annuo negli scenari di ammodernamento rispetto agli anni analizzati precedentemente (2022, 2050 e 2070).

Scenario	Anno 2022		Anno 2050		Anno 2070	
	Consumi energetici [MWh/anno]	Risparmio energetico [%]	Consumi energetici [MWh/anno]	Risparmio energetico [%]	Consumi energetici [MWh/anno]	Risparmio energetico [%]
Baseline	846	-	884	-	897	-
A	841	0.6	858	2.9	863	3.8
B	670	21	702	21	710	21
C	608	28	638	28	648	28
D	753	11	772	13	781	13
E	841	1	864	2	869	3
C+D	504	40	528	40	539	40
A+C+D+E	495	42	520	41	527	41

Tabella 23. Confronto dei consumi energetici (elettrici) tra gli scenari di retrofit relativamente agli anni 2022, 2050 e 2070.

I risultati mostrano che lo scenario A ha il potenziale più elevato considerando gli scenari futuri del 2050 e del 2070 a causa del ruolo più rilevante della trasmittanza termica periodica dell'involucro (Y_{ie}) nella stagione calda. Nello scenario del 2022, la strategia proposta ha rilevato bassi risparmi energetici (0.6% pari a 5 MWh/anno), mentre nel 2050 e nel 2070 i potenziali risparmi potrebbero arrivare rispettivamente al 2.9% (26 MWh/anno) e al 3.8% (34 MWh/anno). Gli scenari B e C mostrano un impatto considerevole sulla riduzione del consumo energetico con una percentuale simile tra i due scenari, circa il 21% per lo scenario B e il 28% per lo scenario C, considerando gli scenari climatici futuri. Questo è dovuto all'autoconsumo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili. In effetti, prevedere l'impianto fotovoltaico in copertura consente una minore dipendenza dall'energia acquistata dalla rete. Nello specifico, nello scenario del 2022, lo scenario C risulta quello più efficace consentendo un risparmio di 238 MWh/anno, mentre nel 2050 e nel 2070 il risparmio potenziale potrebbe arrivare rispettivamente a 246 MWh/anno e 249 MWh/anno.

È interessante considerare lo scenario D, che si concentra sulla sostituzione degli apparecchi di illuminazione convenzionali con tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico. Questa strategia produce un significativo risparmio energetico, stimato intorno all'11-12% in tutti gli scenari, corrispondenti ad una riduzione di circa 100 MWh/anno. Tali miglioramenti nella tecnologia dell'illuminazione svolgono un ruolo

fondamentale negli sforzi complessivi di risparmio energetico nel settore del commercio al dettaglio alimentare su larga scala, dove l'illuminazione ha un ruolo rilevante e un corrispondente impatto non trascurabile sul consumo energetico totale.

La strategia progettuale dello scenario E mira a ridurre il consumo energetico associato al recupero del calore dal ciclo di refrigerazione da utilizzare per il riscaldamento durante la stagione invernale. Sebbene questa strategia comporti una notevole riduzione del consumo energetico legato al riscaldamento (circa il 20%), si traduce in una modesta diminuzione complessiva del consumo dello 0.6% (5 MWh/anno) nel clima dell'anno 2022 a causa del minore contributo del riscaldamento sul consumo totale di elettricità degli edifici adibiti alla vendita al dettaglio di prodotti alimentari. Tuttavia, considerando gli scenari climatici futuri degli anni 2050 e 2070, lo scenario E potrebbe essere in grado di ridurre il consumo di riscaldamento degli ambienti di circa il 40%, ottenendo una riduzione totale del consumo di elettricità di circa il 2-3%, ovvero 20-25 MWh/anno.

Nello studio proposto, poiché le strategie proposte possono essere abbinate tra loro, sono stati valutati diversi scenari combinati. Negli scenari C+D e A+C+D+E la diminuzione del consumo di energia elettrica è maggiore rispetto ai singoli scenari. Questi garantiscono costantemente maggiori risparmi energetici nei diversi anni analizzati, raggiungendo rispettivamente un risparmio di circa il 40% considerando l'anno 2022 e oltre il 40% per gli anni 2050 e 2070.

La tabella 24 mostra un'analisi comparativa del consumo energetico nei diversi scenari esaminando le diverse categorie di consumo energetico: HVAC, illuminazione, refrigerazione e fotovoltaica. Include sia le proiezioni relative all'anno 2022 che quelle future (2050 e 2070), per il baseline e gli scenari più efficaci C+D e A+C+D+E.

In particolare, gli scenari futuri sono utilizzati per valutare la variazione dei consumi energetici associati al sistema edificio-impianto, mentre la produzione fotovoltaica è assunta pari a quella dello scenario di riferimento. Questa assunzione consente di distinguere il contributo degli interventi di riduzione della domanda energetica dal contributo della produzione locale da fonte rinnovabile.

Si riconosce tuttavia che una simulazione climatica futura completa, comprensiva della variazione della radiazione solare incidente, della copertura nuvolosa e della temperatura operativa dei moduli, potrebbe determinare variazioni nella produzione fotovoltaica. Tale aspetto costituisce un limite dell'analisi e rappresenta un possibile sviluppo futuro del lavoro.

Scenario	Consumi HVAC [MWh/anno]	Variazione HVAC [%]	Consumi illuminazione [MWh/anno]	Variazione illuminazione [%]	Consumi Refrigerazione [MWh/anno]	Variazione refrigerazione [%]	PV [kWh]	
Baseline	2022	144	-	161	-	541	-	-
	2050	177	+19	161	-	546	+1	-
	2070	187	+30	161	-	549	+2	-
C+D	2022	144	-	64	-60	541	-	238
	2050	166	-6	64	-60	545	-	238
	2070	172	-8	64	-60	548	-	238
A+C+D+E	2022	128	-11	64	-60	541	-	238
	2050	148	-16	64	-60	546	-	238
	2070	153	-18	64	-60	548	-	238

Tabella 24. Confronto tra le differenti categorie di consumi energetici tra lo stato di fatto e gli scenari C+D e A+C+D+E per gli anni 2022, 2050 e 2070: HVAC, illuminazione, refrigerazione e produzione di energia rinnovabile.

Secondo lo scenario che analizza lo stato di fatto (baseline) nel clima dell'anno 2022, il consumo elettrico relativo al sistema HVAC è di 144 MWh/anno. L'analisi condotta nel presente studio mostra un aumento relativo a quest'ultimo di 177 MWh/anno nel 2050 (+19%) e a 187 MWh/anno nel 2070 (+30%). Nel 2050, con la realizzazione dello scenario C+D, il consumo elettrico relativo al sistema HVAC è di 166 MWh/anno quindi in diminuzione del 6% rispetto allo stato di fatto nello stesso anno di analisi. Nel 2070, lo stesso scenario (C+D) mostra che è possibile ridurre dell'8% i consumi relativi al sistema HVAC rispetto al valore relativo allo stato di fatto nello stesso anno.

Lo scenario A+C+D+E, mostra che il consumo di energia elettrica per il funzionamento del sistema HVAC si riduce a 128 MWh/anno (-11%) nell'anno 2022, raggiungendo i 148 MWh/anno nel 2050 (+3%) e i 153 MWh/anno nel 2070 (+6%). Tuttavia, nel 2050, lo scenario A+C+D+E consente di ridurre di circa il 16% il consumo energetico per il sistema HVAC rispetto al valore dello stato di fatto e, nel 2070, circa il 18%.

Analisi differente può essere condotta analizzando i consumi relativi all'illuminazione, infatti, nello stato di fatto quest'ultimi si mostrano costanti a 161 MWh/anno in tutti gli scenari climatici, poiché non dipende dalle variazioni climatiche ma dalle esigenze di illuminazione artificiale interna. Nello scenario C+D e nello scenario A+C+D+E, il

consumo energetico per l'illuminazione diminuisce a 64 MWh/anno in tutti gli scenari, con un risparmio energetico del 60% rispetto allo stato di fatto.

Infine, il consumo energetico per la refrigerazione è di 541 MWh/anno nello stato di fatto considerando il clima dell'anno 2022. Quest'ultimo aumenta a 546 MWh/anno nel 2050 (+1%) e a 549 MWh/anno nel 2070 (+2%). Tuttavia, nello scenario C+D, il consumo energetico per la refrigerazione diminuisce a 534 MWh/anno (-1%) nell'anno 2022, raggiungendo i 536 MWh/anno pari ad una riduzione del 2% rispetto allo stato di fatto relativo al 2050. Nel 2070, lo scenario C+D mostra un leggero aumento a 541 MWh/anno pari ad una diminuzione dell'1% rispetto allo stato di fatto nello stesso anno.

In conclusione, si deduce che lo scenario di base mostra un aumento del consumo energetico relativo al sistema HVAC e alla refrigerazione nel tempo. Lo scenario più efficace, soprattutto considerando l'attuale arco temporale, è A+C+D+E a causa di un'importante riduzione del consumo energetico del sistema HVAC, con aumenti minimi previsti nel tempo. Entrambi gli scenari di intervento mostrano una riduzione sostanziale del consumo energetico per l'illuminazione (circa il 60%) rispetto al valore di base.

Lo studio proposto, oltre ad affrontare la tematica del risparmio energetico, sviluppa un'analisi di quello che è l'impatto ambientale delle strategie proposte; quindi, viene analizzato in termini di riduzione emissioni di CO₂ durante la fase operativa e quindi durante la fase operativa dell'edificio. Con fase operativa dell'edificio indichiamo il periodo che va dall'entrata in funzione dell'edificio fino alla fine della sua vita utile. In questa fase l'edificio è occupato, utilizzato e mantenuto. La Figura 19 mostra le emissioni CO₂ durante la fase operativa mensile in tonnellate per i vari scenari edilizi nei climi degli anni 2022, 2050 e 2070, comprese le condizioni effettive e i diversi scenari di ammodernamento. Tali emissioni sono derivanti dal consumo energetico operativo. Il calcolo di questo impatto ambientale tiene conto della transizione energetica che entro il 2050 comporterà l'utilizzo di fonti energetiche derivate esclusivamente da fonti rinnovabili.

Le prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio oggetto dello studio sono state valutate attraverso un'analisi dettagliata della percentuale di risparmio energetico e della percentuale di risparmio operativo di CO₂ nel tempo, come rappresentato nella figura 19.

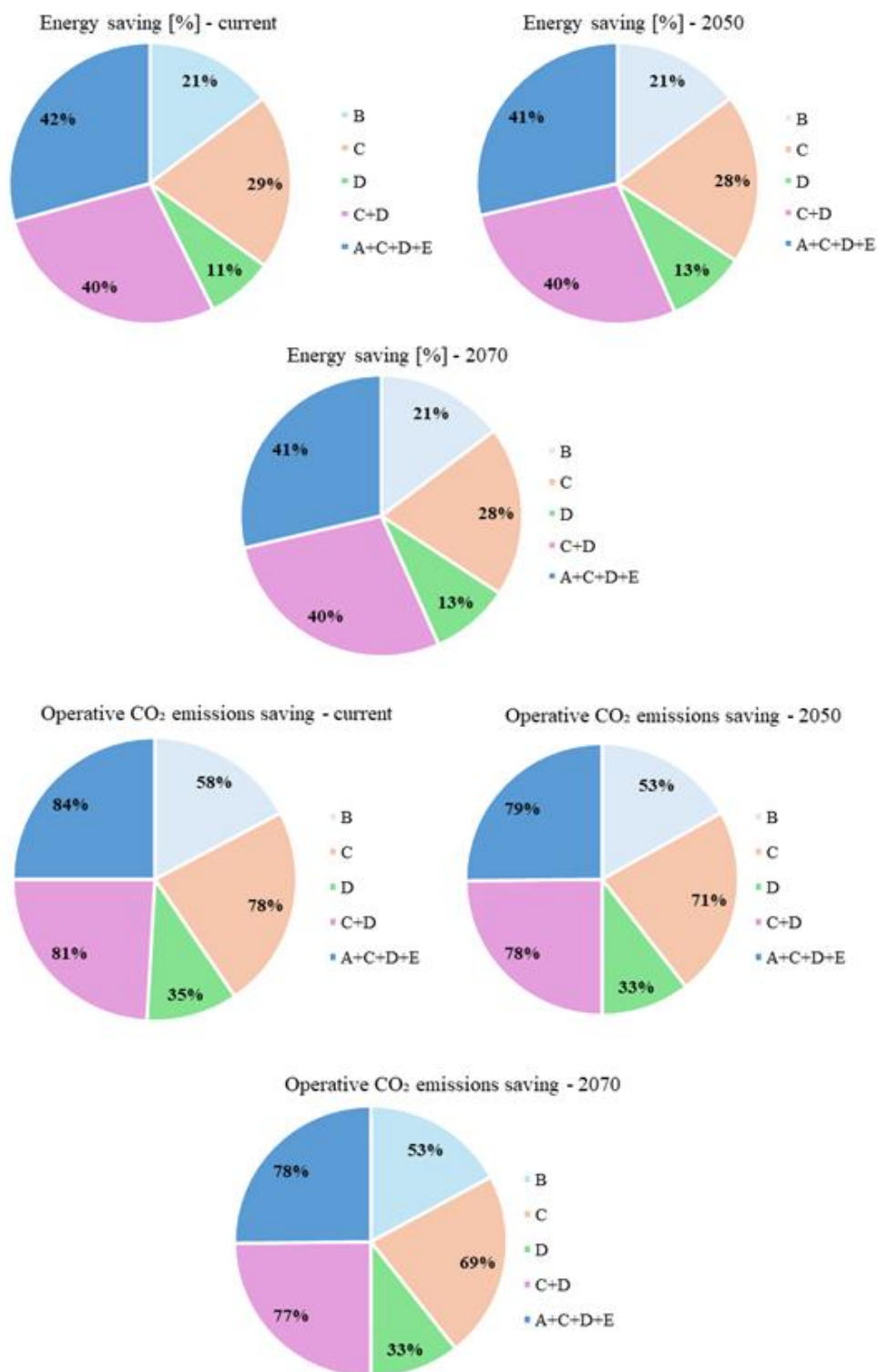


Figura 19. Percentuale di risparmio energetico e miglioramento delle prestazioni ambientali degli scenari proposti rispetto allo stato di fatto negli anni 2022, 2050 e 2070.

La figura 19 mostra il risparmio energetico espresso in % e il risparmio di emissioni di CO₂ per gli anni 2022, 2050 e 2070. I grafici a torta mostrano i risultati relativi all'efficienza energetica e alla riduzione delle emissioni di CO₂ nel tempo per i diversi scenari proposti (B, C, D, C+D, A+C+D+E).

