



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi energetica di edifici in direzione Zero Energy Buildings in Italia: stato dell'arte

S. Di Turi, I. Falcone, I. Nardi, L. Ronchetti, N. Calabrese

ANALISI ENERGETICA DI EDIFICI IN DIREZIONE ZERO ENERGY BUILDINGS IN ITALIA: STATO DELL'ARTE

S. Di Turi, I. Falcone, I. Nardi, L. Ronchetti, N. Calabrese

Con il contributo di: A. Carderi, F. Cautilli, G. Centi, G. Elmo, N. Labia, D. Magri

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.1 - Analisi energetica di edifici in direzione Zero Energy Buildings in Italia: stato dell'arte*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY.....	5
1 INTRODUZIONE	6
2 OBIETTIVO E METODO	7
2.1 METODOLOGIA ADOTTATA E FINALITÀ DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA	7
2.2 STUDIO BIBLIOGRAFICO CONDOTTO.....	8
3 GLI STANDARD NORMATIVI ATTUALI.....	12
3.1 LA SITUAZIONE IN EUROPA	12
3.2 GLI EDIFICI NZEB IN ITALIA: NORME E METODOLOGIE DI CALCOLO.....	16
4 LE CRITICITÀ DEGLI EDIFICI A ENERGIA QUASI ZERO	19
5 NUOVE PROSPETTIVE: VERSO GLI EDIFICI ZEB	21
5.1 LA NECESSITÀ DI UNA DEFINIZIONE UNIVOCA	21
5.2 L'INFLUENZA DELLA SCELTA DI UNA DEFINIZIONE DI ZEB NEL PROCESSO PROGETTUALE E VALUTATIVO.....	25
6 CENNI PER UNA PROGETTAZIONE DI EDIFICI IN DIREZIONE ZERO ENERGY ED ASPETTI ECONOMICI CONNESSI.....	28
7 TECNOLOGIE DI INVOLUCRO PER EDIFICI IN DIREZIONE ZEB.....	32
7.1 TECNOLOGIE DI INVOLUCRO TRADIZIONALI.....	32
7.1.1 <i>Materiali isolanti</i>	34
7.1.2 <i>Sistemi costruttivi a umido</i>	35
7.1.3 <i>Sistemi costruttivi a secco</i>	39
7.1.4 <i>Facciata ventilata</i>	42
7.2 MATERIALI ISOLANTI AD ALTE PRESTAZIONI	43
7.2.1 <i>Isolanti riflettenti</i>	43
7.2.2 <i>PCM - materiali a cambiamento di fase</i>	45
7.2.3 <i>Aerogel</i>	48
7.2.4 <i>VIP (Vacuum Insulation Panel) – isolanti sottovuoto</i>	50
7.2.5 <i>Considerazioni finali sulle tecnologie di involucro analizzate</i>	52
8 TECNOLOGIE DI IMPIANTO NEGLI ZEB	55
8.1 TIPOLOGIE DI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE	56
8.1.1 <i>Sistemi idronici</i>	58
8.1.2 <i>Sistemi a tutta aria</i>	58
8.1.3 <i>UTA (Unità di Trattamento Aria)</i>	59
8.1.4 <i>Sistemi misti aria-acqua</i>	59
8.1.5 <i>Le tecnologie più promettenti: le pompe di calore</i>	59
8.2 VMC (VENTILAZIONE MECCANICA CONTROLLATA) E RECUPERATORI DI CALORE	63
8.3 LE FONTI RINNOVABILI	66
8.4 I SISTEMI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA.....	68
9 CONCLUSIONI.....	71
10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	73
11 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	78

Sommario

L'evoluzione verso modelli di edilizia sempre più stringenti dal punto di vista delle prestazioni energetiche è oggi una delle sfide più importanti ed è in linea con gli obiettivi previsti nella Strategia Energetica Nazionale e nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima. In tale contesto l'attività di ricerca, la cui prima annualità è descritta in questo report, ha l'obiettivo primario di promuovere strumenti utili all'incremento delle prestazioni energetiche e fornire indicazioni per la realizzazione di edifici in direzione "zero energy".

Lo studio parte dall'analisi della situazione normativa attuale in Europa, mettendo in evidenza la disomogeneità delle modalità di recepimento delle direttive europee da parte dei diversi Stati membri per il raggiungimento dell'obiettivo "nearly zero energy buildings". Per quanto riguarda l'Italia, il D.M. 26/6/2015 ha previsto l'obbligo, entro il 2021, di realizzare "edifici a energia quasi zero" per tutti gli edifici di nuova costruzione o quelli esistenti sottoposti a ristrutturazione importante, fissando una serie di requisiti minimi e verifiche da assolvere. Inoltre, devono essere rispettati gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi dettati nel D.Lgs. 28/2011.

A partire da queste considerazioni, l'analisi critica del contesto europeo e italiano evidenzia la necessità di superare gli standard attualmente vigenti e indagare nuove prospettive per la progettazione di edifici ad altissima efficienza in direzione "zero energy", concetto ancora vasto e non univoco, sia da un punto di vista teorico che tecnico-economico. Per tale motivo, sono state analizzate diverse definizioni di Zero Energy Building (ZEB) e Net ZEB, attualmente presenti nella letteratura scientifica e tecnica di settore, al fine di capire in che direzione il nuovo parco edilizio debba evolvere nei prossimi anni e l'influenza che esse hanno nel processo progettuale stesso.

La seconda parte del lavoro approfondisce gli aspetti tecnico-realizzativi con la descrizione dei principi basilari che la progettazione di edifici ZEB o Net ZEB dovrebbe seguire, tenendo conto di approcci passivi, attivi e di integrazione con le fonti rinnovabili, oltre che della necessità imprescindibile di un'analisi di fattibilità economica. Seguono l'analisi e la selezione di tecnologie di involucro e impianto da utilizzare negli edifici ZEB o Net ZEB. A tal proposito, vengono individuate e descritte soluzioni efficienti di involucro, sia tradizionali sia innovative, volte a massimizzarne la prestazione in modo da ottenere un fabbisogno termico molto basso. Per quanto riguarda gli impianti, invece, l'accento è stato posto sull'integrazione con le fonti energetiche rinnovabili, per la produzione dell'energia necessaria a coprire il fabbisogno degli edifici. Nell'analisi si è tenuto conto di molteplici sistemi, quali le tipologie impiantistiche più idonee per la climatizzazione invernale ed estiva, i sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili e gli impianti di ventilazione meccanica. Infine, sono stati introdotti i sistemi di accumulo dell'energia, che nel futuro saranno indispensabili per raggiungere l'obiettivo "zero energy". Al termine di ciascuna sezione, sono state individuate le strategie vincenti con un confronto degli aspetti ritenuti più significativi (prestazioni, convenienza economica, versatilità), per il raggiungimento dell'obiettivo ZEB (o Net ZEB).

Summary

The evolution towards high-energy efficient buildings is one of the most important challenges today and faces the goals of the Italian National Energy Strategy and the Integrated National Energy and Climate Plan. Thus, the research has the primary aim of promoting tools useful to increase energy performance and providing suggestions for the buildings construction in a "zero energy" direction.

The study starts from the analysis of the current legislation in Europe. It highlights the different ways in which the Member States implemented the European Directives, in order to achieve the "nearly zero energy" objective. In Italy, the Ministerial Decree 26.06.2015 provides for the obligation, by 2021, to create "nearly zero energy buildings" for all new buildings or existing ones that undergo deep renovation. It sets a series of minimum requirements to be performed. Furthermore, the Legislative Decree 28.2011 establishes the percentage of building energy need provided by renewable energy sources.

In this framework, the critical analysis of the European and Italian context highlights the need to overcome the current standards and to investigate new perspectives for the design of high-efficient buildings in "zero energy" direction. It is still a wide and not univocal concept, both from a theoretical and technical-economic point of view. For this reason, the study analyses different definitions of Zero Energy Building (ZEB) and Net ZEB, in the scientific and technical literature, in order to understand in which direction new buildings should evolve in the future and the influence they have in the design process.

The second part of the work explores the technical-construction aspects with the description of the basic principles that design of ZEB or Net ZEB buildings should follow. It has to take into account passive and active strategies and the integration with renewable sources. Moreover, it needs also an economic feasibility analysis. Subsequently, it is carried out the analysis and selection of technologies for building envelope and plant systems, to be used in ZEB or Net ZEB buildings. In this regard, efficient traditional and innovative solutions for building envelope are identified and described to maximize energy performance and to obtain a very low thermal and energy need. Instead, regarding plant systems, the emphasis is placed on the integration with renewable energy sources to cover energy needs of buildings. The analysis takes into account multiple systems, such as the most suitable plant systems types for heating and cooling, energy production systems from renewable sources and mechanical ventilation systems. Finally, energy storage systems are introduced, since they are essential to achieve the "zero energy" goal. At the end of each section, the winning strategies are identified with a comparison of the most significant aspects (performance, economic convenience, versatility and so on), to achieve the ZEB (or Net ZEB) goal.

1 Introduzione

Gli edifici sono responsabili attualmente di circa il 40% del consumo di energia e del 36% delle emissioni di CO₂ dell'Unione Europea. Per tale motivo, soltanto attraverso interventi volti a implementare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente così come delle nuove costruzioni è possibile aspirare a significativi risparmi energetici con benefici in termini economici sociali e ambientali.

Ciò che è certo è l'obiettivo europeo al 2050 di raggiungere una riduzione delle emissioni di gas serra pari ad almeno all'80% rispetto alle emissioni del 1990.

L'evoluzione verso modelli di edilizia sempre più stringenti dal punto di vista delle prestazioni energetiche è oggi una delle sfide più importanti ed è in linea con gli obiettivi previsti nella Strategia Energetica Nazionale [1] e nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima [2].

Indubbiamente l'edilizia esistente presenta ampie possibilità di efficientamento, ma ciò non toglie che le buone pratiche partano anche dalla progettazione del nuovo, che, sebbene rappresenti una parte esigua dell'intero parco edilizio, può fungere però da caso pilota per l'avvio di pratiche di efficientamento energetico sempre più stringenti e performanti.

Se il consumo energetico nel settore residenziale in Europa rappresenta una percentuale consistente dei consumi totali, anche il settore non residenziale concorre in maniera sostanziale al consumo totale degli edifici europei e rappresenta un settore estremamente eterogeneo rispetto a quello residenziale, con un consumo specifico medio di energia pari circa a 280 kWh/m² [3]. Negli ultimi anni, il consumo di elettricità è cresciuto dal 2008 al 2012 principalmente per il crescente numero di nuove apparecchiature, strumenti tecnologici e aria condizionata[4,5]. Il settore civile registra una percentuale di consumi finali di energia elettrica pari a circa il 56% del totale, di cui il solo residenziale è responsabile all'incirca per il 40% [6].