Dall'analisi dei risultati si può affermare che i diversi scenari proposti fanno ottenere generalmente risultati simili in merito al risparmio energetico totale dell'edificio. Sebbene, in precedenza, si è mostrato che nel corso degli scenari futuri si riscontrano aumenti dell'utilizzo di energia elettrica, i diversi scenari hanno comunque percentuali di riduzione dell'utilizzo stesso simili tra loro indipendentemente dall'anno di analisi. Da questa analisi emergono i punti di forza degli scenari proposti, in quanto pur non ottenendo una riduzione dei consumi prossima allo zero, rendono l'edificio resiliente agli aumenti dei consumi energetici e all'eventuale aumento dei costi energetici. Infine, tra tutti gli scenari analizzati, gli scenari C+D e A+C+D+E si classificano come scenari leader per la riduzione dei consumi energetici andando a diminuire questi ultimi di circa il 40% in tutti e tre gli anni di analisi. Nonostante le percentuali minori, anche gli scenari B, C e D ottengono percentuali considerevoli di riduzione dell'uso di energia elettrica e, come detto precedentemente, anche questi scenari confermano una riduzione uguale in tutti e tre gli scenari temporali analizzati.

La seconda parte della Figura 19 mostra la percentuale di risparmio CO₂ durante la fase operativa dell'edificio negli anni 2022, 2050 e 2070.

Nell'anno 2022, lo scenario A+C+D+E registra il risparmio di CO₂ più elevato, pari all'84%, seguito dallo scenario C+D con l'81%. Lo scenario D contribuisce per il 78%, lo scenario B contribuisce per il 58% e lo scenario C rappresenta il 35% del risparmio di CO₂.

Entro il 2050 la distribuzione cambierà leggermente. Lo scenario A+C+D+E è ancora in testa con il 79%, mentre lo scenario C+D scende leggermente al 78%. Lo scenario D fornisce il 71% dei risparmi, lo scenario B aumenta al 53% e lo scenario C rimane stabile al 33%.

Nel 2070, lo scenario A+C+D+E continua a garantire riduzioni di CO₂ più elevati, pari al 78%, mentre lo scenario C+D si attesta al 77%. Si prevede che l'implementazione dello scenario D consentirà una riduzione di CO₂ pari al 69%, mentre lo scenario B del 53% e lo scenario C resta costante al 33%.

Nel complesso, come affermato precedentemente, la combinazione di più soluzioni di retrofit rappresentata dallo scenario A+C+D+E consente di ottenere costantemente i maggiori risparmi di energia e CO₂ in tutti gli intervalli temporali. Sebbene anche le singole misure contribuiscono in modo significativo, il loro impatto relativo rimane costante nel tempo. Questa analisi sottolinea l'importanza di un approccio integrato che

combini molteplici strategie per massimizzare sia il risparmio energetico che i benefici ambientali a lungo termine.

5.1.2 Limiti interpretativi degli scenari energetici futuri

Gli scenari energetici sviluppati sono principalmente basati sull'influenza delle future condizioni climatiche sui consumi energetici degli edifici retail alimentari. Tuttavia, considerando l'orizzonte temporale esteso dell'analisi, fino al 2070, è ragionevole ipotizzare che ulteriori fattori possano influenzare significativamente il comportamento energetico del settore. Tra i principali limiti rientrano elementi di incertezza come l'evoluzione delle tecnologie di refrigerazione a basso Potenziale di Riscaldamento Globale (Global Warming Potential (GWP)), la diffusione di sistemi HVAC ad alta efficienza, l'integrazione di algoritmi di controllo predittivo basati su intelligenza artificiale, l'evoluzione della normativa energetica europea, l'introduzione di ulteriori meccanismi di carbon pricing, la diffusione di sistemi energetici decentralizzati e l'evoluzione dei modelli distributivi del retail alimentare.

In particolare, la crescente digitalizzazione del settore potrebbe modificare significativamente i profili di utilizzo energetico degli edifici commerciali, introducendo nuove logiche di gestione dinamica dei carichi energetici. Inoltre, le stesse modalità di frequentazione dei retail della GDO potrebbero, nel tempo, subire trasformazioni che possono condurre all'acquisto esclusivamente online anche dei prodotti alimentari, portando quindi i consumi energetici a drastiche riduzioni in quanto il classico retail si potrebbe trasformare in un magazzino di stoccaggio predisposto alla sola vendita del prodotto tramite spedizione con corrieri o droni.

Pertanto, i risultati ottenuti devono essere interpretati come scenari tecnico-comparativi finalizzati a valutare la risposta energetica degli edifici retail rispetto ai cambiamenti climatici e alle strategie di retrofit considerate.

5.2 Interventi sulla catena del freddo

Il presente paragrafo analizza gli interventi di riqualificazione energetica applicati alla catena del freddo nei retail della GDO, con particolare riferimento ai sistemi di refrigerazione alimentare, che costituiscono il principale consumo energetico nella fase operativa. Lo studio si focalizza in modo prioritario sulla chiusura dei banchi frigoriferi alimentari, individuata come intervento cardine, semplice e facilmente realizzabile negli edifici esistenti per la riduzione dei fabbisogni energetici elettrici e delle dispersioni termiche all'interno dell'area di vendita.

L'analisi prende avvio dalla caratterizzazione dello stato di fatto dei casi studio, valutando le prestazioni energetiche ed ambientali dei sistemi di refrigerazione esistenti e quantificando gli effetti della sostituzione dei banchi frigo aperti con banchi chiusi dotati di ante vetrate. Tale intervento consente di ridurre in maniera significativa i carichi frigoriferi, di limitare gli scambi termici indesiderati con l'ambiente interno e di migliorare l'interazione tra la catena del freddo e HVAC.

I risultati presentati consentono di valutare l'efficacia del singolo intervento, fornendo indicazioni quantitative utili alla definizione di strategie di riqualificazione energetica replicabili nel settore.

Per la valutazione delle prestazioni del sistema di refrigerazione, considerando il sistema edificio-impianto dei supermercati, vengono utilizzati dati sperimentali e informazioni reali. Vengono raccolte informazioni sul consumo energetico di due negozi al dettaglio di prodotti alimentari in Italia, simili per dimensioni e offerta di prodotti, compresi i carichi energetici totali e specifici dovuti alla refrigerazione, gli orari di apertura dei negozi, le impostazioni della temperatura, il traffico dei clienti, gli edifici, le caratteristiche del sistema di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) e le caratteristiche delle vetrine frigorifere. Tutte le analisi energetiche sono supportate dalla creazione di simulazioni dinamiche. L'approccio BEM viene utilizzato per ottenere un gemello digitale (DT) di edifici per effettuare confronti dettagliati.

Il contesto climatico influisce sulle prestazioni termofisiche ed energetiche degli edifici, ma non influisce specificamente sulle prestazioni dei banchi frigo refrigerati, che dipendono principalmente da altri parametri. Infatti, i frigoriferi sono progettati per mantenere la loro efficienza e funzionalità indipendentemente dalle variazioni climatiche interne ed esterne. L'analisi energetica del sistema edificio-impianto è collegata alle condizioni di lavoro HVAC e alla catena del freddo mediante l'approccio a cascata, per un recupero termodinamico del calore. Le variazioni climatiche esterne vengono prese in considerazione perché implicano un cambiamento importante nel sistema di gestione e controllo. Viene suggerito un sistema di controllo adattivo e proporzionale per l'HVAC, integrato con le soluzioni di efficienza energetica proposte. Questo studio non si occupa specificamente del sistema energetico dei banchi frigo refrigerati e non indaga soluzioni

per migliorare il funzionamento (ad esempio, compressore, ciclo termodinamico, ecc.), l'efficienza, la riduzione e/o l'eliminazione della formazione di gelo, né la possibilità di utilizzare fluidi refrigeranti nuovi e più efficaci, ecc.

La ricerca mira a garantire l'uso efficace e a basso impatto ambientale dell'energia di impianti frigo esistenti in edifici esistenti, in vista della transizione verso l'energia verde, attraverso la valutazione di soluzioni ottimali ed efficaci per i banchi frigo, facili da implementare e a basso costo. Questa soluzione è estendibile a molti altri casi simili e collegabile anche ad un sistema di controllo e gestione dell'edificio (ad es. Konnex), al quale verrebbe collegato il set di sensori di cui sarebbero dotati l'edificio e le diverse vetrine refrigerate nell'implementazione di un BEM-DT.

Il primo caso (c.1) preso in considerazione in questo studio è un edificio per la vendita al dettaglio di prodotti alimentari sito ad Assisi, in Italia. Il secondo caso (c.2) è un edificio per la vendita al dettaglio di prodotti alimentari situato ad Anagni. La figura 20 mostra il modello BEM e la vista aerea dei casi studio in esame. Entrambi i casi di studio si trovano all'interno di un centro commerciale con altri negozi al dettaglio non alimentari.

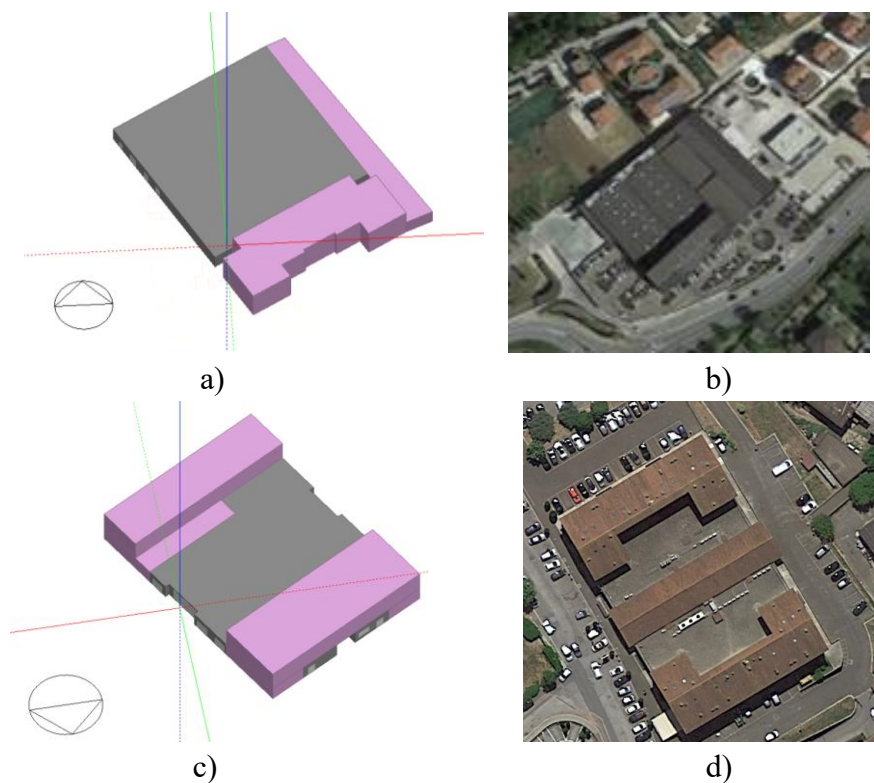


Figura 20. a) Vista assonometrica del modello BEM di c.1 (il volume grigio è l'edificio del caso di studio, mentre i volumi viola rappresentano le zone circostanti nel centro commerciale), b) vista aerea di c.1, c) vista assonometrica del modello BEM di c.2 e d) vista aerea di c.2.

Secondo lo strumento di simulazione utilizzato (motore di simulazione EnergyPlus con interfaccia DesignBuilder), i dati e le condizioni al contorno raccolti sono quelli dettagliati di seguito:

- **Dati meteorologici:** Per la raccolta dei dati meteorologici, vengono utilizzati database meteorologici relativi alle due città per accedere ai dati meteorologici storici per l'area geografica circostante i diversi casi di studio selezionati. Il database da cui sono stati ottenuti i dati meteorologici orari reali del 2021 dei due casi di studio è climate.onebuilding.org [64]. Pertanto, i dati meteorologici vengono inseriti nel modello BEM per valutarne accuratamente l'impatto sul consumo energetico e sulle prestazioni ambientali.
- **Orari di apertura e schede di occupazione:** Lo studio usa il programma operativo dettagliato contenente gli orari di apertura, le schede occupazionali negli specifici orari e i consumi energetici dei casi studio selezionati. Gli orari di lavoro sono uguali nei due casi studio e questo garantisce un'analisi comparativa migliore. Infatti, entrambi gli edifici sono aperti al pubblico tutti i giorni dell'anno dalle 8:30 alle 20:30, mentre l'orario di lavoro dei dipendenti è dalle 6:00 alle 21:00.
- **Sistemi HVAC e dati tecnici:** La tabella 25 confronta i diversi sistemi HVAC nei due supermercati. Entrambi sono molto simili, nonostante il caso studio c.1 abbia una dimensione in pianta maggiore rispetto al caso studio c.2. Le zone termiche di entrambi i casi di studio sono l'area vendite, i magazzini, gli uffici, gli spogliatoi, il locale tecnico e l'area di preparazione degli alimenti.

	c.1	c.2
Area	1852 m ²	1279 m ²
Area climatizzata	1807 m ²	1134 m ²
Volume climatizzato	9036 m ³	3970 m ³
Area delle pareti trasparenti	40 m ²	57 m ²
HVAC	L'edificio è dotato di due diversi sistemi HVAC, il primo con cinque unità di trattamento aria (AHU) e cinque pompe di calore per l'area di vendita e l'area di preparazione degli alimenti e il secondo con una AHU e una pompa di calore per il magazzino.	L'edificio è dotato di due diversi sistemi HVAC, il primo con cinque AHU con cinque pompe di calore per l'area di vendita e uno con una AHU e una pompa di calore per l'area di preparazione degli alimenti.
Caratteristiche dell'impianto HVAC	Per ogni pompa di calore del primo impianto sopra citato si ha: portata d'aria 5340 m ³ /h, COP: 3,05 ed EER: 3,01, capacità di riscaldamento	Per ogni pompa di calore del primo impianto si ha: portata d'aria 3200 m ³ /h, COP: 3,05 ed EER: 3,11, capacità di riscaldamento totale: 19,5

totale: 27 kW, capacità di kW, capacità di raffreddamento
raffreddamento totale: 25 kW. Per la totale: 16,5 kW. Per la pompa di
pompa di calore del secondo calore del secondo si ha: portata
impianto si ha: portata d'aria 10260 d'aria 930 m³/h, COP: 3,42 ed EER:
m³/h, COP: 4,38 ed EER: 4,31, 3,21, capacità di riscaldamento
capacità di riscaldamento totale: 22,4 totale: 8 kW, capacità di
kW, capacità di raffreddamento raffreddamento totale: 7,1 kW.
totale: 25 kW.

Tabella 25. Diversi sistemi HVAC nei casi studio selezionati.