A partire da tali presupposti, la normativa italiana ha previsto l'obbligo, entro il 2021, di realizzare "edifici a energia quasi zero" per tutti gli edifici di nuova costruzione o esistenti sottoposti a ristrutturazione importante, per cui devono essere rispettate le verifiche rispetto a valori limite calcolati per l'edificio di riferimento, come fissati dal D.M. 26/6/2015 [7]. Inoltre, devono essere rispettati gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi dettati nel D.Lgs. 28/2011 [8].

Gli studi condotti nello scorso triennio della Ricerca di Sistema Elettrico [9] hanno messo in evidenza quanto sia stringente la definizione italiana di "nearly Zero Energy Buildings" (nZEB), differente da quella adottata da molti Stati membri della Comunità europea che hanno fissato semplicemente un indicatore numerico del consumo annuale di energia primaria. Ciò determina delle sfide tecnologiche nel processo di progettazione di un edificio nZEB, ma allo stesso tempo mira alla riduzione dei fabbisogni ottenuta di pari passo con un aumento delle prestazioni dell'edificio in tutte le sue parti. Tale presupposto è fondamentale per aumentare ulteriormente l'efficienza degli edifici e soddisfare il fabbisogno energetico attraverso l'utilizzo preponderante di fonti energetiche rinnovabili.

In tale contesto si colloca la più ampia riflessione sulle modalità con cui aspirare ad un eventuale superamento degli standard normativi attuali e alla realizzazione di edifici caratterizzati da prestazioni energetiche sempre più elevate.

Si considera pertanto la necessità di progettare a tutto tondo edifici che non siano più soltanto in ottica nZEB, ma vadano in direzione "Zero Energy" o "Net Zero Energy", riprendendo le definizioni già presenti nella legislazione europea e ad oggi ancora troppo ampie e diversificate tra i Paesi dell'Europa.

La sfida è quella non soltanto di circoscrivere il campo di azione per una definizione condivisa e raggiungibile di Zero Energy Building, ma anche di capire se le tecnologie attuali consentono effettivamente il raggiungimento dell'obiettivo proposto sia in termini progettuali che economici.

2 Obiettivo e metodo

2.1 Metodologia adottata e finalità dell'attività di ricerca

L'attività di ricerca condotta ha l'obiettivo primario di promuovere veri e propri strumenti utili all'incremento delle prestazioni energetiche degli edifici, attraverso lo studio del panorama attuale in termini legislativi e applicativi, per fornire indicazioni utili alla realizzazione di edifici in direzione "zero energy".

Lo studio parte, in primo luogo, dall'analisi esplorativa della situazione normativa attuale in Europa e in Italia, mettendo in evidenza la disomogeneità delle modalità di recepimento delle direttive europee da parte dei diversi Stati membri e la molteplicità di standard e indicazioni presenti attualmente nell'ambito del raggiungimento di edifici ad altissima efficienza energetica.

A tal proposito, riprendendo anche le fila dello scorso triennio di Ricerca di Sistema Elettrico, sono state analizzate le criticità nel raggiungimento dello standard dei nearly Zero Energy Buildings (nZEBs), sia in Europa, per confronto tra le modalità di ricezione delle direttive europee nei vari Stati, sia in Italia, per come definito dal DM 26.6.2015 [7] e con alcune considerazioni sulla situazione attualmente presente nel parco edilizio italiano.

Da tutto questo nasce la necessità di superare tali criticità e indagare nuove prospettive per la progettazione di edifici ad altissima efficienza in direzione "zero energy", concetto ancora vasto e non univoco.

Per tale motivo, sono stati esaminati aspetti teorici relativi agli Zero Energy Buildings, anche attraverso lo studio di letteratura scientifica e tecnica di settore, nel tentativo di mettere ordine nel parco di definizioni attualmente presenti e capire in quale direzione il nuovo parco edilizio debba evolvere nei prossimi anni. Sono state, quindi, analizzate diverse definizioni di ZEB e Net ZEB e l'influenza che esse hanno nel processo progettuale e valutativo.

Nella seconda parte, si entra, invece, nel vivo degli aspetti pratici riguardanti gli edifici ZEB o Net ZEB con i principi basilari che la progettazione di tali edifici dovrebbe seguire tenendo conto di approcci passivi, attivi e di integrazione con le fonti rinnovabili, oltre che della necessità imprescindibile di un'analisi di fattibilità economica.

Entrando ancor più nei risvolti applicativi, segue, quindi, l'analisi e la selezione di tecnologie di involucro e impianto consolidate e innovative da utilizzare nell'ottica di una progettazione ZEB o Net ZEB.

Per quanto riguarda l'involucro, sono state individuate soluzioni efficienti, sia consolidate sia innovative, per edifici residenziali e non, con attenzione a componenti volti a massimizzare la prestazione dell'involucro in modo da ottenere un fabbisogno termico molto basso.

Per quanto riguarda gli impianti, invece, l'accento è stato posto sull'integrazione con le fonti energetiche rinnovabili, per la produzione dell'energia necessaria a coprire il fabbisogno degli edifici. La crescente applicazione di sistemi basati su energie rinnovabili contribuisce, infatti, ad una progressiva riduzione dell'utilizzo di fonti fossili per la climatizzazione degli edifici ed un conseguente incremento dell'uso del vettore elettrico, fino alla realizzazione dei cosiddetti *all-electric buildings*.

Nell'analisi si è tenuto conto, quindi, di molteplici sistemi, quali le tipologie impiantistiche più idonee per la climatizzazione invernale ed estiva, le tipologie impiantistiche da fonti rinnovabili e gli impianti di ventilazione meccanica.

Infine, sono stati introdotti i sistemi di accumulo dell'energia, che nel futuro saranno indispensabili per raggiungere l'obiettivo "zero energy".

Al termine di ciascuna delle sezioni dedicate alle diverse tecnologie di involucro e impianto sono state individuate le strategie vincenti con un'analisi qualitativa degli aspetti più significativi (ad esempio, prestazioni, convenienza economica, versatilità, ecc.), mettendo in risalto le soluzioni tecnologiche più efficaci consolidate e/o innovative, presenti sul mercato, per raggiungere l'obiettivo ZEB (o Net ZEB).

2.2 Studio bibliografico condotto

La stesura di questo report è il risultato di un lavoro consistente di ricerca bibliografica svolto per descrivere quanto è stato fatto finora in campo nazionale e internazionale nell'ambito delle nuove politiche energetiche e della progettazione in direzione Zero Energy Building (ZEB). Prendendo spunto dal lavoro di Bravo-Hidalgo e Baez-Hernandez [10] si è deciso di analizzare lo stato dell'arte a partire dalle piattaforme scientifiche e dalle banche dati più significative a livello internazionale.

Dalla banca dati SCOPUS, utilizzando nel motore di ricerca apposito la *keyword* "Zero Energy Buildings", risultano 2134 articoli scientifici redatti dal 1998 al 2019 e si evince come il trend di pubblicazioni internazionali volte alla definizione degli Zero Energy Buildings ed all'approfondimento di tutte le tematiche ad essi correlati sia cresciuto esponenzialmente negli ultimi anni, segno di come la tematica sia attuale e quanto mai oggetto di riflessione profonda (Figura 1).

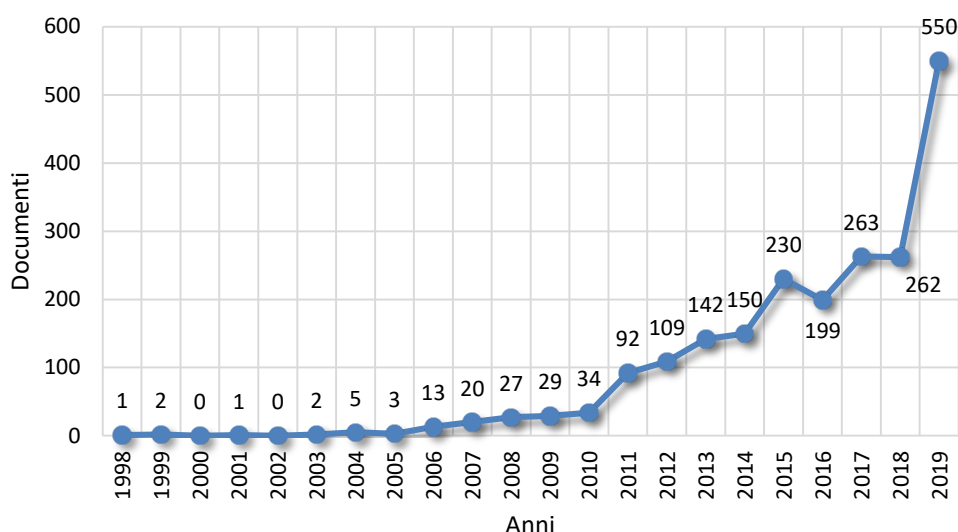


Figura 1. Andamento delle pubblicazioni scientifiche inerenti gli ZEB su piattaforma Scopus (Rielaborazione da [11] - Copyright © 2020 Elsevier. Scopus®)

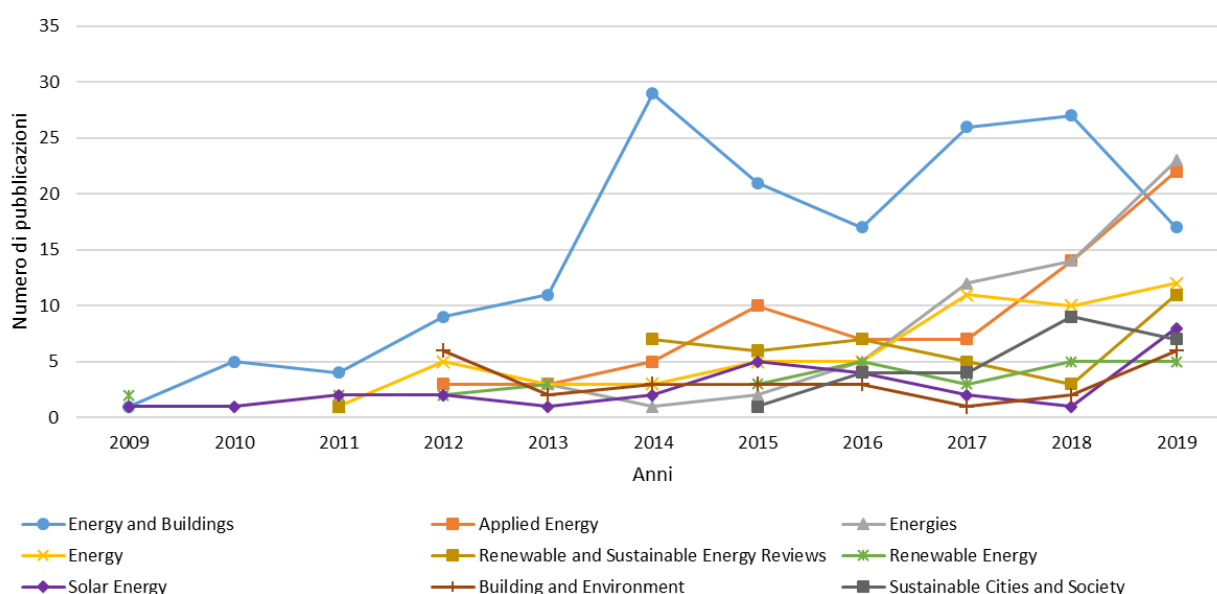


Figura 2. Andamento delle pubblicazioni scientifiche su alcune delle riviste della banca dati Scopus inerenti gli ZEB (Rielaborazione da [11] - Copyright © 2020 Elsevier. Scopus®)

Tale mappa, ottenuta con l'ausilio del software VOSviewer v. 1.6.13 [12], è basata sulla frequenza di utilizzo delle keywords presenti all'interno dei paper ed è ottenuta attraverso una vera e propria ricerca di tipo semantico, analizzando differenti categorie ricavate dalla piattaforma Scopus, quali:

- autori;
- titolo;
- anno di pubblicazione;
- titolo della rivista;
- citazioni;
- parole chiave indicate dagli autori;
- parole chiave indicizzate;
- tipologia di documento.

La mappa rende visibili i trend e gli aspetti maggiormente studiati in campo internazionale, relativi all'oggetto della ricerca.

Nell'elaborazione, sono state prese in considerazione soltanto le parole chiave che compaiono per più di cinque volte all'interno dei documenti analizzati: delle 10.741 parole chiave individuate, soltanto 1.057 rientrano in tale requisito.

Inoltre, per ognuna delle espressioni è stata calcolata la frequenza del numero di collegamenti tra le keywords, in modo da capirne le connessioni e circoscrivere, di conseguenza, gli ambiti in cui vengono utilizzate alcune espressioni molto comuni quali "efficienza energetica" e "sviluppo sostenibile" (Tabella 1). Dall'analisi della mappa elaborata (Figura 4), costituita da circa 1000 parole chiave rilevate dal database, con oltre 73.080 link, sono state, quindi, ulteriormente selezionate le parole chiave più utili all'attività svolta, in modo da affinare la ricerca per la scelta ulteriore delle fonti più significative da analizzare.

Tabella 1. Selezione di alcune delle parole chiave indicizzate più frequenti all'interno del campione di articoli analizzato

Parole chiave	Frequenza di utilizzo	Numero di interconnessioni
zero energy buildings	1446	17893
energy efficiency	787	10744
architectural design	730	4369
renewable energy resources	272	4057
sustainable development	278	3535
net-zero energy buildings	261	3435
heating	235	3171
photovoltaic	186	2810
life cycle	182	2773

Successivamente, sono state analizzate le più frequenti parole chiave indicate dagli autori dei documenti analizzati (Figura 5 e Tabella 2). Si nota come espressioni quali "efficienza energetica", "energie rinnovabili", "benessere termico", "prestazione energetica", "accumuli di energia" siano non a caso presenti tra i primi venti termini più ricorrenti.

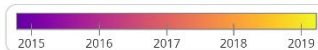


Figura 5. Mappa di frequenza delle 101 parole chiave individuate dagli autori con una frequenza minima di utilizzo pari a 20, elaborata attraverso il software VOSviewer version 1.6.13

Tabella 2. Selezione di alcune delle parole chiave più frequenti indicate dagli autori

Parole chiave (autori)	Frequenza di utilizzo	Numero di interconnessioni
energy efficiency	193	375
zero energy buildings	101	158
nzeb	185	278
net zero energy buildings	98	158
renewable energy	94	195
thermal comfort	53	100
solar energy	51	91
energy performance	45	73
embodied energy	28	72
photovoltaics	37	71
optimization	31	64
energy storage	26	63

Questi rappresenteranno anche i temi sviluppati all'interno dei paragrafi successivi o spunti di riflessione per i futuri risvolti della ricerca.

L'analisi di base finora descritta ha consentito, quindi, di selezionare i topic più attuali relativi all'oggetto del lavoro e di orientarsi in un campo che altrimenti rischia di essere troppo vasto e interdisciplinare. Le mappe utilizzate hanno aiutato, quindi, a selezionare, all'interno dell'enorme mole di fonti presenti sul tema, i riferimenti ritenuti più significativi per raggiungere l'obiettivo di fornire un quadro più esaustivo possibile dello stato dell'arte in un campo quanto mai in evoluzione.

3 Gli standard normativi attuali

L'attività di ricerca condotta, come già accennato, non può prescindere dallo studio e dalla ricognizione della situazione attuale a livello europeo e italiano.

Per tale motivo, si riportano di seguito i tratti salienti del panorama legislativo vigente, tentando di fornire una visione critica dello stato attuale e le sue ripercussioni nei contesti analizzati.

3.1 La situazione in Europa

La direttiva 2018/844 [13] è lo strumento legislativo più recente a livello europeo per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici europei. Essa ha modificato la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia, detta anche «direttiva EPBD» da Energy Performance of Buildings Directive, in fase di revisione [14]. Le altre direttive principali di riferimento sono la Energy Efficiency Directive (EED) 2012/27/EU [15] e la Renewable Energy Directive (RED) 2009/28/EU [16].

In tale panorama legislativo, la direttiva EPBD prevede che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione debbano essere edifici a energia quasi zero, requisito già anticipato per gli edifici pubblici al 31 dicembre 2018.

Tali edifici, detti “nearly Zero-Energy Buildings” (nZEB) sono definiti come “edifici ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno, molto basso o quasi nullo, dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili”[14].

Ogni Paese europeo ha recepito la direttiva EPBD in base alle proprie esigenze e alle condizioni nazionali e regionali. Ogni Stato ha, quindi, definito i piani nazionali e i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici anche al fine di raggiungere un livello ottimale di costo, il tutto perseguibile durante l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Per tale motivo, come evidenziato dallo studio del BPIE [17] e attraverso il progetto europeo RePublic_ZEB [18], si ha una sostanziale disomogeneità della situazione nei diversi Paesi, i quali, come criteri di classificazione e definizione degli edifici nZEB, considerano requisiti che spaziano dalla tipologia di edifici (nuovi o esistenti) alla loro classificazione in privati e pubblici, oltre ad adottare diversi criteri per definire il bilancio energetico, i confini fisici del sistema edificio, il periodo di riferimento da prendere in considerazione, gli indicatori che quantifichino la prestazione energetica a seconda degli usi di energia, dell'energia primaria o della percentuale di fonti rinnovabili e i fattori di conversione e di normalizzazione (Figura 6 e Figura 7) [19].

Secondo la raccomandazione europea 2016/1318 della Commissione Europea [20], pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'UE del 2 agosto 2016, è tuttavia implicita, nel concetto di edifici a energia quasi zero, la sinergia degli interventi di efficienza energetica e di integrazione dell'energia da fonti rinnovabili.

Si ha, quindi, la necessità di una progettazione integrata per soddisfare il fabbisogno energetico di questi edifici, che dovrebbe essere auspicabilmente esiguo.

La finalità è forse quella di mettere un po' di ordine nella varietà dei criteri adottati in Europa. Nella maggior parte dei Paesi, l'indicatore principale utilizzato si riferisce all'energia primaria. I fattori di conversione dell'energia primaria variano a seconda di valori medi nazionali o regionali annuali, definiti tenendo conto delle norme europee.

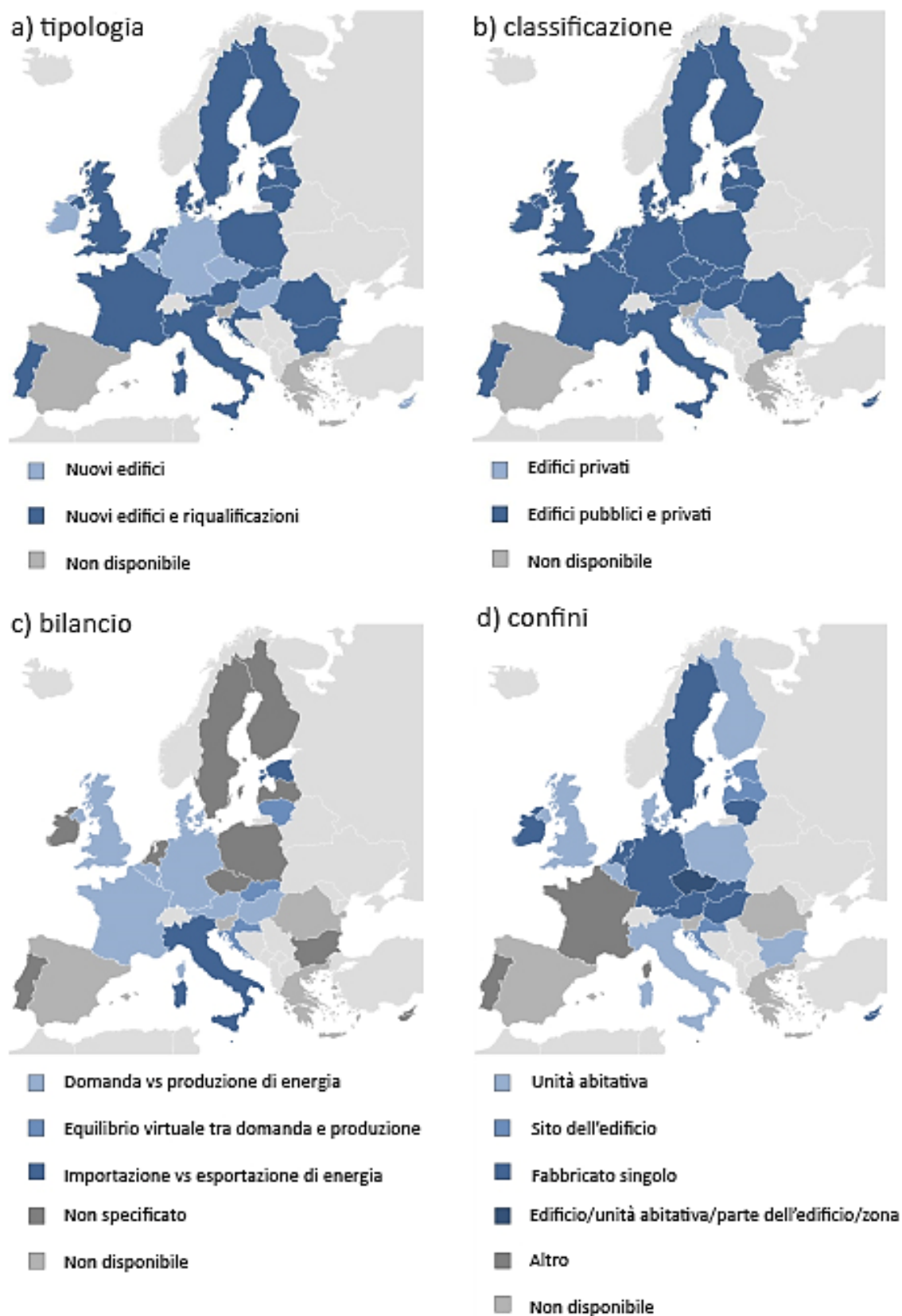


Figura 6. Caratteri inerenti la tipologia (a) e la classificazione degli edifici (b), il tipo di bilancio (c), i confini fisici (d) così come considerati dai diversi Stati Membri. Fonte:[19]