- **Caratteristiche e dati dei banchi frigo.** Le tabelle 26 e 27 riassumono il numero, le dimensioni (lunghezza in cm), il tipo di banco e la temperatura operativa dei frigoriferi presenti nei casi studio. In c.1 sono dotate di porte vetrate solo le macchine per i prodotti congelati, mentre in c.2 tutte le macchine presenti sono dotate di porte battenti in vetro che ne permettono la chiusura.

c.1				
Numero	Tipologia	Dimensioni (cm)	Chiuso/ Aperto	Potenza (kW)
5	LEOLS25	250	Chiuso	0.5
2	MUSNST	250	Aperto	0.4
5	MUSNS25	250	Aperto	0.4
1	MUSNS12	120	Aperto	0.4
3	TORL-37	375	Chiuso	1.2
2	TORL-25	250	Chiuso	1.2
3	TORL-I	250	Chiuso	1.1
1	ROLIV	250	Aperto	0.6
1	MUSNM	375	Aperto	0.4
2	XTML1	250	Aperto	0.6
2	QUBLS25	250	Aperto	0.5
2	QUBLSC4	100	Aperto	0.8
2	QUBLS37	375	Aperto	0.5

Tabella 26. Caratteristiche dei banchi frigo presenti nel caso studio c.1.

c.2				
Numero	Tipologia	Dimensioni (cm)	Chiuso/ Aperto	Potenza (kW)
1	DANAOS85HA	375	Chiuso	0.3
4	DANAOS85HA	250	Chiuso	0.3
1	MIRADO64B3	375	Chiuso	0.5
2	MIRADO64GSB6	375	Chiuso	1.0
1	MIRADO64GSB6	250	Chiuso	1.2
1	THETIS85HA	250	Chiuso	0.9
1	THETIS85HA	125	Chiuso	0.9
2	AIB45S	250	Chiuso	0.7
2	AIB45S	375	Chiuso	0.5
2	MONAXIS73GDC6	375	Chiuso	0.6

Tabella 27. Caratteristiche dei banchi frigo presenti nel caso studio c.2.

La tabella 28 mostra il consumo di elettricità di refrigerazione ottenuto dalle simulazioni dei modelli energetici dei casi studio. Il consumo della refrigerazione è stato trattato considerando le interazioni con l'ambiente e con il sistema HVAC. Infatti, il modello BEM realizzato con EnergyPlus con interfaccia DesignBuilder è stato sviluppato implementando il sistema di controllo del profilo di apertura e chiusura dei centri. L'interazione tra refrigerazione e ambiente è stata rappresentata considerando che i banchi frigoriferi contribuiscono al bilancio termico dell'area di vendita attraverso scambi sensibili e latenti. Tuttavia, in assenza di dati monitorati puntuali sui profili di apertura delle ante, sui carichi latenti effettivi, sulle portate di infiltrazione e sulle condizioni termoigrometriche locali in prossimità dei banchi, tali interazioni sono state modellate mediante assunzioni semplificative. Le condizioni interne di riferimento sono state definite attraverso i setpoint termoigrometrici del sistema HVAC, mentre i profili di funzionamento delle apparecchiature frigorifere sono stati assunti coerenti con il funzionamento continuo richiesto per la conservazione degli alimenti e con i profili di occupazionali dell'edificio.

Pertanto, i consumi di refrigerazione riportati nei risultati non devono essere interpretati come valori completamente indipendenti dal sistema edificio-impianto, ma come contributi energetici specifici della catena del freddo inseriti all'interno del bilancio complessivo del modello BEM. Allo stesso tempo, occorre precisare che il modello non riproduce in modo rigoroso gli scambi termici e di massa, affrontando ad esempio problematiche come la formazione di brina e di evapotraspirazione interna ai banchi frigo, ma rappresenta una modellazione semplificata e coerente, degli effetti termodinamici interni all'ambiente.

Mese	c.1 [kWh/m ²]	c.2 [kWh/m ²]
Gennaio	14.76	4.85
Febbraio	13.41	4.38
Marzo	14.66	4.88
Aprile	14.04	4.69
May	14.48	4.83
Giugno	14.19	4.71
Luglio	14.65	4.84
Agosto	14.66	4.85
Settembre	13.98	4.86
Ottobre	14.45	4.83
Novembre	14.21	4.70
Dicembre	14.85	4.84
Annuale	159.57	52.38

Tabella 28. Confronto dei consumi elettrici della refrigerazione nei due casi studio.

In c.1, il consumo di elettricità per la refrigerazione è pari a 159.57 kWh/m² annuo e rappresenta il 36% del consumo totale di elettricità, rispetto al 18% in c.2 che è pari a 52.38 kWh/m² annuo. La soluzione di utilizzare solo banchi frigo dotati di porte per la chiusura può ridurre notevolmente il consumo energetico della refrigerazione alimentare e di conseguenza può ridurre il consumo totale di energia elettrico. Infatti, come dimostrato dallo studio condotto, si ha una riduzione di circa il 70% dell'uso di energia elettrica per la refrigerazione.

Di conseguenza, questa importante riduzione del consumo energetico si riflette sulle emissioni di CO₂ e quindi su quello che è l'impatto ambientale dell'impianto di refrigerazione. La figura 21 mostra le emissioni di CO₂ in una giornata tipo legati alla refrigerazione alimentare dei due casi studio.

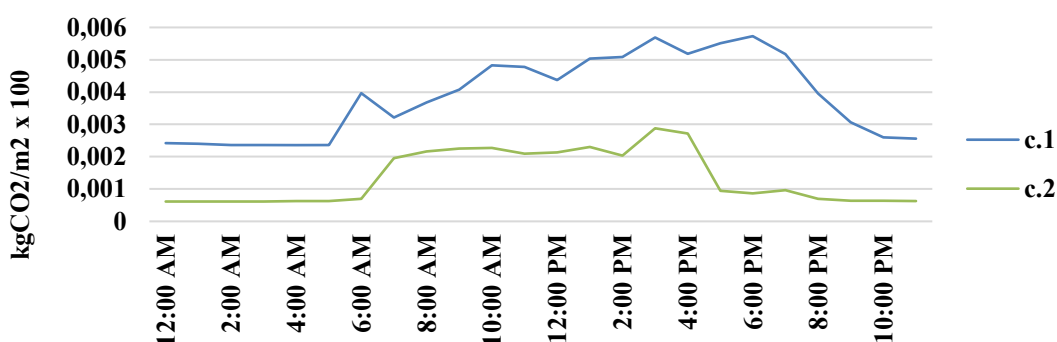


Figura 21. Confronto delle emissioni in kgCO₂/m²x100 durante una giornata tipo della refrigerazione alimentare nei due casi studio.

Le prestazioni dei banchi frigo alimentari sono influenzate principalmente dalle fasi di apertura e chiusura, data la loro tecnologia industriale. Il potenziale risparmio energetico

per un anno intero, ottenuto con l'intervento di controllo dell'intero sistema edificio-impianto collegato alla gestione termodinamica della catena del freddo, può tradursi nella riduzione dei costi e delle emissioni di CO₂ per i supermercati (ad esempio, se c.l. avesse armadi chiusi, il consumo di energia elettrica per la refrigerazione sarebbe stato di circa 92 kWh/m² annui, con una riduzione delle emissioni di CO₂ di circa il 39% e un risparmio di circa 22.000 euro).

In conclusione, lo studio dimostra che l'uso di sistemi di chiusura dei banchi frigo, quali le porte a battente in vetro, consentono di ottenere un consumo energetico per la refrigerazione inferiore alla media. Rispetto ad altre soluzioni di efficienza (ad esempio, la sostituzione di pannelli HVAC o fotovoltaici) questa soluzione per offrire rapida applicabilità ed è economicamente vantaggiosa oltre che applicabile ovunque. Inoltre, questa soluzione può essere collegata ad un sistema di gestione e controllo utile dal punto di vista energetico ed economico per l'azienda. Lo studio del controllo e della regolazione dell'utilizzo banchi refrigerati con sistemi di chiusura implementati a sensori di illuminazione migliorerebbe le prestazioni dell'intero sistema. Ciò consente una gestione intelligente del sistema edificio-impianto tramite DT poiché questi modelli possono essere facilmente interconnessi con i sistemi di controllo.

5.3 Valorizzazione dell'uso dell'illuminazione naturale negli edifici della GDO

Analizzare e valutare le strategie di valorizzazione dell'illuminazione naturale nei retail della GDO può ottenere riduzioni significative dei consumi energetici associati all'illuminazione artificiale e contemporaneamente migliorare la qualità dell'ambiente interno degli spazi di vendita.

La presente sezione riporta i risultati dell'applicazione della procedura di modellazione dell'illuminazione descritta nella metodologia ai tre casi studio analizzati discutendo i risultati ottenuti dagli scenari di captazione e regolazione della luce naturale.

Il confronto tra gli scenari considera la riduzione del consumo elettrico per illuminazione artificiale e, quando incluso nel modello energetico, gli effetti indiretti sui carichi termici interni e sui fabbisogni HVAC. I risultati devono quindi essere letti in relazione alle assunzioni metodologiche esplicitate nella sezione dedicata alla modellazione dell'illuminazione.

L'analisi è condotta a partire dallo stato di fatto dei casi studio, valutando le prestazioni illuminotecniche ed energetiche degli spazi interni in relazione alla configurazione architettonica della copertura, alla distribuzione delle superfici vetrate e alla presenza di elementi di captazione zenitale, quali lucernari e shed. Vengono esaminati diversi scenari di intervento finalizzati a massimizzare l'utilizzo della luce diurna attraverso soluzioni progettuali e tecnologiche integrate, tra cui l'ottimizzazione delle superfici trasparenti,

l'adozione di sistemi di controllo automatico del flusso luminoso e l'integrazione tra illuminazione naturale e artificiale interconnessi a sistemi konnex.

I risultati consentono di quantificare i benefici energetici derivanti dalla riduzione delle ore di funzionamento dell'illuminazione artificiale e di valutare gli effetti indiretti sui carichi termici interni e sulle prestazioni dei sistemi HVAC. L'analisi fornisce inoltre indicazioni operative sulla replicabilità delle strategie proposte nel contesto dei retail della GDO, evidenziando il ruolo dell'illuminazione naturale come elemento chiave nei processi di riqualificazione energetica e ambientale di tali edifici.

5.3.1 La progettazione parametrica delle coperture nei retail della GDO

I casi studio proposti presentano condizioni al contorno, struttura, contesto urbano e contesto climatico diversi; e presentano alcune caratteristiche simili se presi a coppie di due. La tabella 29 riassume le caratteristiche principali dei casi studio selezionati.

	Caso studio 1	Caso studio 2	Caso studio 3
ID	C.1	C.2	C.3
Location	Anagni, Italia (N 41.73, E 13.13, 226 m sul livello del mare)	Rome, Italia (N 41.88, E 12.54, 42 m sul livello del mare).	Assisi, Italia (N 40.03, E 12.34, 218 m sul livello del mare)
Zona climatica italiana (DPR 412/93) [30] and Law 10/91 [44]	D 1911 GG	D 1415 GG	E 2289 GG
Classificazione climatica Köppen-Geiger [78]	Warm-Temperate (Csb)	Warm-Temperate (Csb)	Sub-Coastal Temperate (Csc)
Contesto urbano	Quartiere commerciale. Il supermercato è situato al piano terra di un edificio residenziale.	Quartiere residenziale. Il supermercato è situato al piano terra di un edificio residenziale all'interno di una galleria commerciale con altri negozi non alimentari.	Quartiere commerciale. Il supermercato è situato in un centro commerciale con altri negozi al dettaglio non alimentari.
Densità di edifici nel contesto urbano	Alto	Basso	Basso

Anno di costruzione	2012	2001	2012
Caratteristiche dell'edificio	Edificio ad un piano, con un sistema strutturale composto da pilastri e travi in calcestruzzo gettato in opera. L'area di vendita è coperta da un tetto piano in calcestruzzo armato con una trasmittanza termica U di 0,345 W/m ² K, mentre la porzione centrale presenta un elemento a doppia falda con struttura in legno di 5 m (valore U di 0,211 W/m ² K). Le pareti esterne hanno una trasmittanza termica U di 0,351 W/m ² K. I telai delle finestre sono in PVC con doppi vetri riflettenti (3-16-3 mm), posizionati sulla facciata dell'edificio.	Edificio ad un piano, con struttura portante in pilastri e travi in calcestruzzo armato. Il tetto dell'area vendite è piano con una struttura in calcestruzzo armato. Il valore U è 1,147 W/m ² K. Le pareti esterne esistenti hanno un valore U di 0,904 W/m ² K. Le finestre esistenti, posizionate solo nelle pareti perimetrali, sono dotate di telai in PVC, elementi fissi antiurto e doppio vetro riflettente (3-16-3 mm).	Edificio ad un piano, con struttura portante in pilastri e travi in calcestruzzo armato. Il tetto dell'area vendita è un tetto a doppia falda con struttura in legno rivestita da pannelli isolanti prefabbricati (valore U: 0,331 W/m ² K). Le pareti esterne hanno un valore U di 0,302 W/m ² K. Le finestre esistenti, situate solo sulla parete perimetrale, hanno telai in PVC con doppio vetro riflettente (3-16-3 mm).
Superficie lorda di pavimento	1279 m ²	1816 m ²	1852 m ²
Volume condizionato	6155 m ³	9580 m ³	11782 m ³
Volume lordo	6662 m ³	9600 m ³	11833 m ³
Area delle pareti finestrate	57 m ²	55 m ²	126 m ²
HVAC	Due sistemi. Il primo per l'area vendite e dispone di cinque UTA e cinque pompe di calore. Le caratteristiche di ciascun sistema sono: portata d'aria pari a 3200 m ³ /h, COP pari a 3.05, EER pari a 3.11, capacità di riscaldamento totale pari a 19.5 kW e capacità di	Ci sono quattro UTA e quattro pompe di calore. Le caratteristiche di ciascun sistema sono: portata d'aria di 1920 m ³ /h, COP pari a 3.74, EER pari a 4.10, capacità di riscaldamento totale pari a 20.6 kW e capacità di raffreddamento totale pari a 40 kW.	Due sistemi. Il primo per l'area vendita e preparazione degli alimenti ed è dotato di cinque UTA e cinque pompe di calore. Le caratteristiche di ciascun sistema sono: portata d'aria di 5340 m ³ /h, COP pari a 3.05, EER pari a 3.01, capacità di

	raffreddamento totale pari a 16.5 kW. Il secondo sistema serve l'area di preparazione del cibo. Questo sistema è dotato di un UTA e di una pompa di calore. Le caratteristiche sono portata d'aria di 930 m³/h, COP pari a 3.42, EER pari a 3.21, capacità di riscaldamento totale pari a 8 kW e capacità di raffreddamento totale pari a 7.1 kW.		riscaldamento totale pari a 27 kW e capacità di raffreddamento totale pari a 25 kW. Il secondo sistema serve il magazzino. Questo sistema è dotato di un UTA e di una pompa di calore. Le caratteristiche sono una portata d'aria di 10260 m³/h, COP pari a 4.38, EER pari a 4.31, capacità di riscaldamento totale pari a 22.4 kW e capacità di raffreddamento totale pari a 25 kW.
Sistema di illuminazione dei locali	Lampade fluorescenti con potenza pari a 18W, 35W e 58W. Sistema di illuminazione senza sistema di controllo automatico dell'illuminazione.	Lampade fluorescenti (area di stoccaggio e area cassa) e lampade a LED (area vendite). Lampade fluorescenti esistenti con potenza pari a 18 W, 36 W e 56 W. Lampada LED esistente con potenza pari a 36W e 43W. Sistema di illuminazione senza sistema di controllo automatico dell'illuminazione.	Lampade fluorescenti con potenza pari a 18W, 32W, 35W, 58W e 70W. Sistema di illuminazione senza sistema di controllo automatico dell'illuminazione.
Orari di apertura	Tutti i giorni dell'anno (tranne alcuni giorni festivi), aperto al pubblico dalle 8:30 alle 21:00. L'apertura ai dipendenti è aperto dalle 6:00 alle 21:30.	Tutti i giorni dell'anno (tranne alcuni giorni festivi), aperto al pubblico dalle 8:30 alle 21:00. L'apertura ai dipendenti è dalle 6:00 alle 21:30.	Tutti i giorni dell'anno (tranne alcuni giorni festivi), aperto al pubblico dalle 8:30 alle 20:30. L'apertura ai dipendenti è dalle 6:00 alle 21:00.
Consumo annuale totale di energia elettrica	376 MWh annui	768 MWh annui	827 MWh annui
Consumo annuale di energia	175 MWh/anno	195 MWh/anno	185 MWh/anno

elettrica per l'illuminazione			
Mix energetico usato per l'elettricità [79]	Rinnovabili: 51.83%	Rinnovabili: 51.83%	Rinnovabili: 51.83%
	Carbone: 1.52%	Carbone: 1.52%	Carbone: 1.52%
	Gas naturale: 42.01%	Gas naturale: 42.01%	Gas naturale: 42.01%
	Petrolio: 0.47%	Petrolio: 0.47%	Petrolio: 0.47%
	Altro: 4.17%	Altro: 4.17%	Altro: 4.17%

Tabella 29. Principali caratteristiche dei casi studio.

Lo studio oltre ad analizzare i singoli edifici, prevede una classificazione di gruppi per identificare caratteristiche simili tra i casi di studio. Questo passaggio supporta la generalizzabilità e la replicabilità dei risultati. Ogni caso di studio è stato valutato e successivamente raggruppato insieme ad un altro caso studio in base a parametri chiave che influenzano l'integrazione della luce diurna e le prestazioni complessive dell'edificio.

La tabella 30 presenta la classificazione dei tre casi di studio in base a quattro parametri che influenzano le prestazioni energetiche e il potenziale di illuminazione naturale, vale a dire la zona climatica, la densità urbana, la superficie lorda e il sistema di illuminazione. Per ciascun parametro vengono raggruppati due casi studio con le stesse caratteristiche. Questo approccio consente di identificare le opportunità di ristrutturazione più adatte a diverse tipologie di supermercati e contesti con caratteristiche simili.

Parametri	Gruppo	Casi studio	Caratteristiche comuni
Zona climatica	A	C.1, C.2	Zona D, Warm-Temperate (Csb)
Densità di edifici nel contesto urbano	B	C.1, C.3	Bassa densità popolatica e quartiere commerciale (are suburbana)
Superficie lorda di pavimento [m ²]	C	C.2, C.3	>1800 m ² e alti consumi (>750 MWh/anno)
Sistema di illuminazione	D	C.1, C.3	Solo presenza di lampade fluorescenti

Tabella 30. Classificazione in gruppi dei casi di studio in base alle caratteristiche chiave.

Gli scenari di ammodernamento architettonico e tecnologico sono pensati e progettati per migliorare l'uso della luce naturale negli edifici adibiti alla vendita al dettaglio di prodotti alimentari e ridurre al minimo il consumo di elettricità e l'impatto ambientale. Gli scenari di ammodernamento proposti si concentrano sul miglioramento del sistema tetto, dove la luce diurna può essere introdotta nel modo più efficace in questa tipologia di edificio utilizzando i lucernari e quindi captando la luce zenitale. Inoltre, sono state studiate diverse tipologie di vetrate per i lucernari. Il tetto è stato considerato il luogo principale per l'integrazione di sistemi di energia rinnovabile, come i pannelli fotovoltaici (PV). Pertanto, lo studio analizza l'integrazione di lucernari e pannelli fotovoltaici sul tetto. Infine, data l'attenzione rivolta all'uso dell'energia per l'illuminazione, viene valutata

anche la combinazione con sistemi ad alta efficienza e intelligenti per il controllo dell'illuminazione artificiale. Pertanto, gli scenari di ammodernamento proposti prevedono la variazione del lucernario (integrazione, geometria, orientamento, tipo di vetratura) e l'integrazione di controlli avanzati dell'illuminazione e pannelli fotovoltaici. L'analisi viene effettuata utilizzando un approccio basato su un parametro alla volta, ovvero ogni scenario viene sviluppato variando un solo elemento mantenendo costanti tutti gli altri fattori. Inizialmente vengono creati scenari che includono solo lucernari con configurazioni diverse. Ciò consente di valutare in modo indipendente l'impatto di vari progetti di lucernari.

Per quanto riguarda le vetrate dei lucernari, lo studio propone due diverse configurazioni di vetro. Il vetro trasparente è caratterizzato da una trasmittanza della luce visibile (τ_v) dell'80%, un coefficiente di guadagno di calore solare (SHGC) di 0,70 e un valore U di $2.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Al contrario, il vetro fotocromico presenta una trasmittanza della luce visibile (τ_v) inferiore del 50% e un SHGC ridotto di 0.20, pur mantenendo lo stesso valore U di $2.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Una volta stabiliti questi scenari di base, in ciascun caso vengono aggiunti al tetto pannelli fotovoltaici con una potenza di picco di 440 W rivolti a sud e un'inclinazione di 30° , consentendo la valutazione dell'effetto combinato dei lucernari e della generazione di energia solare in loco. Successivamente, in ogni scenario, tutti gli apparecchi di illuminazione esistenti vengono sostituiti con sistemi di illuminazione a LED e DALI. Questo metodo graduale garantisce che l'influenza di ogni singolo intervento – lucernari, tipo di vetro, pannelli fotovoltaici e sistemi d'illuminazione (strategia di retrofit integrato del tetto con luce diurna – energia) – possa essere chiaramente compresa e confrontata.

La tabella 31 mostra la configurazione di ciascuno scenario di retrofit proposto. Gli scenari sono stati sviluppati considerando interventi fattibili che bilanciano efficienza energetica e praticità, tenendo conto delle condizioni strutturali esistenti di un tipico edificio adibito al commercio al dettaglio di prodotti alimentari. Sono state generate complessivamente 27 configurazioni di retrofit utilizzando un approccio di modellazione parametrica, consentendo la rapida esplorazione di alternative di progettazione in diverse condizioni al contorno.

ID	Configurazione architettonica	Orientam ento del lucernaio	Tipo di vetro	PV	LED e DALI
S.1	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Sudovest- nordest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	No	No
S.2	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Sudovest- nordest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	No
S.3	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Sudovest- nordest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	Yes
S.4	Lucernaio	Sudovest- nordest	Vetro photochromico	No	No
S.5	Lucernaio	Sudovest- nordest	Vetro photochromico	Yes	No
S.6	Lucernaio	Sudovest- nordest	Vetro photochromico	Yes	Yes
S.7	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Est-ovest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	No	No
S.8	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Est-ovest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	No
S.9	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Est-ovest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	Yes
S.10	Lucernaio	Est-ovest	Vetro photochromico	No	No
S.11	Lucernaio	Est-ovest	Vetro photochromico	Yes	No
S.12	Lucernaio	Est-ovest	Vetro photochromico	Yes	Yes
S.13	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Nord - sud	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	No	No
S.14	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Nord - sud	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	No

S.15	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Nord - sud	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	Yes
S.16	Lucernaio	Nord - sud	Vetro photochromico	No	No
S.17	Lucernaio	Nord - sud	Vetro photochromico	Yes	No
S.18	Lucernaio	Nord - sud	Vetro photochromico	Yes	Yes
S.19	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Sudest- nordovest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	No	No
S.20	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Sudest- nordovest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	No
S.21	Lucernaio e controsoffitto il policarbonato all'interno	Sudest- nordovest	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	Yes
S.22	Lucernaio	Sudest- nordovest	Photochromic glass	No	No
S.23	Lucernaio	Sudest- nordovest	Photochromic glass	Yes	No
S.24	Lucernaio	Sudest- nordovest	Photochromic glass	Yes	Yes
S.25	Copertura a shed	–	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	No	No
S.26	Copertura a shed	–	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	No
S.27	Copertura a shed	–	Clear glass + Argon + Clear glass + Argon + Clear glass (3-6-3-6-3 mm)	Yes	Yes

Tabella 31. Configurazioni degli scenari di ammodernamento e captazione della luce diurna proposti.

L'analisi comparativa dei 27 scenari di ammodernamento nei tre casi di studio offre preziose informazioni sull'efficacia e sui limiti dei lucernari per l'integrazione della luce diurna, del tipo di vetro, dei pannelli fotovoltaici e delle strategie di miglioramento dei sistemi di illuminazione negli edifici destinati alla vendita al dettaglio di prodotti

alimentari. I risultati mostrano come le strategie di ammodernamento possano essere personalizzate in base alla tipologia degli edifici, al contesto climatico e alle caratteristiche operative – fornendo un quadro replicabile per la progettazione efficiente dal punto di vista energetico nel settore della vendita al dettaglio di prodotti alimentari.

Le figure 22, 23 e 24 riportano i risultati dei diversi scenari proposti applicati rispettivamente ai casi di studio C.1, C.2 e C.3. I grafici mostrano che gli stessi scenari applicati ai casi di studio C.1 e C.3 forniscono risultati comparabili adeguati e utili. I tre assi verticali nelle figure 22, 23 e 24 rappresentano i KPI, rispettivamente la reale efficacia energetica, il controllo dell'illuminazione e l'impatto ambientale.

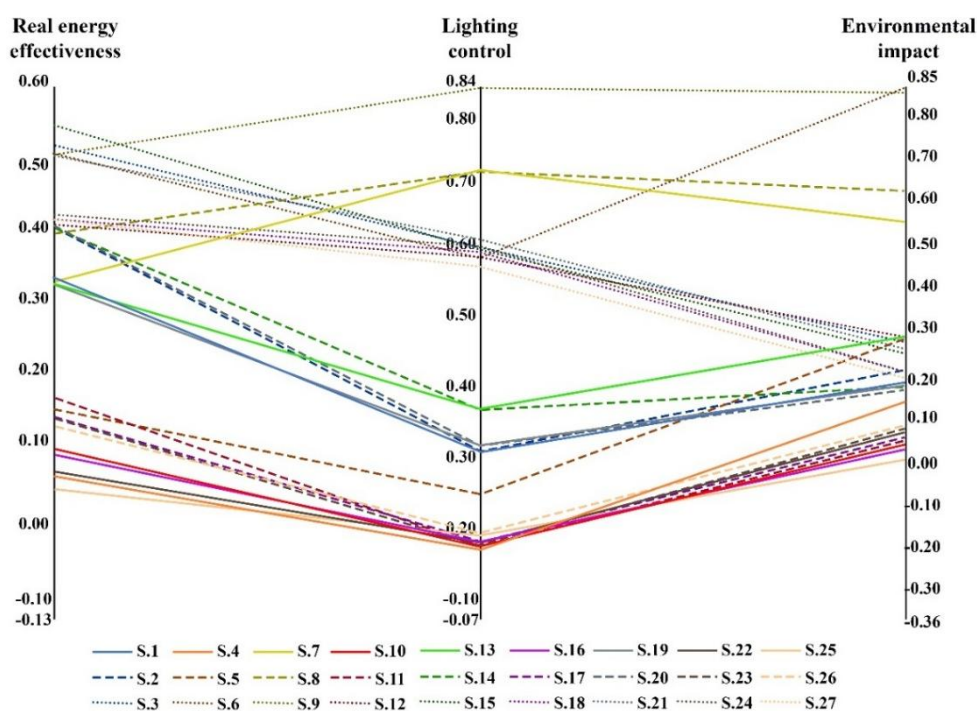


Figura 22. Risultati di ciascuno scenario applicato a C.1.

In C.1, gli scenari più favorevoli sono S.9, ovvero lucernari in vetro orientati est-ovest e soffitto interno in polycarbonato con pannelli fotovoltaici e sistema LED e DALI, e S.6, ovvero lucernari in vetro fotocromatico orientati sud-ovest-nordest con pannelli fotovoltaici e sistema LED e DALI. Lo scenario S.9 presenta gli stessi valori per l'efficacia energetica reale e l'impatto ambientale, ma il valore per il controllo dell'illuminazione risulta ulteriormente migliorato (0.84). Ciò è dovuto all'orientamento dei lucernari nello scenario S.9, vale a dire l'orientamento est-ovest. Questo orientamento consente infatti l'ingresso della luce naturale durante tutte le ore del giorno, riducendo notevolmente il consumo energetico per l'illuminazione artificiale. Lo scenario S.6 mostra

un valore elevato dell'indicatore di impatto ambientale (0.85) insieme a prestazioni favorevoli nel controllo dell'illuminazione (0.58) e nell'efficacia energetica reale (0.53).

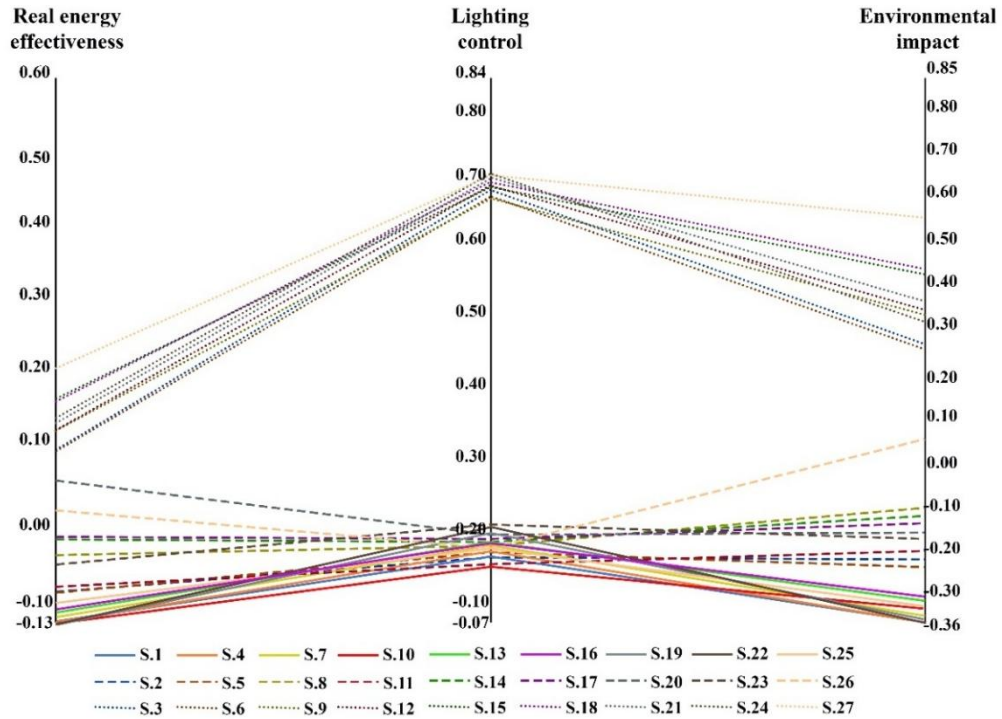


Figura 23. Risultati di ciascuno scenario applicato a C.2.