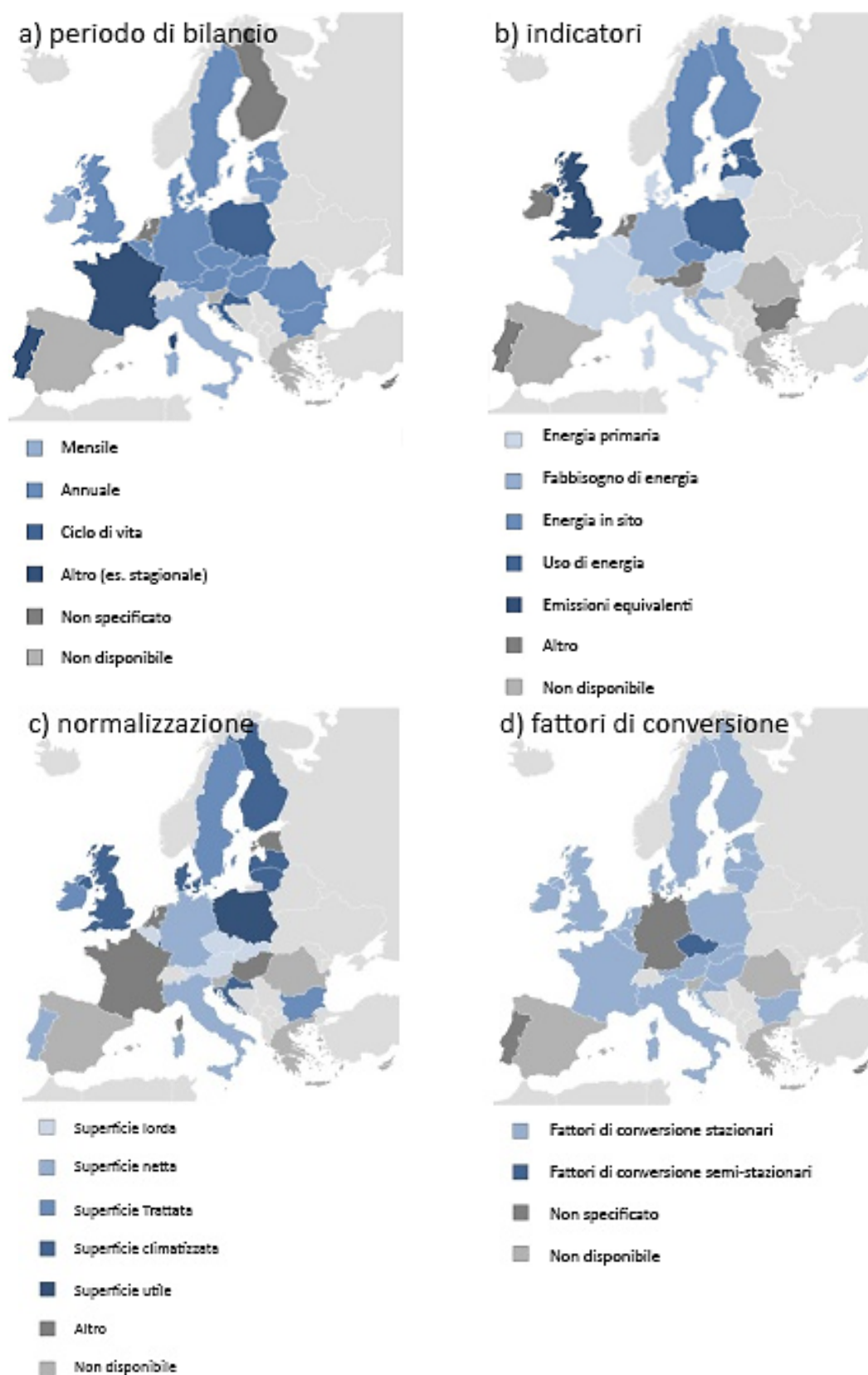


Figura 7. Periodo considerato per il bilancio, indicatori, criteri di normalizzazione, fattori di conversione statici o quasi statici (d). Fonti: [14] e [19]

Soltanto in alcuni Stati come, ad esempio, i Paesi Bassi e la Regione belga delle Fiandre, l'utilizzo primario di energia dell'edificio è espresso attraverso un indice adimensionale ottenuto dal confronto dell'energia primaria dell'edificio analizzato con un edificio "di riferimento" con caratteristiche simili.

Altro indicatore utilizzato per la valutazione è rappresentato dalle emissioni di CO₂, utilizzate o come parametro principale, in Paesi quali Regno Unito, Norvegia e Spagna, o come parametro complementare all'energia primaria.

Nella valutazione dell'efficienza energetica degli edifici vengono considerati i vari usi finali quali riscaldamento, acqua calda sanitaria, raffrescamento, ventilazione e illuminazione (soprattutto in quello non residenziale), mentre sono spesso trascurati i contributi degli elettrodomestici (valutati ad es. in Austria) e di ascensori e scale mobili (valutati ad es. in Italia per edifici non residenziali).

Gli indicatori numerici tra gli Stati membri sono disomogenei né tra loro paragonabili in quanto vengono adottate differenti metodologie per ottenerli.

Inoltre, la quota di energia da fonti rinnovabili spesso non è legata ad una percentuale minima, ma soltanto a considerazioni di tipo qualitativo e non nettamente circoscrivibile. In ogni caso, per ottenere una quota significativa di copertura del fabbisogno da parte dell'energia da fonti rinnovabili e un fabbisogno di energia primaria quasi zero, il fabbisogno stesso per riscaldamento e raffrescamento deve essere a tutti i costi molto basso.

La Raccomandazione 2016/1318 [20] stessa fornisce dei range indicativi per fasce climatiche d'Europa e per destinazione d'uso dell'edificio volte a dare delle indicazioni degli obiettivi da raggiungere in termini di fabbisogno (Tabella 3).

Tabella 3. Range di riferimento della prestazione energetica degli edifici a energia quasi zero (uffici e case unifamiliari) indicati nella Raccomandazione 2016/1318. Fonte: [20]

Edifici per uffici			
Zone climatiche	Energia primaria netta [kWh/mq anno]	Consumo normale di energia primaria [kWh/mq anno]	Energia da fonti rinnovabili in loco [kWh/mq anno]
Zona mediterranea	20-30	80-90	60
Zona oceanica	40-55	85-100	45
Zona continentale	40-55	85-100	45
Zona nordica	55-70	85-100	30

Case unifamiliari di nuova costruzione			
Zone climatiche	Energia primaria netta [kWh/mq anno]	Consumo normale di energia primaria [kWh/mq anno]	Energia da fonti rinnovabili in loco [kWh/mq anno]
Zona mediterranea	0-15	50-65	50
Zona oceanica	15-30	50-65	35
Zona continentale	20-40	50-70	30
Zona nordica	40-65	65-90	25

3.2 Gli edifici nZEB in Italia: norme e metodologie di calcolo

Anche in Italia l'incremento dell'efficienza energetica e, quindi, il raggiungimento dello standard nZEB (nearly Zero Energy Building) rappresentano un obiettivo prioritario in quanto il settore civile è responsabile di circa il 40% del fabbisogno energetico nazionale.

Si tratta di una delle sfide più attuali dato che l'obiettivo europeo al 2050 è un parco de-carbonizzato, da raggiungere attraverso la diffusione di uno standard nZEB o superiore, sia tra gli edifici di nuova costruzione sia tra quelli esistenti. Dal 2021, infatti, tutti gli edifici di nuova costruzione o soggetti ad una ristrutturazione importante di primo livello devono avere fabbisogno di energia quasi zero.

L'Italia ha finalizzato la necessità di dare priorità al raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico approvando il 19 giugno 2017, con decreto interministeriale, il "Piano d'azione nazionale per incrementare gli edifici a energia quasi zero" (PANZEB) a cura di ENEA, RSE e CTI con il coordinamento del Ministero dello sviluppo economico [21]. Il PANZEB 2017 punta alla definizione del concetto di nZEB, delle sue prestazioni e dei costi di realizzazione e descrive lo stato attuale relativo al parco immobiliare nazionale, comprendendo edifici di differenti destinazioni d'uso (residenziale e non) e la distinzione tra edifici nuovi ed esistenti. Esso, inoltre, offre un quadro degli strumenti regolatori, degli incentivi e delle nuove strategie di policy auspicabili, presentando anche i programmi proposti dalle diverse Regioni.

Il D.M. 26/6/2015 [7] e il D.Lgs. 28/2011 [8] hanno stabilito, invece, rispettivamente i requisiti minimi per il raggiungimento dello standard nZEB e gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili.

La direttiva EPBD definisce la prestazione energetica come la "quantità di energia, calcolata o misurata, necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico connesso ad un uso normale dell'edificio, compresa, in particolare, l'energia utilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, la produzione di acqua calda e l'illuminazione" (art 2, par4., EPBD) [14].