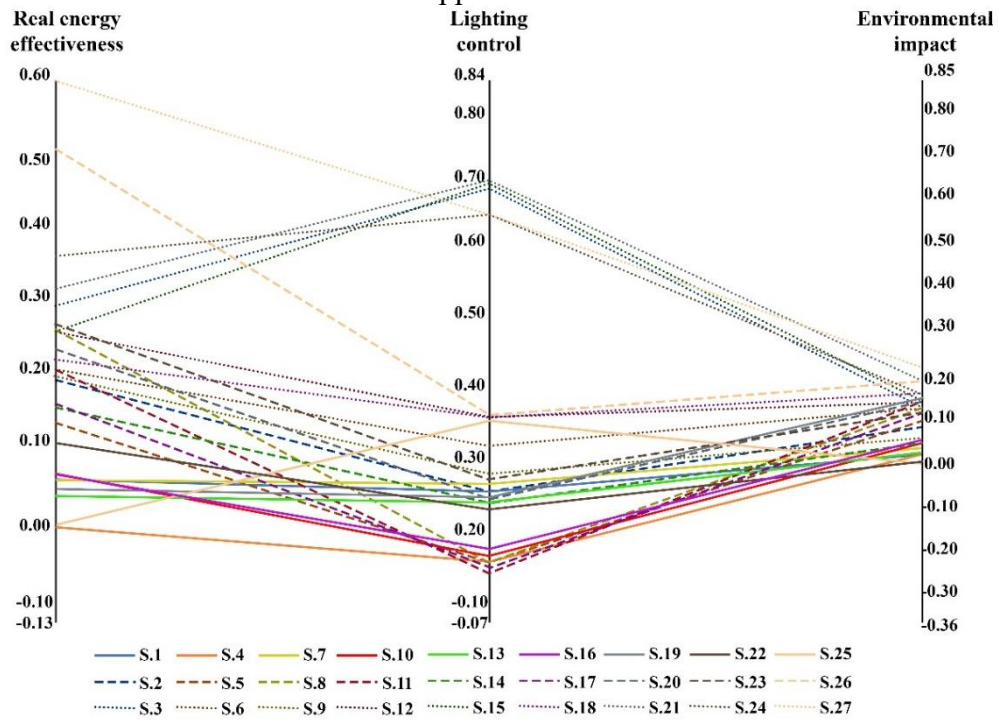


Figura 24. Risultati di ciascuno scenario applicato a C.3.

D'altra parte, la maggior parte degli scenari applicati a C.2 mostrano un valore di prestazione energetica non molto elevato e valori di impatto ambientale negativi. Ciò suggerisce che gli interventi da realizzare per il miglioramento delle prestazioni energetiche operative potrebbero comportare un maggiore impatto ambientale nella fase di produzione o smaltimento dei materiali e dei componenti. Gli scenari S.27, ovvero la sostituzione del tetto esistente con un tetto a shed con pannelli fotovoltaici e sistema LED e DALI, e S.21, ovvero lucernari in vetro fotocromatico orientati sudest-nordovest con pannelli fotovoltaici e sistema LED e DALI, sono le configurazioni che consentono il miglior risultato se applicate a C.2 considerando i tre KPI. Questi scenari prevedono un valore di controllo dell'illuminazione pari a 0.67 in S.27 e in S.21, un valore di efficacia energetica reale pari a 0.20 in S.27 e 0.11 in S.21 e un valore di impatto ambientale pari a 0.55 in S.27 e 0.31 in S.21.

Nel caso C.3, gli scenari S.21 e S.27 mostrano le prestazioni più favorevoli. Questi scenari, applicati a C.3, mostrano un valore elevato del controllo dell'illuminazione (0.67 in S.21 e 0.64 in S.27), mentre l'efficacia energetica reale (0.32 in S.21 e 0.60 in S.27) è efficace solo in S.27, mentre l'impatto ambientale mostra i risultati peggiori (0.20 in S.21 e 0.23 in S.27).

Confrontando le prestazioni ottenute in termini di controllo dell'illuminazione ci si aspetta che gli stessi scenari applicati ai diversi casi di studio diano risultati simili. Tuttavia, i risultati in termini di efficacia energetica reale complessiva sono diversi. In effetti, in molti scenari i valori di controllo dell'illuminazione sono gli stessi, ma l'efficacia energetica reale e l'impatto ambientale sono diversi. Ciò è dovuto al fatto che la reale efficienza energetica di un edificio è influenzata dall'interazione di tutte le richieste energetiche finali. Sebbene una maggiore disponibilità di luce diurna possa ridurre i carichi di illuminazione elettrica, può contemporaneamente portare a maggiori guadagni di calore solare, che possono aumentare la domanda di energia di raffreddamento. Di conseguenza, in alcuni edifici, il carico di raffreddamento aggiuntivo indotto da una maggiore penetrazione della luce diurna può superare il risparmio energetico dell'illuminazione, portando ad un aumento netto del consumo energetico totale. Inoltre, l'impatto ambientale non è influenzato solo dal consumo energetico ma anche dal tipo di costruzione dell'edificio. Infatti, in alcuni edifici esistenti la costruzione di lucernari sul tetto può avere un impatto ambientale maggiore rispetto ad altri.

La Figura 25 mostra il confronto di alcuni scenari chiave con i risultati più significativi per i tre casi di studio. Gli scenari S.21, S.24 e S.27 mostrano risultati simili per il controllo dell'illuminazione in tutti e tre i casi di studio. Questo risultato dimostra che l'uso della luce naturale all'interno dei supermercati potrebbe ridurre il consumo energetico dell'illuminazione di circa il 60%. Inoltre, in questi tre scenari, l'impatto ambientale di questi edifici è ridotto di circa il 20%.

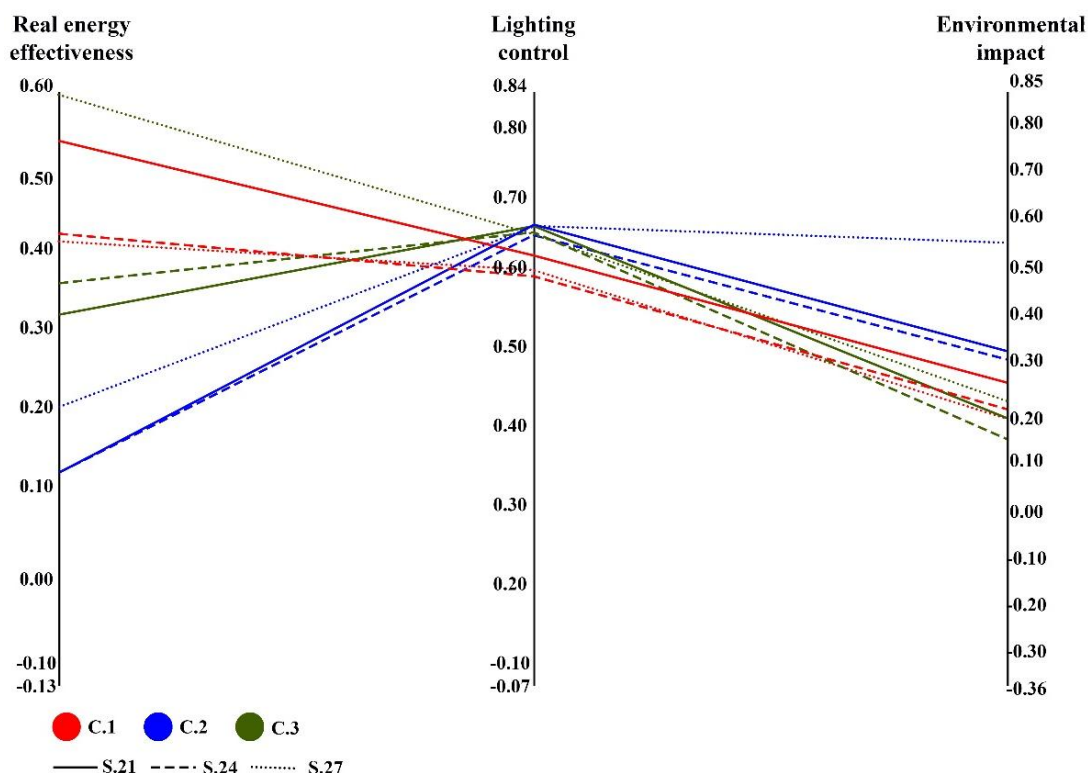


Figura 25. Confronto dei risultati degli scenari S.3, S.6, S.12, S.21, S.24 e S.27 applicati a C.1, C.2 e C.3.

Infine, la figura 26 mostra il confronto degli scenari con i risultati più significativi per i diversi casi di studio suddivisi in gruppi. Questa analisi consente di identificare potenziali correlazioni tra le strategie più adatte e le condizioni al contorno simili identificate per generalizzare eventualmente i risultati.

Nel gruppo A, caso di studio con la stessa zona climatica (C.1 e C.2), gli scenari S.27 e S.24 ottengono risultati di controllo dell'illuminazione simili in C.1 e C.2 (circa 0.59 per C.1 e 0.67 per C.2 per S.27 e 0.67 per C.1 e 0.58 per C.2 per S.24). Tuttavia, in C.1 il valore dell'efficacia energetica reale è più alto (0.41 in S.27 e 0.42 in S.24) rispetto a C.2 (0.20 in S.27 e 0.11 in S.24), mentre per il valore di impatto ambientale si nota il contrario, più alto in C.2 (0.55 in S.27 e 0.31 in S.24) rispetto a C.1 (0.20 in S.27 e 0.22 in S.24). Questo perché la tipologia di costruzione del tetto di C.2 ottiene un impatto ambientale maggiore rispetto a C.1 durante la fase di costruzione dello scenario.

Sia il gruppo B, stessa densità urbana, sia il gruppo D, stesso sistema di illuminazione, coinvolgono i casi di studio C.1 e C.3. Per il gruppo B i due casi di studio vengono confrontati durante l'implementazione di S.27. In questo caso, i risultati mostrano valori di indicatori simili di controllo dell'illuminazione e di impatto ambientale, mentre il valore dell'efficacia energetica reale di C.1 (0.41) è inferiore al valore di C.3 (0.60). Per

il gruppo D i due casi di studio che hanno le stesse lampade, vengono confrontati in S.21. In questo caso, l'applicazione dello stesso scenario mostra nuovamente risultati simili in termini di controllo dell'illuminazione (0.62 per C.1 e 0.67 per C.3) e di impatto ambientale (0.26 per C.1 e 0.20 per C.3), mentre C.1 mostra un valore leggermente superiore di efficacia energetica reale (0.54) rispetto a C.3 (0.32). Questi risultati dimostrano che negli stessi contesti urbani, con densità urbana simile e, quindi, ombreggiatura degli edifici, possono ottenere risultati simili in termini di riduzione del consumo di energia luminosa grazie allo sfruttamento della luce diurna e alla riduzione dell'impatto ambientale. Inoltre, la presenza della stessa tecnologia per le lampade nello scenario di base supporta ulteriormente il raggiungimento di questi risultati. Tuttavia, le diverse dimensioni e il consumo energetico totale associato influiscono sulla prestazione energetica complessiva, che non dipende solo dalle uniche caratteristiche simili.

I risultati del gruppo C, che coinvolgono i casi di studio C.2 e C.3 (vale a dire scenari con dimensioni e consumo energetico simili), vengono analizzati per S.24, ovvero lucernari in vetro fotocromatico orientati sudest-nordovest con pannelli fotovoltaici e sistema LED e DALI. I risultati mostrano gli stessi valori di controllo dell'illuminazione (circa 0.67 per C.2 e 0.64 per C.3), ma risultati diversi in termini di efficacia energetica reale e impatto ambientale. Infatti, il valore dell'efficacia energetica reale per C.2 è 0.11 e per C.3 è 0.36, mentre il valore di impatto ambientale è 0.31 per C.2 e 0.15 per C.3. Questo perché la fase di costruzione dello scenario ha un impatto ambientale maggiore in C.2 che in C.3. Infatti, la tipologia costruttiva del tetto C.2 è meno adattabile all'implementazione degli scenari proposti perché ha un grande impatto ambientale sullo smaltimento del tetto esistente rispetto agli altri casi di studio.

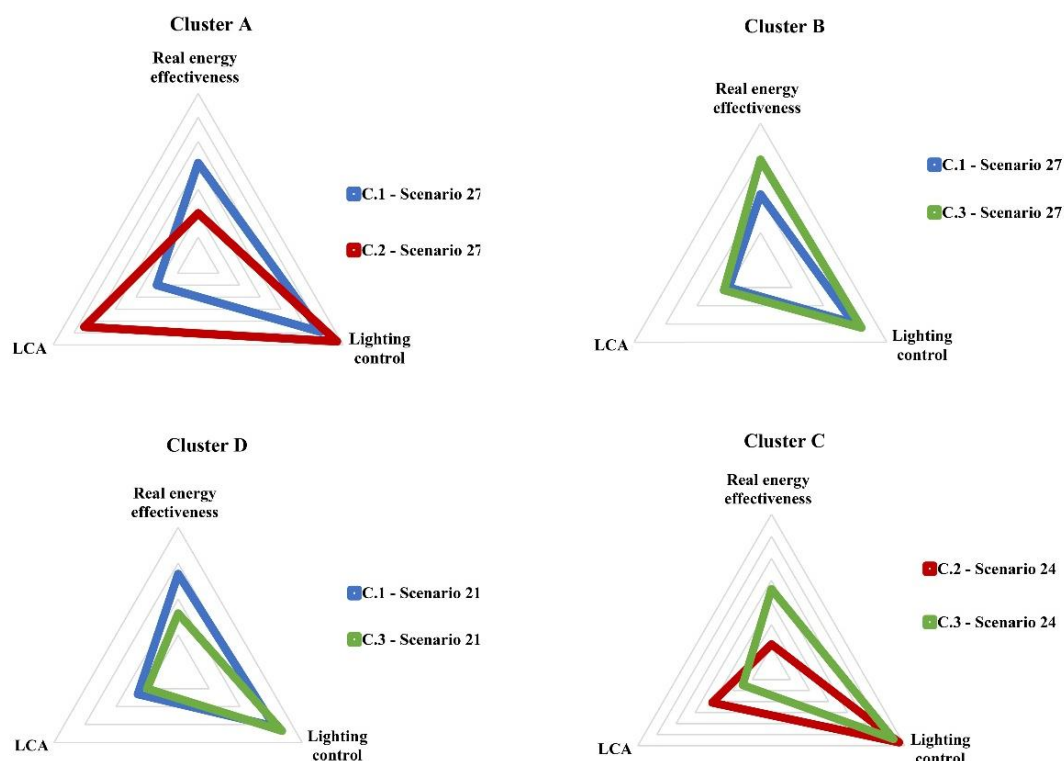


Figura 26. Confronto dei risultati degli scenari S.21, S.24 e S.27 applicati a gruppi diversi.

Riconoscendo che il maggiore impatto ambientale nei supermercati è dovuto al consumo energetico durante la fase operativa [6], è possibile ottenere un miglioramento non trascurabile dell'impatto ambientale grazie al miglioramento delle prestazioni energetiche. Infatti, riducendo il consumo energetico per l'illuminazione, è possibile ridurre significativamente le emissioni di CO₂ generate durante la fase operativa di uno studio di tre casi. Ciò è particolarmente evidente negli scenari in cui vengono adottate tecnologie LED ad alta efficienza e sistemi DALI. Queste soluzioni riducono la domanda elettrica dell'edificio e di conseguenza le emissioni associate alla produzione di energia elettrica.

Inoltre, lo studio conferma che i risultati sono fortemente influenzati da diversi fattori contestuali e progettuali. Tra questi rientrano le dimensioni complessive e la geometria dell'edificio, che determinano la domanda di illuminazione; il consumo di elettricità di base, che influisce sull'impatto relativo dei miglioramenti dell'efficienza e sulle caratteristiche dei sistemi di illuminazione stessi, e le strategie di controllo. Inoltre, le condizioni al contorno come il tipo specifico di quartiere (urbano, suburbano, commerciale o ad uso misto) svolgono un ruolo chiave, poiché influenzano la luce diurna disponibile, i modelli di ombreggiatura e i profili di occupazione tipici. Insieme, questi

fattori determinano i potenziali risparmi energetici e le riduzioni delle emissioni ottenibili attraverso una progettazione ottimizzata della luce diurna.

Lo studio, però, non si limita ad analizzare gli effetti sui consumi energetici e sugli impatti ambientali delle strategie proposte, ma sviluppa un'analisi comparativa della distribuzione della luce diurna nei tre casi di studio in diversi scenari. Tutte le simulazioni si riferiscono al 21 giugno alle 11:30, che rappresenta uno dei periodi di massima radiazione solare. La distribuzione della luce diurna è fornita dalla simulazione dei livelli di illuminamento (lux) illustrati nella figura 27. I valori di illuminamento vanno da 0 a 600 lux, con gradiente di colore dal rosso scuro (basso illuminamento) al giallo brillante (alto illuminamento).

Nelle condizioni di base, tutti i casi di studio mostrano una penetrazione della luce diurna molto limitata, con livelli di illuminamento che rimangono per lo più al di sotto di 100 lux in tutta l'area di vendita, ad eccezione di una piccola porzione vicino alle aperture che raggiunge circa 200–250 lux. Ciò indica una chiara dipendenza dalla combinazione con l'illuminazione artificiale per un buon comfort visivo strettamente connesso alle attività visive.

In S.3, per tutti gli edifici del caso di studio, ci sono livelli di illuminazione superiori a 300 lux e fino a 600 lux in ampie porzioni dell'area, specialmente in C.2, S.6 e S.12 in C.2 e C.3 mostrano una distribuzione più equilibrata, con la maggior parte delle aree interne tra 200 e 400 lux, suggerendo una penetrazione della luce diurna più controllata e un'uniformità di distribuzione che può attenuare il disagio e il rischio di abbagliamento dovuto a disabilità. Tuttavia, in C.1, è possibile identificare alcune aree concentrate in cui l'illuminazione naturale raggiunge livelli di illuminazione di 600 lux, anche se il livello medio di illuminazione è inferiore a 200 lux.

In S.21 in C.2 e C.3, la disponibilità complessiva di luce diurna aumenta significativamente, con aree estese che superano i 500 lux e le aree posteriori che raggiungono ancora i 300 lux. In C.1, questa configurazione garantisce una luce diurna più uniforme distribuita nell'area commerciale principale, mantenendo le zone centrali al di sopra dei 300 lux e riducendo l'estensione delle aree sotto illuminate.

S.24 mostra livelli di illuminazione per C.2 e C.3 inferiori a 300 lux. Permette quindi di ridurre l'uso dell'illuminazione artificiale, mantenendo livelli di illuminazione adatti all'area di vendita. Per C.1, questa configurazione garantisce livelli di illuminazione molto bassi, intorno ai 100 lux.

S.27 per C.1 e C.2 raggiunge l'illuminamento complessivo più elevato, con quasi l'intera area centrale che supera i 500 lux. Al contrario, in C.3 i livelli di illuminazione si aggirano principalmente intorno ai 300 lux, con un elevato potenziale di risparmio energetico, garantendo un buon comfort visivo.

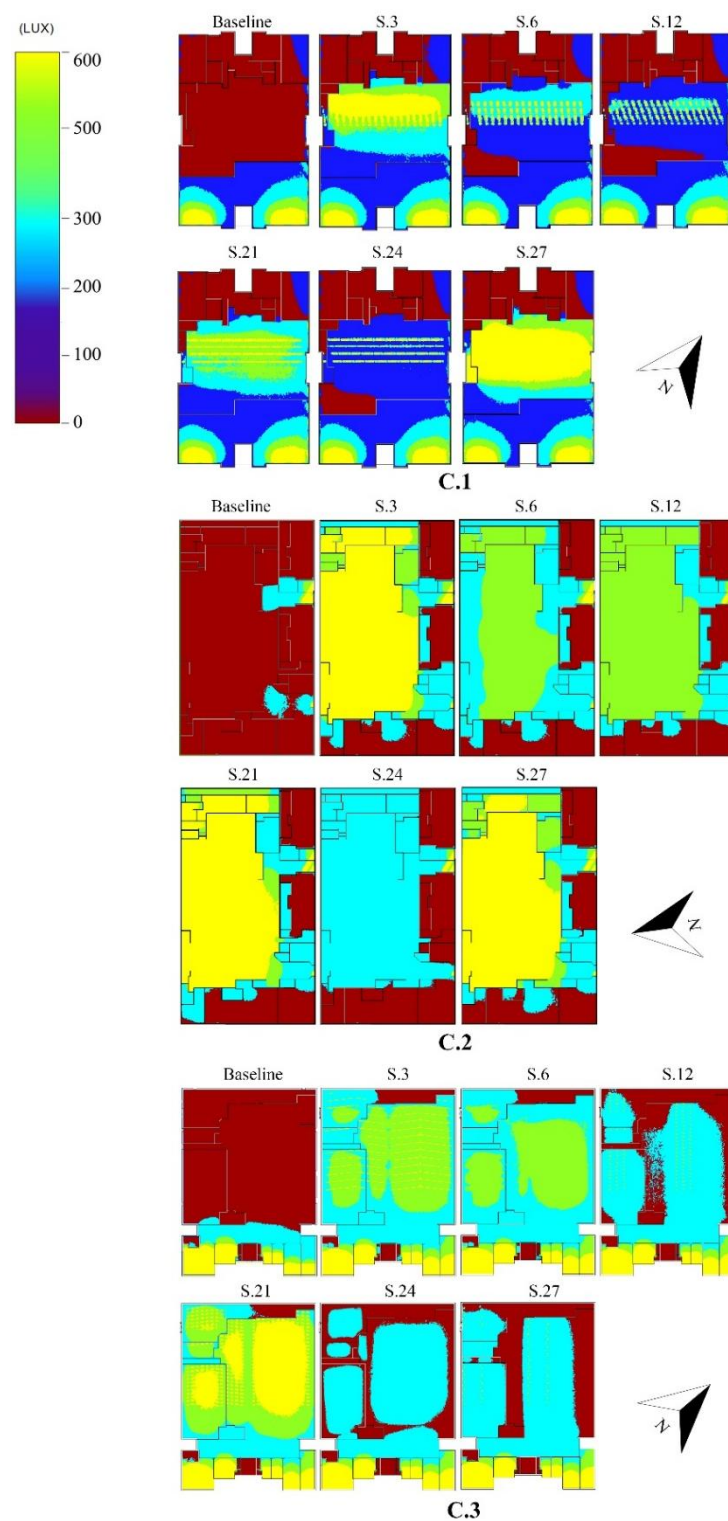


Figura 27 Confronto dei risultati degli scenari S.3, S.6, S.12, S.21, S.24 e S.27 applicati a C.1, C.2 e C.3 - 21 giugno alle 11:30.

L'analisi comparativa evidenzia l'efficacia delle strategie di illuminazione naturale nel migliorare l'ambiente luminoso degli spazi commerciali, garantendo livelli di illuminazione per le attività visive richieste e il controllo dei fenomeni di abbagliamento, migliorando il consumo energetico. L'analisi dello scenario di base conferma la necessità di interventi di illuminazione diurna per ridurre la dipendenza dall'illuminazione artificiale, ottenendo soluzioni di miglioramento della progettazione dell'illuminazione e di efficienza energetica, attraverso la combinazione efficace e controllata di luce naturale e artificiale. Questa analisi evidenzia la necessità di valutare parallelamente alle prestazioni energetiche anche le condizioni di comfort visivo per individuare la soluzione più efficace per le prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio. Una strategia di progettazione efficiente dell'illuminazione diurna dovrebbe mirare a un intervallo di illuminamento distribuito di 300–500 lux nelle aree di vendita dei prodotti alimentari al dettaglio [41], garantendo sia l'efficienza energetica che il comfort dell'utente.

I risultati analizzati nello studio propongono aspetti innovativi rispetto agli approcci convenzionali relativi alla valutazione integrata della strategia di adeguamento del tetto alla luce diurna per l'efficientamento energetico negli edifici destinati alla vendita al dettaglio di prodotti alimentari. In primo luogo, l'integrazione della modellazione parametrica basata su BIM con simulazioni energetiche dinamiche calibrate consente una valutazione multiscalare e basata sui dati delle configurazioni di retrofit, consentendo di variare parametricamente e testare in modo controllato e comparabile le proprietà geometriche e termofisiche della strategia integrata di retrofit del tetto con luce diurna–energia. A differenza di altri studi, con calcoli semplificati dell'illuminazione o ipotesi statiche sull'energia dei dati, questo tiene conto del consumo energetico dei dati reali, del contesto urbano e dei fattori materiali, collegando l'incidenza della luce diurna al consumo energetico e all'impatto ambientale durante il ciclo di vita dell'edificio. L'utilizzo di tre KPI complementari – efficienza energetica reale, controllo dell'illuminazione e impatto ambientale – rappresenta un ulteriore progresso, in quanto consente di individuare soluzioni non solo visivamente efficienti, ma anche energeticamente efficienti e sostenibili.

I risultati mostrano una valutazione completa e affidabile delle strategie di retrofit in diverse condizioni al contorno. La sua efficacia risiede nella capacità di simulare profili operativi realistici, di incorporare il consumo energetico reale nelle procedure di calibrazione e di quantificare i compromessi tra risparmi operativi ed emissioni incorporate. Inoltre, la metodologia si è rivelata adatta per confrontare edifici caratterizzati da diversi layout, apparecchiature energetiche ed esposizione climatica, rivelando che la trasferibilità delle soluzioni di retrofit dipende da una combinazione di contesto architettonico, tecnologico e urbano. I risultati degli scenari S.3, S.6, S.12, S.21 e S.27 su più casi di studio confermano un valido approccio per identificare strategie di

retrofit con un equilibrio coerente tra prestazioni di illuminazione, efficienza energetica e beneficio ambientale.

Tuttavia, lo studio presenta anche limiti che dovrebbero essere riconosciute. Infatti, l'analisi è stata condotta su tre casi di studio situati nella stessa regione geografica. Inoltre, mentre la mappatura dell'illuminazione ha consentito un'interpretazione qualitativa dell'usabilità spaziale, è necessario ulteriore lavoro per stabilire correlazioni quantitative tra la distribuzione della luce diurna e la percezione degli occupanti, il rischio di degrado del prodotto e le strategie di merchandising.

Gli sviluppi futuri dello studio in oggetto dovrebbero mirare ad ampliare il numero di casi di studio, testare la metodologia in diverse zone climatiche e integrare ulteriori indicatori del ciclo di vita e parametri di comfort, nonché includere variabili economiche legate alla manutenzione rafforzerebbe ulteriormente la capacità decisionale dello strumento.

Lo studio conferma che il quadro proposto rappresenta una metodologia replicabile per prevedere le prestazioni della strategia integrata di ammodernamento del tetto con luce diurna-energia e per orientare decisioni di progettazione attente all'energia negli edifici di grande scala adibiti alla vendita al dettaglio di prodotti alimentari.

I risultati indicano che gli interventi di adeguamento dell'illuminazione naturale, combinati con apparecchi LED ad alta efficienza, sistemi di controllo basati su DALI e installazioni fotovoltaiche in loco, hanno un valore di controllo dell'illuminazione fino al 60%, migliorando al contempo le prestazioni complessive di impatto ambientale di circa il 20%.

I risultati evidenziano la complessità e l'interdipendenza dei parametri edilizi nel determinare il successo degli ammodernamenti dell'illuminazione diurna. In questo studio l'efficacia energetica reale quantifica l'efficacia delle strategie di miglioramento delle prestazioni energetiche rispetto al loro potenziale teorico; il controllo dell'illuminazione misura l'efficacia delle strategie di controllo dell'illuminazione, compreso l'uso dell'illuminazione naturale, l'integrazione efficace con l'illuminazione artificiale; e l'impatto ambientale quantifica le emissioni di CO₂ associate ai materiali e ai processi di costruzione durante tutto il ciclo di vita dell'edificio. Sebbene le prestazioni del controllo dell'illuminazione siano state relativamente coerenti tra diversi casi di studio e scenari, sia l'efficacia energetica reale che l'impatto ambientale hanno mostrato variazioni significative a seconda del contesto urbano, delle dimensioni dell'edificio, del consumo energetico e delle caratteristiche di costruzione. In particolare, il caso di studio C.2 ha dimostrato elevate prestazioni energetiche in diversi scenari ma è stato anche associato a maggiori impatti ambientali dovuti al carbonio incorporato e alle scelte dei materiali.