Per calcolarla, bisogna ricavare il fabbisogno di energia finale e l'energia primaria netta. L'energia prodotta in sito contribuisce a ridurre il fabbisogno di energia primaria.

Infine, viene calcolato il "consumo" globale annuo di energia in termini di energia primaria, che equivale al consumo di energia a fini riscaldamento, rinfrescamento, ventilazione, acqua calda e illuminazione.

Secondo la normativa italiana, il fabbisogno energetico annuale globale è dato dall'energia primaria per singolo servizio energetico su base mensile, così come l'energia rinnovabile prodotta all'interno del confine del sistema. Quindi i fabbisogni energetici e l'energia rinnovabile prodotta all'interno del confine del sistema, per vettore energetico, si compensano e si integrano.

In sintesi, il D.M. 26/6/2015 determina i valori limite vigenti dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici dei seguenti parametri:

- coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente (H_T);
- area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol,est}/A_{sup,utile}$);
- indici di prestazione termica utile per riscaldamento e raffrescamento ($EP_{H,nd}$, $EP_{C,nd}$);
- efficienza media stagionale degli impianti di climatizzazione invernale (η_H), di climatizzazione estiva (η_C) e di produzione di acqua calda sanitaria (η_W); indice di prestazione energetica globale totale dell'edificio ($EP_{gl,tot}$).

Inoltre, l'obbligo di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi di cui all'All. 3, par. 1 lett. C del D. Lgs. 28/2011 indica l'obbligo di copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, di almeno il 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e almeno il 50% della somma dei consumi previsti per il riscaldamento, l'acqua calda sanitaria e il raffrescamento.

Tabella 4. Trasmissione termica delle strutture nell'edificio di riferimento

Zona climatica	Trasmissione (2019-2021) [W/m ² K]			
	U _{PARETI}	U _{COPERTURA}	U _{PAVIMENTO}	U _{SERRAMENTI}
A e B	0,43	0,35	0,44	3,00
C	0,34	0,33	0,38	2,20
D	0,29	0,26	0,29	1,80
E	0,26	0,22	0,26	1,40
F	0,24	0,20	0,24	1,10

Tabella 5. Efficienze medie dei sottosistemi di utilizzazione dell'edificio di riferimento per i servizi di riscaldamento (H), raffrescamento (C) e acqua calda sanitaria (W), tratte dall'Appendice A, allegato 1 [7]

Sottosistemi di utilizzazione	H	C	W
Distribuzione idronica	0,81	0,81	0,70
Distribuzione aerea	0,83	0,83	-
Distribuzione mista	0,82	0,82	-

Tabella 6. Efficienze medie dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi Heating (H), Cooling (C) e ACS (W) e per la produzione di energia elettrica in situ, tratte dall'Appendice A, allegato 1 [7].

Sottosistemi di generazione	H	C	W	En. elettrica
Generatore a combustibile liquido	0,82	-	0,80	-
Generatore a combustibile gassoso	0,95	-	0,85	-
Generatore a combustibile solido	0,72	-	0,70	-
Generatore a biomassa solida	0,72	-	0,65	-
Generatore a biomassa liquida	0,82	-	0,75	-
Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3,00	(*)	2,50	-
Macchina frigorifera a compressione di vapore con motore elettrico	-	2,50	-	-
Pompa di calore ad assorbimento	1,20	(*)	1,10	-
Macchina frigorifera a fiamma indiretta	-	0,60*η _{gn} (**)	-	-
Macchina frigorifera a fiamma diretta	-	0,60	-	-
Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico	1,15	-	1,05	-
Cogeneratore	0,60	-	0,60	0,20
Riscaldamento con resistenza elettrica	1,00	-	-	-
Teleriscaldamento	0,97	-	-	-
Teleraffrescamento	-	0,97	-	-
Solare termico	0,3	-	0,3	-
Solare fotovoltaico	-	-	-	0,1
Mini eolico e mini idroelettrico	-	-	-	(**)
Nota: Per i combustibili tutti i dati fanno riferimento al potere calorifico inferiore (*) Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento si considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia (**) Si assume l'efficienza media del sistema installato nell'edificio reale				

Con “edificio di riferimento” si intende un edificio identico a quello in esame in termini di geometria orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d’uso, situazione al contorno, e con caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati (Appendice A, Allegato 1, Cap 3). Per tutti i dati di input e i parametri non definiti vengono utilizzati i valori dell’edificio reale [7].

Sempre il D.M. 26/06/2015 prevede che gli edifici vengano classificati a partire dal confronto con il valore dell’indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell’edificio di riferimento ($EP_{gl,nren,rif,standard - 2019/21}$), calcolato secondo l’Allegato 1, capitolo 3 dello stesso decreto, e considerando tutti i servizi energetici presenti (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione, e, per edifici non residenziali, illuminazione e movimentazione e trasporti).

Nelle tabelle sono riportati i parametri definiti dalla norma per l’edificio di riferimento:

- trasmittanze termiche di riferimento delle strutture, comprensive di ponti termici, e per i serramenti, comprensive dei cassonetti e di tutto il serramento con vetro e telaio (Tabella 4);
- parametri di impianto con le efficienze medie dei sottosistemi di utilizzazione e di generazione (Tabella 5 e Tabella 6).

Il valore del fattore di trasmissione solare totale g_{gl+sh} per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per il Sud deve essere, invece, inferiore a 0,35.

Per il servizio di illuminazione, il calcolo si effettua secondo la UNI EN 15193 [22] e la UNI/TS 11300-2 [23]; inoltre, si considerano i parametri dell’edificio reale e sistemi di regolazione automatici di Classe B (UNI EN 15232 [24]). Per il servizio di ventilazione meccanica si considerano i parametri dell’edificio reale.

Non esistono, quindi, valori prestazionali fissati e assoluti, ma essi derivano dalle strategie progettuali e tecnologiche scelte per ogni edificio analizzato.

Infine, si procede alla verifica degli obblighi di copertura delle fonti rinnovabili secondo quanto previsto dall’allegato 3, par.1, lettera c, del DLgs 3 marzo 2011 n. 28 [8], che impone una produzione di energia elettrica tramite impianti da fonti rinnovabili installati sopra o all’interno dell’edificio con una potenza pari a:

$$P = 1k \cdot S \quad [kW] \quad (Eq.1)$$

dove:

S è la superficie in pianta dell’edificio al livello del terreno, misurata in m^2 ;

K è un coefficiente che assume il valore $K = 50 \text{ m}^2/kW$ se la richiesta del titolo abilitativo è presentata a partire dal 1° gennaio 2017.

In fase di determinazione dei requisiti costruttivi prescritti dal decreto, gli impianti di produzione dell’energia sono gli stessi dell’edificio reale, tali da rispettare i requisiti minimi ma con la possibilità di effettuare le scelte più opportune.

Per classificare l’edificio, invece, si utilizzerà l’indice $EP_{gl,nren,rif,standard (2019/21)}$, in cui, invece, si considerano per l’edificio di riferimento gli impianti standard come da norma, escludendo quelli da fonti rinnovabili che invece devono essere presenti nell’edificio reale.

Per l’attribuzione della classe energetica degli edifici l’indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell’edificio reale ($EP_{gl,nren}$) si confronta con la scala di classi individuate in base all’ $EP_{gl,nren,rif,standard}$ come da norma.

Si procede, quindi, al calcolo di tutti i parametri relativi ad involucro e sistemi impiantistici, in base alla dotazione dell’edificio analizzato, sia per l’edificio reale che per quello standard e alle successive verifiche di confronto tra i due (Tabella 7).

Tabella 7. Verifiche per gli edifici nZEB. Fonti [7] e [9]

Parametri del Fabbricato					
			Edificio Reale		Edificio di Riferimento
H'_T	coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente	W/m^2K	H'_T	$<$	$H'_{T,rif}$
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	area solare equivalente estiva per unità di superficie utile	$[-]$	$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	$<$	$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$
g_{gl+sh}	Fattore di trasmissione solare totale	$[-]$	g_{gl+sh}	$<$	$g_{gl+sh,lim}$
Efficienze Sistemi impiantistici					
			Edificio Reale		Edificio di Riferimento
h_H	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione invernale	$[-]$	h_H	$>$	$h_{H,lim}$
h_W	efficienza media stagionale dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria	$[-]$	h_W	$>$	$h_{W,lim}$
h_C	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione estiva	$[-]$	h_C	$>$	$h_{C,lim}$
Indici di Prestazione Energetica					
			Edificio Reale		Edificio di Riferimento
$EP_{H,nd}$	indice di prestazione termica utile per riscaldamento	kWh/m^2	$EP_{H,nd}$	$<$	$EP_{H,nd,lim}$
$EP_{C,nd}$	indice di prestazione termica utile per raffrescamento	kWh/m^2	$EP_{C,nd}$	$<$	$EP_{H,nd,lim}$
$EP_{gl,tot} = EP_H + EP_W + EP_V + EP_C$	Indice di prestazione energetica globale dell'edificio. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot")	kWh/m^2	$EP_{gl,tot}$	$<$	$EP_{gl,tot,lim}$

4 Le criticità degli edifici a energia quasi zero

L'analisi del quadro normativo e contestuale degli nZEB evidenzia come siano presenti delle criticità ad oggi sia a livello europeo sia a livello nazionale italiano.

Come già messo in risalto nello scorso triennio della ricerca di sistema [9], a livello europeo è evidente la disomogeneità delle metodologie di valutazione e di calcolo adottate dagli Stati Membri, liberi di recepire la direttiva EPBD in maniera flessibile e adattabile alle esigenze locali.

Sebbene il presupposto sia quanto mai adeguato, data la diversità dei contesti di riferimento, ciò ha comunque portato a grandi discrepanze sia in termini di definizioni sia in termini di indicatori relativi alla prestazione energetica degli edifici nZEB.

Per quanto riguarda il primo aspetto, spesso si ritrovano definizioni vaghe e non quantitativamente definibili, che portano a vincolare la definizione degli edifici nZEB a sistemi di classificazione in cui viene riconosciuta soltanto la classe più alta (dalla A in poi), in un approccio alquanto semplicistico. Anche la quota di energia rinnovabile non è univocamente definita e molto spesso è definita in termini qualitativi e non quantitativi.

La tipologia di edifici considerata non sempre distingue tra edifici nuovi ed esistenti con tutti i problemi che ne derivano, dati i vincoli che inevitabilmente sorgono per quanto riguarda la seconda categoria. Nel patrimonio esistente risulta, infatti, difficilissimo raggiungere gli standard prescritti a meno di non sacrificare e rinnovare totalmente con interventi pesantissimi l'edificio, situazione oltretutto non sempre perseguibile.