L'analisi della classificazione in gruppi (che identificano caratteristiche simili tra i diversi casi di studio) ha rivelato diversi scenari di ammodernamento (ad esempio, scenario S.21 (ammodernamento architettonico del tetto con orientamento del lucernario in vetro sudest-nordovest e soffitto interno in polycarbonato con fotovoltaico e DALI) e S.27 (sostituzione del tetto esistente con un tetto a shed con fotovoltaico e DALI) applicato agli edifici del commercio al dettaglio alimentare in contesti climatici o urbani simili tende a produrre risultati comparabili di controllo dell'illuminazione ma varia nell'efficacia energetica reale e nei risultati di impatto ambientale. Gli scenari S.21 e S.27 possono essere considerati soluzioni di riferimento per tipologie di supermercati simili, offrendo strategie di retrofit replicabili e adattabili a diverse condizioni al contorno.

I risultati dell'analisi della luce diurna rafforzano ulteriormente queste conclusioni dimostrando come la qualità, la distribuzione e l'intensità della luce naturale influenzano in modo significativo sia le prestazioni energetiche che i risultati del comfort visivo. L'analisi ha evidenziato alcuni orientamenti dei lucernari e configurazioni, in particolare quelli utilizzati negli scenari S.3 (orientamento dei lucernari sudovest-nordest e soffitto interno in polycarbonato con PV e DALI), S.6 (lucernario in vetro fotocromatico con orientamento sudovest-nordest e con PV e DALI), S.12 (lucernario in vetro fotocromatico con orientamento est-ovest e con PV e DALI), S.21 (lucernario orientato sudest-nordovest e soffitto interno in polycarbonato con PV e DALI), S.24 (lucernario in vetro fotocromatico orientato sudest-nordovest e con PV e DALI) e S.27 (sostituzione del tetto esistente con un tetto a shed con fotovoltaico e DALI), produrre livelli di illuminamento nell'intervallo consigliato di 300–500 lux su ampie porzioni dell'area di vendita, consentendo riduzioni sostanziali nell'uso dell'illuminazione artificiale senza compromettere il comfort visivo. Le mappe comparative della distribuzione della luce diurna hanno inoltre mostrato che scenari di ammodernamento simili possono produrre risultati notevolmente diversi a seconda della disposizione dell'edificio, degli ostacoli circostanti e della disponibilità di base di luce naturale, rafforzando l'importanza di analisi specifiche per caso prima dell'implementazione.

In conclusione, l'integrazione della progettazione parametrica, della modellazione basata sul BIM e delle simulazioni energetiche calibrate si rivela un potente quadro per il processo decisionale nelle strategie di ammodernamento degli edifici. Lo studio sottolinea l'importanza di un approccio multicriteriale e consapevole del contesto per raggiungere l'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni operative nel settore della vendita al dettaglio di prodotti alimentari, dove le richieste operative sono elevate e la posta in gioco ambientale è significativa. L'approccio proposto può quindi rivelarsi uno strumento utile per individuare scelte strategiche volte al controllo/progettazione della forma architettonica per il controllo degli aspetti energetici di un edificio, strettamente connessi alla corretta illuminazione degli ambienti, soprattutto nel caso di edifici

commerciali, al comfort visivo degli occupanti e dei lavoratori e, di conseguenza, alla riduzione degli impatti sull'ambiente.

A thick red diagonal stripe runs from the top-left corner to the bottom-right corner of the slide, dividing the background into two white triangular regions.

Conclusioni e prospettive

Conclusioni e prospettive

Il presente lavoro di ricerca affronta il tema dell'efficienza energetica nei retail esistenti della GDO, un settore caratterizzato da elevati consumi energetici e da una crescente attenzione agli aspetti ambientali ed economici legati alla gestione degli edifici esistenti e che riceve, attualmente, scarsa attenzione negli studi degli edifici. L'obiettivo principale del lavoro è stato lo sviluppo e la validazione di un metodo integrato per l'analisi e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto, in grado di supportare il processo decisionale nella definizione di strategie di riqualificazione energetica.

Il metodo proposto si basa sull'integrazione di strumenti BIM e un approccio propedeutico al Digital Twin da cui si ottiene una rappresentazione reale e sistemica del comportamento energetico del sistema edificio-impianto. Tale approccio permette di avere un'ampia visione degli interventi, evidenziando l'interazione tra le varie componenti dell'edificio (involucro, sistemi HVAC, catena del freddo, illuminazione artificiale e fonti di energia rinnovabile). I modelli digitali risultano efficaci al fine di supportare l'analisi comparativa degli scenari di intervento e nella valutazione quantitativa e qualitativa dei benefici energetici e ambientali.

Il metodo elaborato, oltre ad avere fondamento tecnico, trova applicazione in casi di studio reali e rappresentativi della GDO e consente di analizzare in modo approfondito le prestazioni energetiche nello stato di fatto e di individuare le criticità più diffuse, quali l'elevata incidenza della catena del freddo sui consumi complessivi, la scarsa integrazione tra i sottosistemi impiantistici e l'assenza di sistemi avanzati di monitoraggio e controllo. I risultati ottenuti dalle simulazioni energetiche evidenziano come l'adozione di strategie integrate di riqualificazione possano condurre a significative riduzioni dei consumi energetici e delle emissioni di gas a effetto serra, migliorandone al contempo l'efficienza operativa e gestionale nel tempo.

L'integrazione in ambito digitale tra modellazioni BIM e BEM rappresenta uno strumento affidabile utile ad analizzare i risultati delle soluzioni proposte e, soprattutto, utile a gestire l'edificio nel tempo anche considerando quelli che sono i cambiamenti climatici.

In conclusione, dalle soluzioni di riqualificazione si ottengono risultati diversi, confermando che l'applicazione di uno scenario di adeguamento non garantisce sempre i benefici programmati in fase progettuale. Un'analisi comparativa permette di individuare non solo gli interventi maggiormente performanti in termini di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni, ma anche quelli maggiormente coerenti con le esigenze operative e gestionali tipiche dei retail della GDO.

Le soluzioni proposte possono essere suddivise in quattro principali categorie: interventi sull'involucro edilizio, interventi sugli impianti, interventi sui sistemi di illuminazione e integrazione di fonti di energia rinnovabile. Nessuna singola categoria di intervento è in grado, se considerata isolatamente, di garantire un miglioramento significativo e duraturo delle prestazioni energetiche complessive del sistema edificio-impianto. Per converso, i benefici più rilevanti emergono dall'applicazione di strategie tra loro integrate, in grado di sfruttare la sinergia tra i vari sottosistemi. Più precisamente, gli interventi sull'involucro edilizio mostrano un impatto positivo soprattutto in relazione alla riduzione dei fabbisogni per la climatizzazione invernale ed estiva. Tuttavia, nei retail della GDO il loro contributo alla riduzione dei consumi complessivi risulta generalmente limitato rispetto ad altri settori edilizi a causa dell'elevata incidenza dei carichi interni e della catena del freddo. Ciò nonostante, tali interventi rivestono un ruolo strategico nel potenziare il comfort termoigrometrico degli ambienti e nel supportare un funzionamento più efficiente dei sistemi HVAC.

Le soluzioni impiantistiche, in particolare quelle relative all'ottimizzazione dei sistemi HVAC e all'integrazione con la catena del freddo, risultano tra le più efficaci in termini di riduzione dei consumi energetici. L'analisi evidenzia come l'adozione di sistemi ad alta efficienza, associata a strategie di recupero di calore e a logiche di controllo più avanzate, consenta di ottenere riduzioni significative dei fabbisogni energetici, migliorando al contempo la stabilità e l'affidabilità del sistema. A questo proposito, risulta chiaro il potenziale delle soluzioni che favoriscono l'interazione tra sottosistemi, rispetto agli interventi puntuali e non coordinati.

Gli interventi sui sistemi di illuminazione artificiale, con riguardo alla sostituzione delle tecnologie tradizionali con soluzioni ad alta efficienza e l'introduzione di sistemi di controllo, mostrano un bilanciamento efficace tra benefici energetici e fattibilità operativa. Gli interventi in questione contribuiscono, oltre alla riduzione diretta dei consumi elettrici, anche, indirettamente, alla riduzione dei carichi termici interni, con effetti positivi sul funzionamento dei sistemi di raffrescamento. L'agevole implementazione e la ridotta interferenza con le attività commerciali rendono tali soluzioni particolarmente idonee a interventi di breve-medio termine. Risultati ottimali si ottengono, soprattutto, se al miglioramento dell'illuminazione artificiale con tecnologie avanzate si affiancano soluzioni di integrazione con la luce diurna. Difatti, abbinando queste ultime ad uno studio dell'illuminamento interno senza provocare abbagliamenti e disagi è possibile ottenere la migliore soluzione da adottare per il contenimento dei consumi energetici e dell'impatto ambientale.

L'integrazione delle fonti di energia rinnovabile, in particolare tramite sistemi fotovoltaici, consente di ridurre l'energia prelevata dalla rete elettrica e le emissioni associate, senza incidere direttamente sui fabbisogni energetici dell'edificio. L'analisi dei

risultati mostra come l'efficacia di tali soluzioni dipenda dalla disponibilità di superfici utili, dal profilo di consumo elettrico e dalle condizioni climatiche locali. In un contesto quale quello dei retail della GDO, caratterizzato da elevati consumi durante l'intera giornata, l'autoconsumo risulta generalmente elevato, rendendo queste soluzioni molto interessanti dal punto di vista energetico e ambientale.

Nel complesso, l'analisi comparativa evidenzia come le soluzioni più efficaci siano quelle basate su un approccio integrato. Il metodo proposto consente di valutare in modo quantitativo tali combinazioni, offrendo un supporto concreto alla selezione delle strategie più idonee in funzione degli obiettivi energetici, ambientali ed economici. La tabella 32 mostra una matrice tecnica di valutazione degli interventi proposti.

Intervento	Replicabilità	Complessità	Riduzione consumi energetici	Riduzione emissioni	Investimento economico
Relamping	Alta	Bassa	Media	Media	Media
Chiusura banchi frigo	Molto alta	Bassa	Alta	Alta	Bassa
Recupero del calore di scarto	Media	Media	Bassa	Media	Alta
Impianto fotovoltaico	Media	Bassa	Alta	Alta	Media
Sistemi di controllo intelligente	Alta	Media	Media	Media	Media
Monitoraggio energetico avanzato	Media	Media	Media	Media	Media

Tabella 32. Matrice tecnica di valutazione degli interventi proposti sui retail della GDO.

In tale prospettiva, ulteriori sviluppi della ricerca potrebbero riguardare l'integrazione di sistemi di monitoraggio energetico in tempo reale e l'evoluzione del modello verso un approccio propedeutico al Digital Twin, in grado di supportare non solo la fase di analisi e progettazione, ma anche la gestione e l'ottimizzazione continua delle prestazioni energetiche in esercizio. Inoltre, l'estensione del metodo a un numero sempre maggiore di casi studio e a differenti contesti climatici potrebbe contribuire a consolidarne la robustezza e la validità su larga scala.

L'attività di ricerca ha consentito di individuare un insieme strutturato di interventi tecnico-impiantistici e metodologici finalizzati all'ottimizzazione energetica e gestionale dei sistemi all'interno dei retail esistenti della GDO, dalla catena del freddo ai sistemi HVAC e di illuminazione sino alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. I

risultati così ottenuti costituiscono una base metodologica validata per ulteriori sviluppi sperimentali e modellistici. Il presupposto imprescindibile per qualsiasi strategia di efficientamento è l'implementazione di un sistema integrato di acquisizione dati e telecontrollo del sistema edificio-impianto, in grado di garantire la disaggregazione dei consumi elettrici per sottosistema (refrigerazione, climatizzazione invernale ed estiva, illuminazione), la valutazione delle prestazioni energetiche dei sistemi di generazione (caldo, freddo e climatizzazione estiva) mediante misure dirette sui parametri termofluidodinamici e sui consumi.

Lo studio ha evidenziato come la disponibilità di dati ad alta risoluzione temporale rappresenti un fattore abilitante per l'ottimizzazione delle logiche di regolazione, che include la gestione ottimizzata delle fasi di avviamento e spegnimento e strategie di night purge e free cooling, il controllo dinamico delle portate di aria esterna mediante sensori di qualità dell'aria (CO₂, VOC), evitando sovraventilazioni in condizioni ordinarie e sottoventilazioni nei picchi di affollamento con il monitoraggio dell'efficacia della ventilazione meccanica controllata e il controllo continuo dei parametri termigrometrici.

Ulteriore elemento strategico è la classificazione prestazionale delle macchine frigorifere in funzione del rendimento, tipologia di refrigerante e vetustà del sistema. Tale classificazione consente di pianificare in modo ottimale la sostituzione dei macchinari a fine vita tecnica, in relazione alle ore di funzionamento e in aderenza alle normative sui gas refrigeranti.

Dal punto di vista distributivo ed impiantistico rileva la differenziazione delle zone termiche all'interno degli ambienti e la corretta configurazione e collocazione dei condensatori dei banchi frigo, evitando installazioni in ambienti che determinano carichi termici parassiti.

In un'ottica di integrazione edificio-impianto e mitigazione climatica, sono stati individuati interventi quali installazione di sistemi fotovoltaici in copertura e nelle aree esterne disponibili come le pensiline dei parcheggi. Tali strategie, integrate in un approccio sistemico, permettono non tanto di ridurre il fabbisogno energetico complessivo, quanto di prevedere l'uso di energia prodotta dal rinnovabile per l'autoconsumo in un'ottica di ottimizzazione energetica e riduzione emissiva incrementando la resilienza del complesso edilizio.

La ricerca dimostra che l'integrazione tra monitoraggio ad alta risoluzione, modellazione fisico-sperimentale e simulazione numerica avanzata costituisce un approccio metodologicamente solido per l'ottimizzazione energetica e gestionale dei sistemi energetici nei retail esistenti della GDO. Lo studio, dunque, propone un approccio integrato e replicabile che può costituire una base solida per future applicazioni

professionali e attività di ricerca nel campo dell'efficienza energetica degli edifici complessi.

Le prospettive future concernono l'estensione dei modelli a casi studio multipli per validazione statistica, l'integrazione con sistemi di controllo predittivo basati su intelligenza artificiale e la valutazione tecnico-economica degli interventi in termini di LCC (Life Cycle Cost) e riduzione delle emissioni climalteranti.

L'insieme dei risultati ottenuti rappresenta una base scientifica solida per l'evoluzione della ricerca orientata a modelli di gestione energetica integrata, improntati alla sostenibilità e alla decarbonizzazione del settore commerciale e logistico.

Bibliografia

1. European rural areas face higher levels of energy poverty - Joint Research Centre. (n.d.). Retrieved February 8, 2026, from https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/european-rural-areas-face-higher-levels-energy-poverty-2025-06-26_en
2. Energy Performance of Buildings Directive adopted. (n.d.). Retrieved February 17, 2025, from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1965
3. The European Green Deal - European Commission. (n.d.). Retrieved March 31, 2025, from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
4. 2023 Global Status Report for Buildings and Construction Beyond foundations
Global Status Report for Buildings and Construction Beyond foundations
Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. (2024). <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
5. Energy Technology Perspectives 2014 – Analysis - IEA. (n.d.). Retrieved August 14, 2024, from <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2014>
6. van Ooteghem, K., & Xu, L. (2012). The life-cycle assessment of a single-storey retail building in Canada. *Building and Environment*, 49(1), 212–226. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2011.09.028>
7. Efficienza energetica nella GDO: i vantaggi del BEMS • Lumi. (n.d.). Retrieved January 23, 2024, from <https://www.lumi4innovation.it/efficienza-energetica-gdo-bems/>
8. Galvez-Martos, J. L., Styles, D., & Schoenberger, H. (2013). Identified best environmental management practices to improve the energy performance of the retail trade sector in Europe. *Energy Policy*, 63, 982–994. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.08.061>
9. Bird, M., Daveau, C., O’dwyer, E., Acha, S., & Shah, N. (n.d.). Real-world implementation and cost of a cloud-based MPC retrofit for HVAC control systems in commercial buildings. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112269>
10. Kolokotroni, M., Tassou, S. A., & Gowreesunker, B. L. (2015). Energy aspects and ventilation of food retail buildings. *Advances in Building Energy Research*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/17512549.2014.897252>
11. Spyrou, M. S., Shanks, K., Cook, M. J., Pitcher, J., & Lee, R. (2014). An empirical study of electricity and gas demand drivers in large food retail buildings of a national organisation. *Energy and Buildings*, 68(PARTA), 172–182. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.09.015>

12. (PDF) Energy efficiency strategies in refrigeration systems of large supermarkets. (n.d.). Retrieved July 15, 2025, from https://www.researchgate.net/publication/240917453_Energy_efficiency_strategies_in_refrigeration_systems_of_large_supermarkets
13. 2018 ASHRAE Refrigeration Handbook, SI Edition. (n.d.). Retrieved July 15, 2025, from <https://studylib.net/doc/27248489/2018-ashrae-handbook---refrigeration-si>
14. Souayah, B., Bhattacharyya, S., Hdhiri, N., & Alam, M. W. (2022). Selection of Best Suitable Eco-Friendly Refrigerants for HVAC Sector and Renewable Energy Devices. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 11663, 14(18), 11663. <https://doi.org/10.3390/SU141811663>
15. Chmutina, K., Dainty, A., Schmidt, R., Nikolaidou, E., Mantesi, E., Yu, Y., & Cook, M. (2021). Thinking inside the box: new ways of considering energy consumption in a multi-user agency-constrained environment. *Energy Efficiency*, 14(8). <https://doi.org/10.1007/S12053-021-10003-Y>
16. Ge, Y. T., & Tassou, S. A. (2011). Performance evaluation and optimal design of supermarket refrigeration systems with supermarket model “SuperSim”. Part II: Model applications. *International Journal of Refrigeration*, 34(2), 540–549. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2010.11.004>
17. d’Ambrosio Alfano, F. R., Dell’Isola, M., Ficco, G., Palella, B. I., Riccio, G., & Frattolillo, A. (2019). Thermal comfort in Supermarket’s refrigerated areas: An integrated survey in central Italy. *Building and Environment*, 166, 106410. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106410>
18. Ochieng, E. G., Jones, N., Price, A. D. F., Ruan, X., Egbu, C. O., & Zuofa, T. (2014). Integration of energy efficient technologies in UK supermarkets. *Energy Policy*, 67, 388–393. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.12.002>
19. Zlatanović, I., Gligorević, K., Ivanović, S., & Rudonja, N. (2011). Energy-saving estimation model for hypermarket HVAC systems applications. *Energy and Buildings*, 43(12), 3353–3359. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.08.035>
20. Giunta, F., & Sawalha, S. (2021). Techno-economic analysis of heat recovery from supermarket’s CO2 refrigeration systems to district heating networks. *Applied Thermal Engineering*, 193, 117000. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117000>
21. Christina, S., Waterson, P., Dainty, A., & Daniels, K. (2015). A socio-technical approach to improving retail energy efficiency behaviours. *Applied Ergonomics*, 47, 324–335. <https://doi.org/10.1016/J.APERGO.2014.08.003>
22. Oliver, J. E. (2005). Kyoto Protocol. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 443–443. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_118

23. DIRECTIVE 2002/91/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments. (n.d.).
24. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. (n.d.).
25. Direttiva - 2012/27 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved October 31, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>
26. RACCOMANDAZIONE (UE) 2016/ 1318 DELLA COMMISSIONE - del 29 luglio 2016 - recante orientamenti per la promozione degli edifici a energia quasi zero e delle migliori pratiche per assicurare che, entro il 2020, tutti gli ed.... (n.d.).
27. Direttiva - 2018/844 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved October 31, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32018L0844>
28. Direttiva - 2010/31 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved October 31, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX%3A32010L0031>
29. Fit for 55 - The EU's plan for a green transition - Consilium. (n.d.). Retrieved January 10, 2024, from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
30. Bosetti & Gatti - d.P.R. n. 412 del 1993 (consumi energetici). (n.d.). Retrieved February 8, 2023, from https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1993_0412.htm
31. DECRETO LEGISLATIVO 19 agosto 2005, n. 192 - Normattiva. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2005;192>
32. DECRETO LEGISLATIVO 29 dicembre 2006, n. 311 - Normattiva. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006;311>
33. UNI/TS 11300-1:2014 - UNI Ente Italiano di Normazione. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://store.uni.com/uni-ts-11300-1-2014>
34. UNI EN ISO 13790:2008 - UNI Ente Italiano di Normazione. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://store.uni.com/uni-en-iso-13790-2008>
35. UNI EN 15193-1:2017 - UNI Ente Italiano di Normazione. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://store.uni.com/uni-en-15193-1-2017>
36. World Food Summit - Final Report - Part 1. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://www.fao.org/4/w3548e/w3548e00.htm>

37. Regolamento - 178/2002 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex:32002R0178>
38. Regolamento - 852/2004 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32004R0852>
39. Regolamento - 853/2004 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32004R0853>
40. Regolamento - 854/2004 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32004R0854>
41. UNI EN 12464-1:2021 - UNI Ente Italiano di Normazione. (n.d.). Retrieved November 16, 2025, from <https://store.uni.com/uni-en-12464-1-2021>
42. UNI EN 15232-1:2017 - UNI Ente Italiano di Normazione. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://store.uni.com/uni-en-15232-1-2017>
43. PNIEC: Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://www.pniecmonitoraggio.it/Pagine/piattaforma%20pniec.aspx>
44. Bosetti & Gatti - Legge n. 10 del 1991. (n.d.). Retrieved February 8, 2023, from https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1991_0010.htm
45. DECRETO LEGISLATIVO 3 marzo 2011, n. 28 - Normattiva. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2011;28>
46. Directive - 2009/28 - EN - Renewable Energy Directive - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved February 5, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj/eng>
47. DECRETO-LEGGE 4 giugno 2013, n. 63 - Normattiva. (n.d.). Retrieved February 4, 2026, from <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legge:2013;63>
48. Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. (n.d.). Retrieved March 7, 2026, from <https://www.mimit.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/decreto-interministeriale-26-giugno-2015-adeguamento-linee-guida-nazionali-per-la-certificazione-energetica-degli-edifici>
49. Direttiva - 2018/2001 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved February 5, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>
50. 28 ottobre 2025 - Decreto del Ministro dell'ambiente e della sicurezza energetica 29 luglio 2025 recante "Modifiche al decreto del Ministro dell'ambiente e della sicurezza energetica 23 luglio 2024, c.d. Energy Release - Ministero dell'Ambiente e della S.... (n.d.). Retrieved March 7, 2026, from <https://www.mase.gov.it/portale/-/28-ottobre-2025-decreto-del-ministro-dell->

ambiente-e-della-sicurezza-energetica-29-luglio-2025-recante-modifiche-al-decreto-del-ministro-dell-ambiente-e-della-sicurezza-energetica-23-luglio-2024-c.d.-energy-release

51. Spitler, J. D. (2006). Editorial: Building performance simulation: The now and the not yet. *HVAC and R Research*, 12, 711–713. <https://doi.org/10.1080/10789669.2006.10391194>
52. Clarke, J. A., & Hensen, J. L. M. (2015). Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and Environment*, 91, 294–306. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.04.002>
53. DECRETO LEGISLATIVO 14 luglio 2020, n. 73 - Normattiva. (n.d.). Retrieved May 24, 2026, from <https://www.normattiva.it/atto/caricaDettaglioAtto?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2020-07-14&atto.codiceRedazionale=20G00093&tipoDettaglio=originario>
54. UNI 11337-1:2017 - UNI Ente Italiano di Normazione. (n.d.). Retrieved February 5, 2026, from <https://store.uni.com/uni-11337-1-2017>
55. Level of Development (LOD) Specification – BIM Forum. (n.d.). Retrieved February 5, 2026, from <https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/>
56. Gulev, S. K., Ahn, J., Aðalgeirsdóttir, G., Albani, S., & Allan, R. P. (n.d.). Shubha Sathyendranath (United Kingdom/ Canada, Overseas citizen of India. *Blair Trewin*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
57. Harfoot, M. B. J., Tittensor, D. P., Knight, S., Arnell, A. P., Blyth, S., Brooks, S., ... Burgess, N. D. (2018). Present and future biodiversity risks from fossil fuel exploitation. *Conservation Letters*, 11(4), e12448. <https://doi.org/10.1111/CONL.12448>
58. Byrne, M. P. (2021). Amplified warming of extreme temperatures over tropical land. *Nature Geoscience* 2021 14:11, 14(11), 837–841. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00828-8>
59. Exploring the interplay between soil thermal and hydrological changes and their impact on carbon fluxes in permafrost ecosystems. (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad50ed>
60. Hu, H., Chen, J., Zhou, F., Nie, M., Hou, D., Liu, H., ... Liang, Y. (2024). Relative increases in CH₄ and CO₂ emissions from wetlands under global warming dependent on soil carbon substrates. *Nature Geoscience* 2024 17:1, 17(1), 26–31. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01345-6>
61. Senande-Rivera, M., Insua-Costa, D., & Miguez-Macho, G. (2022). Spatial and temporal expansion of global wildland fire activity in response to climate change.

- Nature Communications* 2022 13:1, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28835-2>
62. Maes, S. L., Dietrich, J., Midolo, G., Schwieger, S., Kummu, M., Vandvik, V., ... Dorrepaal, E. (2024). Environmental drivers of increased ecosystem respiration in a warming tundra. *Nature* 2024 629:8010, 629(8010), 105–113. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07274-7>
 63. Rogers, K., Kelleway, J. J., Saintilan, N., Megonigal, J. P., Adams, J. B., Holmquist, J. R., ... Woodroffe, C. D. (2019). Wetland carbon storage controlled by millennial-scale variation in relative sea-level rise. *Nature* 2019 567:7746, 567(7746), 91–95. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0951-7>
 64. climate.onebuilding.org. (n.d.). Retrieved August 14, 2024, from <https://climate.onebuilding.org/>
 65. PVGIS typical meteorological year (TMY) generator - The Joint Research Centre: EU Science Hub. (n.d.). Retrieved November 17, 2025, from https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-tools/pvgis-typical-meteorological-year-tmy-generator_en
 66. ISO 15927-4:2005 - Hygrothermal performance of buildings — Calculation and presentation of climatic data — Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling. (n.d.). Retrieved November 17, 2025, from <https://www.iso.org/standard/41371.html>
 67. intro - Meteonorm (en). (n.d.). Retrieved August 14, 2024, from <https://meteonorm.com/en/>
 68. Meteonorm Timeseries - Meteonorm (en). (n.d.). Retrieved August 14, 2024, from <https://meteonorm.com/en/meteonorm-timeseries>
 69. Summary for Policymakers IPCC SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS Summary for Policymakers Emissions Scenarios. (2000).
 70. Harvey, L. D. D. (2020). Using modified multiple heating-degree-day (HDD) and cooling-degree-day (CDD) indices to estimate building heating and cooling loads. *Energy and Buildings*, 229, 110475. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110475>
 71. Ramon, D., Allacker, K., De Troyer, F., Wouters, H., & van Lipzig, N. P. M. (2020). Future heating and cooling degree days for Belgium under a high-end climate change scenario. *Energy and Buildings*, 216, 109935. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.109935>
 72. Disquisitiones Arithmeticae. (n.d.). Retrieved November 17, 2025, from <https://yalebooks.yale.edu/book/9780300094732/disquisitiones-arithmeticae/>

73. ISO - ISO 6946:2017 - Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods. (n.d.). Retrieved February 8, 2023, from <https://www.iso.org/standard/65708.html>
74. Database Initiatives - ecoinvent. (n.d.). Retrieved March 15, 2023, from <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/database-initiatives/>
75. Perneti, R. (n.d.). On the influence of several parameters in energy model calibration: the case of a historical building.
76. ASHRAE Guideline 14-2014 - Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. (n.d.). Retrieved January 19, 2024, from <https://webstore.ansi.org/standards/ashrae/ashraeguideline142014>
77. Gazzetta Ufficiale. (n.d.). Retrieved March 15, 2023, from <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>
78. Kppen, W. and Geiger, R. (1928) *Klimate der Erde*. [Climates of the Earth.] Gotha, Verlag Justus Perthes. Wall-map 150x200cm. - References - Scientific Research Publishing. (n.d.). Retrieved July 1, 2025, from <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2134755>
79. FUEL MIX: PUBBLICATA LA COMPOSIZIONE DEL MIX ENERGETICO PER L'ANNO 2024. (n.d.). Retrieved November 16, 2025, from <https://www.gse.it/servizi-per-te/news/fuel-mix-pubblicata-la-composizione-del-mix-energetico-per-l-anno-2024>



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

La borsa di dottorato cofinanziata con risorse dell'Unione europea-*NextGeneration EU*
Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Missione 4 – Componente 2 – “Dalla Ricerca all'Impresa”
Inv. 3.3 Borse PNRR “Introduzione di dottorati innovativi che rispondono ai fabbisogni di innovazione delle
imprese e promuovono l’assunzione dei ricercatori dalle imprese” – *CUP B12B22000710007*