In termini di indicatori si è visto come la molteplicità di aspetti considerati (energia primaria, emissioni di CO₂, energia da fonti rinnovabili) sia tutt'altro che trascurabile se si aspira ad una classificazione comune a livello europeo, soprattutto nell'ottica di raggiungimento di obiettivi comuni di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni.

Si nota bene che, se non esistono modalità univoche di calcolo di tali indicatori, pur tenendo conto dei differenti contesti climatici e nazionali, non si potrà procedere ad un confronto delle situazioni raggiunte tra i vari Paesi e conseguentemente non sarà facile fissare dei margini di azione comune.

A livello nazionale italiano la situazione è altrettanto complessa. La normativa italiana si presenta alquanto restrittiva soprattutto per la quota rinnovabile richiesta e per la tipologia di bilancio determinato su periodo mensile e non annuale.

Le stringenti verifiche di calcolo portano spesso a difficoltà oggettive nel raggiungimento dei requisiti previsti dal D.M. 26/06/2015 [7], che, tra gli altri aspetti, sembra non distinguere nella pratica gli edifici nuovi da quelli esistenti sottoposti a riqualificazione profonda, con conseguente difficoltà se non impossibilità nel raggiungere la classificazione nZEB.

Altro punto sostanziale riguarda la produzione di energia da fonti rinnovabili: oltre ad essere previste in percentuale elevata, come definita dal D. Lgs. 28/2011, tutto il surplus eventuale di energia prodotta, che eccede il fabbisogno, non è conteggiato ai fini del bilancio energetico e soprattutto è vincolato al periodo di riferimento mensile, determinando un sostanziale sottoutilizzo dell'energia stessa ai fini del calcolo e un requisito ancor più stringente per raggiungere lo standard nZEB.

Infine, non è scontato che un edificio nZEB abbia un indice di prestazione energetica globale basso, nonostante l'elevata efficienza di tutti i sottosistemi che lo compongono.

Per quanto riguarda la situazione reale di mercato, è stato stimato che in tutte le regioni di Italia si sta verificando un incremento di nZEB, il numero dei quali ammontava nell'estate 2018 a circa 1400 edifici, perlopiù di nuova costruzione (90%) e ad uso residenziale (85%) [25]. Gli edifici nZEB non residenziali mostrano comunque una tendenza crescente, grazie anche alle politiche di incentivazione per gli edifici pubblici attualmente in atto. È prevista, inoltre, nel 2020, la ristrutturazione a livello nZEB di oltre centotrenta edifici pubblici, prevalentemente non residenziali.

Tuttavia, la percentuale di nZEB rispetto al parco di edifici esistenti non eccede lo 0,03% su base regionale e meno del 10% del totale nZEB sono gli edifici esistenti riqualificati per il raggiungimento di tale standard, principalmente piccoli edifici mono o bifamiliari e scuole[25]. Altra criticità riguarda l'adozione di un set ridotto di tecnologie per l'ottenimento di tale standard che molto spesso prescinde dalla zona climatica in cui gli edifici sono collocati (elevato isolamento di involucro, pompe di calore elettriche/caldaie a condensazione, impianti fotovoltaici e solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria). Sul mercato, invece, è possibile trovare differenti tipologie di impianti alimentati da fonti rinnovabili, quali pompe di calore elettriche o a gas, caldaie o cogeneratori a biomassa, micro/mini impianti eolici, solar cooling, sistemi solari termici e fotovoltaici, e la scelta della soluzione più idonea dipende fortemente dal sito, dalle condizioni climatiche e dalla reperibilità e accessibilità delle risorse energetiche. Ancor più complesso è il caso delle ristrutturazioni dove si è spesso vincolati nella scelta delle soluzioni adottabili.

Tutte le considerazioni fatte mettono in evidenza come molto ci sia da fare per aspirare ad un parco edilizio con standard di efficienza elevatissima e pone di fronte a domande inevitabili nell'ambito del contesto italiano:

- Di quanto si riesce ancora a migliorare la prestazione energetica degli edifici e ad andare oltre la classificazione nZEB?
- È possibile superare gli standard normativi attuali e in che modo?
- Cosa potrebbe significare raggiungere un bilancio energetico superiore a quello nZEB, quindi in direzione "zero energy" (ZEB)?
- È possibile ragionare ancora in termini mensili o è opportuno ragionare in termini annuali per il bilancio di un edificio ad alta efficienza?

Rispondere a tali quesiti comporta una evoluzione e un risvolto sostanziale nelle politiche energetiche anche nell'ottica di raggiungere il target proposto dalle direttive europee e dagli strumenti legislativi connessi.

Il DM 26.06.2015 [7] prevede già al suo interno la possibilità di revisione periodica quinquennale dei propri requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici, alla luce del progresso tecnologico e degli esiti del primo quinquennio di applicazione.

In quest'ottica, non solo è necessario implementare le politiche e le strategie volte all'incremento del numero di edifici ad altissima prestazione energetica ma anche già da ora guardare al futuro e agli obiettivi raggiungibili con le tecnologie consolidate e avanzate presenti sul mercato, al fine di ridurre sia il consumo energetico, sia le emissioni di biossido di carbonio.

Da tutto questo nasce la necessità di indagare nuove prospettive di superamento degli standard nZEB e, quindi, in direzione Zero Energy Building, andando a definire prima di tutto cosa si intende per ZEB e, in secondo luogo, effettuando una selezione di tutte le strategie e tecnologie che in linea teorica potrebbero portare al raggiungimento di tale obiettivo.

5 Nuove prospettive: verso gli edifici ZEB

5.1 *La necessità di una definizione univoca*

Gli studi presenti nella letteratura di settore sono da anni concordi nel sottolineare che non esiste una definizione univoca di "Edificio Zero Energy", anzi, al contrario, esiste ancora molta confusione in merito.

Come già discusso nel Capitolo 3, la direttiva EPBD definisce gli edifici "nearly zero energy" come edifici ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno, molto basso o quasi nullo, dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili prodotte in sito o in prossimità di esso [14].

Le espressioni "altissima prestazione energetica" e "misura molto significativa" della copertura del fabbisogno da energia da fonti rinnovabili, come si è visto, non sono facili da quantificare e sono state interpretate diversamente dai Paesi membri, così come l'estensione del sistema da considerare (se soltanto l'edificio o anche la sua prossimità) rispetto alla produzione delle fonti rinnovabili in loco.

Se si parla di Edifici a Zero Energia o Zero Energy Buildings (ZEBs) in inglese, la situazione risulta altrettanto complessa sin dalla loro stessa individuazione.

Le molteplici definizioni esistenti, infatti, spesso ne evidenziano caratteristiche parziali o descrittive, limitatamente ad alcuni aspetti, ognuno dei quali rappresenta soltanto uno dei molteplici requisiti che uno ZEB deve soddisfare.

Secondo la definizione dell'American Society of Heating Refrigerating Air Engineering (ASHRAE), si considera Zero Energy Building o ZEB un "edificio residenziale o terziario con una richiesta di energia molto esigua e tale da poter essere soddisfatta dalla produzione di energia da fonti rinnovabili in sito" [26;27].

Alla base del concetto di ZEB c'è l'idea che gli edifici debbano soddisfare tutti i fabbisogni di energia attraverso risorse low-cost, accessibili a livello locale, non inquinanti e rinnovabili. In maniera più stringente, uno ZEB genera energia rinnovabile in sito in quantità tale da uguagliare il suo utilizzo annuale di energia.

Si tratta, quindi, di un edificio con un fabbisogno energetico molto basso e interamente coperto, nell'arco di un anno, dall'energia prodotta in sito da fonti energetiche rinnovabili, che si configura, quindi, come un'isola autosufficiente dal punto di vista energetico. In sostanza, uno Zero Energy Building sarà un edificio con standard di involucro e di impianti uguali o superiori a quelli attualmente previsti per gli nZEB, ma con un utilizzo di fonti rinnovabili tale da coprire l'intero bilancio in termini di energia richiesta.

Questa definizione lascia intendere un bilancio continuo fra domanda di energia e produzione locale con fonti rinnovabili. L'edificio in questione risulta, quindi, estremamente complesso in termini di progettazione in quanto deve basarsi sulla propria disponibilità di energia, pur tenendo conto degli eventuali sfasamenti presenti tra la produzione stessa di energia ed il suo utilizzo. È questo, ad esempio, il caso dell'energia solare che ovviamente sarà prodotta in grandi quantità durante l'estate e scarseggerà durante l'inverno, proprio quando il fabbisogno dell'edificio risulta maggiore.

Una buona definizione di ZEB dovrebbe considerare l'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti rinnovabili in sito come due requisiti imprescindibili e validi per tutta la vita dell'edificio, ovviamente monitorandone costantemente le prestazioni al fine di mantenerle elevate per tutto il periodo considerato.

La definizione di ZEB è sicuramente più vincolante rispetto a quella del nearly Zero Energy Building.

Proseguendo nella disamina delle definizioni presenti in letteratura, una delle più importanti definizioni di ZEB è quella dell'US Department of Energy (DOE): si definisce ZEB un edificio energeticamente efficiente dove, sulla base di una fonte di energia, l'energia annuale reale fornita (*delivered energy*) è inferiore o uguale all'energia rinnovabile prodotta in situ ed esportata (*exported energy*) [28].

L'energia considerata (*source energy*) tiene conto dell'energia dell'edificio più l'energia consumata durante i processi di estrazione, produzione e trasporto di fonti fossili come il carbone, il petrolio e il gas naturale, delle perdite di energia che si verificano durante la combustione termica negli impianti di generazione e delle perdite di trasmissione e distribuzione al sito dell'edificio. L'energia dell'edificio è l'energia consumata nell'intorno dell'edificio così come misurata entro i contorni del sito stesso e comprende almeno il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, l'acqua calda sanitaria, l'illuminazione interna ed esterna, i carichi elettrici, l'energia di processo, gli ascensori e tutti i sistemi di trasporto.

I contorni del sito dello ZEB in questione possono coincidere con l'impronta dell'edificio, se le fonti di energia rinnovabile sono prodotte nel o sull'edificio stesso.

La definizione dell'US DOE è simile a quella in uso per i Net Zero Energy Building (NZEB), che risulta meno stringente rispetto a quella di ZEB (Figura 8).

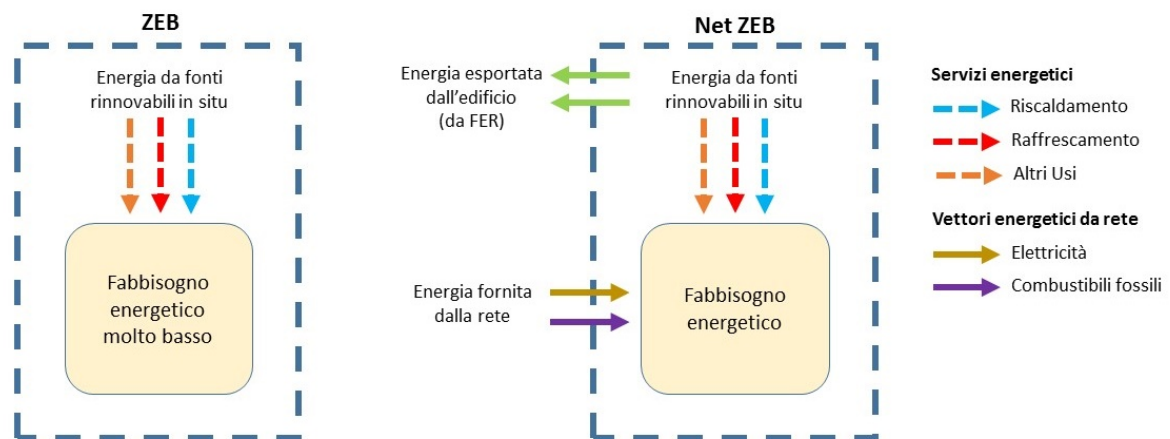


Figura 8. Schematizzazione delle definizioni di ZEB e Net ZEB.

L'edificio Net ZEB presenta "nell'arco di un anno solare la somma algebrica dei flussi energetici in ingresso e in uscita almeno pari a zero" [17]. Si tratta di un equilibrio medio tra flussi energetici entranti e uscenti. In tal modo, per esempio, è possibile riversare in rete la produzione di energia in eccesso e non utilizzata nell'immediato per poi prelevare la stessa quantità di energia alla necessità. Tale concetto è espresso nel cosiddetto edificio "grid connected" e la rete stessa funge da accumulo energetico, opzione attualmente non contemplata nella normativa italiana. Questo potrebbe valere sia in termini giornalieri (produzione di energia durante il giorno e utilizzo durante la sera, per esempio), sia in termini stagionali (produzione di energia durante l'estate e richiesta durante l'inverno), con un bilancio effettuato nel medio periodo su base annua.

Anche per quanto riguarda l'accezione di NetZEB ci sono varie definizioni tra cui Net Zero Site Energy, Net Zero Source Energy, Net Zero Energy Costs e Net Zero Emissions, come discusso da Torcellini et al. [29], di cui si riportano i tratti salienti evidenziati dagli stessi autori e dal lavoro di Wells et al.[30].

Il Net Zero Site Energy building è un edificio in cui, per ogni unità di energia consumata, l'edificio produce esso stesso un'unità di energia nel sito, indipendentemente dall'origine dell'energia stessa. È, quindi, un'ottima definizione, facilmente generalizzabile per gli edifici connessi alla rete, ma ha il limite di non considerare il metodo di generazione dell'energia o la fonte di combustibile utilizzata e quindi tutte le unità

di energia sono equivalenti a prescindere dalla fonte utilizzata. Per esempio un'unità di energia elettrica sarà perfettamente equivalente all'unità di energia di gas naturale utilizzata in situ. Ciò non è auspicabile soprattutto nel panorama attuale che tende a valorizzare l'elettrico e le rinnovabili. Inoltre, questo modello non obbliga all'uso conservativo dell'energia da parte dell'utente finale né prescrive l'efficienza delle apparecchiature e dei dispositivi utilizzati.

Il Net Zero Source Energy produce almeno tanta energia quanta ne utilizza in un anno, tenendo conto dell'origine di questa energia, ossia dell'energia primaria utilizzata anche per produrre e fornire l'energia al sito stesso. Per il calcolo dell'energia totale, importata ed esportata, si deve tener conto di appropriati fattori moltiplicativi per la conversione dal sito alla fonte, oltre ai coefficienti di generazione e trasmissione. Esso tiene conto dell'energia che può essere persa o sprecata durante il processo di generazione, trasmissione e distribuzione. Si tratta di una sottocategoria rispetto al modello precedente in quanto tale modello presuppone che almeno una parte di energia sia prodotta off-site e quindi presuppone che l'edificio non possa essere autosufficiente.

Il Net Zero Emissions Building indica, invece, un edificio che produce la stessa quantità di energia pulita (free-emission) rispetto alla quantità di energia che utilizza, derivante da processi responsabili di emissioni.

Infine, il Net Zero Energy Costs Building implica che la quantità di denaro che il proprietario dell'edificio dovrebbe pagare per la quantità di energia utilizzata durante l'anno proveniente dalla rete sia pari alla quantità di denaro ottenibile dalla produzione di energia esportata. Il proprietario dell'edificio dovrebbe pertanto avere delle bollette pari a zero, evento alquanto raro dato che l'utente generalmente deve pagare una quota legata alla manutenzione e alla connessione alla rete. Il modello non considera né il metodo di generazione dell'energia, né le variazioni dei costi delle utilities.

L'edificio Net ZEB dovrebbe comunque aspirare all'obiettivo di eliminare le emissioni inquinanti durante l'intera fase di esercizio dell'edificio, includendo considerazioni sull'energia off-site e on-site, sull'essere "grid connected" o meno, sul periodo da considerare per il bilancio, se corrispondente a tutto il ciclo di vita o ad un periodo ridotto. In effetti si trascura spesso anche il contributo dell'energia incorporata nell'edificio, richiesta per i materiali utilizzati e le tecnologie rinnovabili, oltre che l'energia utilizzata per le fasi di costruzione, manutenzione e dismissione dell'edificio[30].

A cosa aspirare quindi? Come affermano Wells e altri [30], ZEB e Net ZEB dovrebbero corrispondere ad edifici ad alta efficienza di quarta generazione. La prima generazione è rappresentata infatti dai cosiddetti "green buildings", nati dalla necessità di ridurre gli impatti ambientali e i consumi energetici negli anni Novanta, a seguito dell'introduzione dei protocolli BREEAM e LEED. Di seconda generazione sono considerati da Wells gli edifici nZEB (nearly Zero Energy Buildings) in Europa. Di terza generazione i Net ZEB, con un progressivo aumento dell'utilizzo di fonti rinnovabili, quali ad esempio le tecnologie del fotovoltaico, anche a seguito della riduzione dei costi di installazione e manutenzione.

La quarta generazione, quella a cui anche gli ZEB definiti in questo report si dovrebbero ispirare, è costituita da una serie di requisiti, tra cui importante è la necessità di utilizzare tecnologie di accumulo nell'edificio che permettano di gestire e rispondere alle richieste di energia con modalità innovative che ancora oggi rappresentano la maggiore sfida. Inoltre, fondamentale è la fattibilità economica degli stessi.

La quinta generazione di edifici, sempre secondo Wells [30], qui riportata per completezza, rappresenta un approccio olistico, in quanto considera l'edificio calato nella realtà di quartiere o urbana, in stretta sinergia con la diffusione dei veicoli elettrici e con un supporto politico consistente. Essi devono essere dotati di accumuli di energia in sito, risultare fattibili da un punto di vista economico, tenere in considerazione il cambiamento climatico, implementare tecnologie smart e IoT (Internet of Things). È d'obbligo infine considerare l'energia incorporata, l'uso di energia neutra, libera da emissioni, e in genere tutti quegli accorgimenti che limitano al minimo gli impatti ambientali.

Anche nella definizione di Net Zero Exergy Building (ZEXB)[31] viene considerato l'intorno in quanto si tratta di un edificio che ha la somma dei contributi di exergia annuali pari a zero nel sito considerato e inserito in un sistema energetico di quartiere.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle varie definizioni analizzate di ZEB e Net ZEB, in modo da poter fornire un quadro più schematico e riassuntivo e di immediata consultazione (Tabella 8).

Tabella 8. Tabella riassuntiva delle definizioni di ZEB e Net ZEB analizzate. Rielaborazione ENEA da [19]

Edifici	Acronimo	Definizione	Riferimenti
Zero Energy Building	ZEB	Edificio con una richiesta di energia molto esigua e tale da poter essere soddisfatta dalla produzione di energia da fonti rinnovabili in sito	[27]
Net Zero Energy Building	NZEB	Edificio in cui nell'arco di un anno solare la somma algebrica dei flussi energetici in ingresso e in uscita almeno pari a zero	[27]
Net Zero Site Energy	NZSiEB	Edificio che produce in sito un'unità di energia per ogni unità di energia consumata, indipendentemente dalla fonte utilizzata	[29]
Net Zero Source Energy	NZSoEB	Edificio che produce almeno tanta energia quanta ne utilizza in un anno, tenendo conto della fonte di questa energia, ossia dell'energia primaria utilizzata anche per produrre e fornire l'energia al sito stesso	[29]
Net Zero Energy Costs	NZEC	La quantità di denaro che il proprietario dell'edificio dovrebbe pagare per la quantità di energia utilizzata durante l'anno proveniente dalla rete è pari alla quantità di denaro ottenibile dalla produzione di energia esportata	[29]
Net Zero Emissions Building	NZEmB	Edificio che produce la stessa quantità di energia pulita (free-emission) rispetto alla quantità di energia che utilizza, derivante da processi responsabili di emissioni.	[29]
Net Zero Exergy Building	ZEXB	Edificio che ha la somma dei contributi di exergia annuali pari a zero nel sito considerato e inserito in un sistema energetico di quartiere	[31]
Positive Energy Building	PEB	Edificio che produce energia da FER in eccesso rispetto a quanta ne richiede in un anno	[32;33]

Ai fini di questo report si adotta la definizione più astratta presentata all'inizio del paragrafo e così come definita da ASHRAE, che si riporta nuovamente per facilità di consultazione: si definisce ZEB un "edificio residenziale o terziario con una richiesta di energia molto esigua e tale da poter essere soddisfatta dalla produzione di energia da fonti rinnovabili in sito" [26;27]. Essa si arricchisce delle considerazioni espresse finora e dell'idea di adottare edifici ad alta efficienza di quarta generazione che, come riporta la Figura 9, inglobano aspetti essenziali per il raggiungimento degli obiettivi prefissati dall'Europa in tema di risparmi energetici e riduzione di CO₂.



Figura 9. Edifici ad alta efficienza di quarta generazione. Elaborazione di ENEA da [30].

I futuri ZEB e Net ZEB potrebbero, quindi, incorporare strategie energetiche rigeneranti e resilienti, perfettamente integrate a livello urbano e di quartiere. In tal modo, si può pensare anche a differenti tecnologie da fonti rinnovabili come fotovoltaico, eolico e geotermico, che si prestano ad una applicazione a scala più ampia rispetto a quella di edificio, così come a sistemi di accumuli termici e stagionali che possano portare ad un bilancio tra produzione e domanda, anche nella variabilità e stagionalità delle fonti rinnovabili, attualmente una delle sfide ancora da superare [30].

5.2 L'influenza della scelta di una definizione di ZEB nel processo progettuale e valutativo

Le differenti definizioni di ZEB e Net ZEB influenzano l'intero processo progettuale, in quanto a seconda della definizione adottata si prediligono alcuni aspetti al posto di altri.

Ad esempio, se si vuole raggiungere il target NZEB-site, esso deve produrre tanta energia quanta ne utilizza in sito, prediligendo ad esempio sistemi con impianti fotovoltaici e solare termico.

La Tabella 9 evidenzia come le differenti definizioni di ZEB e Net ZEB influenzano il risultato raggiunto in termini di punti di forza e punti di debolezza dell'edificio e del percorso progettuale che ne consegue, fermo restando che si tratti in ogni caso di edifici ad altissime prestazioni e con basse emissioni di CO₂.

Tabella 9. Punti di forza e di debolezza a seconda delle differenti definizioni adottate.

Edifici	Punti di forza	Punti di debolezza
ZEB	- Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; - Bilancio verificabile attraverso monitoraggi in situ; - Emissioni di CO₂ bassissime o nulle.	- Difficoltà nel raggiungimento del bilancio di energia pari a zero; - Variabilità delle fonti rinnovabili cui si affida; - Necessità di sistemi di accumulo termico ed elettrico; - Necessità di valutazione della fattibilità economica.
NZEB	- Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; - Basse emissioni di CO₂; - Possibilità di riversare l'energia prodotta in rete per compensare quella fornita; - Minore dipendenza dalla variabilità delle fonti rinnovabili utilizzate per produrre energia.	- Difficoltà nel raggiungimento della prestazione energetica richiesta; - Necessità di attacco alla rete per compensare i carichi di picco; - Necessità di valutazione della fattibilità economica.

Edifici	Punti di forza	Punti di debolezza
NZSiEB	– Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; – Basse emissioni di CO₂; – Possibilità di riversare l'energia prodotta in rete per compensare quella fornita; – Indipendenza dalla variabilità delle fonti rinnovabili utilizzate per produrre energia.	– Difficoltà nel raggiungimento della prestazione energetica richiesta; – Necessità di valutazione della fattibilità economica; – Mancata valutazione delle differenti fonti utilizzate.
NZSoEB	– Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; – Basse emissioni di CO₂; – Possibilità di riversare l'energia prodotta in rete per compensare quella fornita; – Indipendenza dalla variabilità delle fonti rinnovabili utilizzate per produrre energia; – Considerazione del processo di generazione, trasmissione e distribuzione.	– Difficoltà nel raggiungimento della prestazione energetica richiesta; – Necessità di valutazione della fattibilità economica; – Presuppone che l'edificio non possa essere autosufficiente; – È richiesta almeno una quota parte di energia off-site.
NZEC	– Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; – Possibilità di riversare l'energia prodotta in rete per compensare quella fornita; – Minore dipendenza dalla variabilità delle fonti rinnovabili utilizzate per produrre energia; – Rientro economico verificabile dalle bollette.	– Difficoltà nel raggiungimento della prestazione energetica richiesta; – Necessità di monitoraggio per l'energia esportata; – Necessità di una domanda di energia extra da parte della rete; – Necessità di confrontarsi con il limite di capacità della rete.
NZEm	– Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; – Compensazione delle Emissioni di CO₂; – Miglior modello per il raggiungimento degli obiettivi imposti dall'Europa.	– Difficoltà nel raggiungimento della prestazione energetica richiesta; – Necessità di valutazione della fattibilità economica; – Necessità di indicatori precisi di quantificazione delle emissioni.
ZEXB	– Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; – Considerazione dell'exergia del sistema, svincolandosi dal bilancio energetico in senso più stretto; – Considerazione della qualità dell'energia utilizzata; – Considerazione dell'intorno e non del sito ristretto.	– Difficoltà nel raggiungimento della prestazione energetica richiesta; – Necessità di valutazione della fattibilità economica; – Difficoltà nella valutazione dell'exergia, concetto meno immediato di quello di energia e non quantificabile con un parametro facilmente calcolabile.
PEB	– Alte prestazioni in termini di strategie passive ed efficienza energetica; – Bassissime emissioni di CO₂; – Eccesso di energia prodotta da riversare in rete.	– Difficoltà nel raggiungimento della prestazione energetica richiesta; – Necessità di valutazione della fattibilità economica; – Necessità di confrontarsi con il limite di capacità della rete.

La valutazione di un edificio di ZEB o Net ZEB dipende, quindi, da come viene trattata una serie di aspetti molteplici e variegati che possono essere riassunti nel seguente modo, come suggerito da [34]:

- *La quantificazione del bilancio dell'energia:* l'unità di misura applicata dipende dalla metodologia utilizzata e dal fattore preponderante considerato (energia primaria, emissioni equivalenti di CO₂, exergia, costo dell'energia, ecc.). L'indicatore utilizzato dovrebbe poter descrivere al meglio l'edificio e la quantità e la qualità dell'energia, se si vuole valutare l'impatto dell'edificio sull'ambiente [31].
- *Il periodo di bilancio:* il periodo considerato può variare dall'intero ciclo di vita dell'edificio al periodo di utilizzo, quindi di esercizio, o più comunemente viene utilizzato un bilancio annuale, stagionale o mensile. Il più utilizzato è quello annuale, anche se sarebbe auspicabile estenderlo all'intero ciclo di vita, includendo non solo la fase di esercizio dell'edificio stesso, ma anche l'energia incorporata nei materiali, nelle fasi di costruzione e di demolizione e, quindi, valutare verosimilmente l'impatto ambientale dell'edificio nella sua totalità.
- *La tipologia di utilizzo dell'energia:* riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, acqua calda sanitaria, illuminazione e trasporti.
- *La tipologia di bilancio:* deve considerare l'utilizzo di energia e la generazione da fonti rinnovabili di energia o, in alternativa, l'energia fornita all'edificio e quella immessa in rete. Durante la fase di progetto dell'edificio è fondamentale capire come coprire il fabbisogno di energia con l'utilizzo di fonti rinnovabili. Il secondo tipo di bilancio risulta utile e si può monitorare, invece, soprattutto durante la fase di esercizio. Negli ZEB off-grid l'uso di energia deve essere assolto unicamente attraverso fonti rinnovabili.
- *Le fonti di energia rinnovabile:* in sito (come il sole o il vento) o al di fuori e da trasportare (come le biomasse), questione che sarà approfondita nel par. 8.3
- *Connessione o meno alla rete:* l'edificio ad alta efficienza *off-grid* non è connesso ad alcuna rete e necessita di un sistema di accumulo e immagazzinamento dell'energia per compensare i carichi di picco. Tale edificio viene definito "autonomous", "self-sufficient" o "stand-alone". L'edificio connesso alla rete, ossia il "grid-connected" o "grid integrated" [35,36,37,38,39,40], si allaccia, invece, ad una o più infrastrutture energetiche: rete elettrica, distretti di sistemi di riscaldamento o raffrescamento, rete del gas, reti di distribuzione di biomassa e biocombustibili. Esso dovrebbe avere, pertanto, la possibilità di acquistare energia dalla rete e, allo stesso tempo, alimentarla con l'energia prodotta in eccesso, evitando il problema dell'immagazzinamento dell'elettricità in sito. Si tratta quest'ultima di una questione complessa e molto attuale. La difficoltà è quella di avere una grande capacità di immagazzinamento dell'energia; essere dotati di generatori di backup; eliminare le perdite di energia connesse all'immagazzinamento o alla conversione; studiare la questione del sovradimensionamento di sistemi per la produzione di energia rinnovabile. Non è un caso che tutte queste questioni irrisolte abbiano portato a preferire, anche nella pratica, modelli *grid-connected* agli ZEB autosufficienti.
- *Le prestazioni dell'edificio:* sicuramente andranno valutate in termini di efficienza energetica, condizioni microclimatiche interne e comfort. Punto chiave di riflessione è che i fabbisogni energetici dell'edificio devono essere soddisfatti prima di tutto attraverso misure di efficientamento energetico, che interessino l'intero sistema edificio-impianto, e la produzione di energia da fonti rinnovabili. Ancora poca attenzione si presta alla questione del comfort indoor, pur essendo essenziale per garantire le condizioni ottimali di illuminazione, ricambio e qualità dell'aria interna, salubrità dei materiali e parametri microclimatici ottimali. Le interazioni con la rete sono trascurate, anche se è importante valutare l'edificio nella sua complessità e quindi anche nella connessione alla rete.

6 Cenni per una progettazione di edifici in direzione zero energy ed aspetti economici connessi

Per tutte le implicazioni viste nei capitoli precedenti e scendendo nel dettaglio al fine di fornire delle indicazioni per la progettazione di edifici ad alta efficienza in direzione ZEB o Net ZEB, è imprescindibile partire da alcuni principi basilari:

- i fabbisogni di energia termica ed elettrica devono essere ridotti il più ragionevolmente possibile, attraverso una progettazione attenta e accurata dell'involucro, dell'isolamento, dell'illuminazione naturale, della massa termica;
- i sistemi impiantistici devono essere altamente efficienti ed allo stesso tempo economicamente fattibili;
- i fabbisogni termici ed elettrici per usi energetici devono essere coperti quanto più possibile da energia prodotta in sito da fonti rinnovabili.

Come si nota, la prima strategia è quella di minimizzare l'utilizzo di energia per ottenere bassi fabbisogni energetici e incrementare il comfort degli occupanti, mantenendo temperature favorevoli e livelli di illuminazione naturale soddisfacenti.

Il raggiungimento di un buon livello di comfort indoor in tutte le stagioni, sia nei mesi invernali che in quelli estivi, è un requisito fondamentale che deve essere raggiunto e assicurato anche grazie ad un involucro edilizio ben progettato, realizzato in modo tale che risponda in maniera ottimale alle condizioni climatiche esterne e che consenta, associando il necessario ricorso all'uso di energie rinnovabili, di minimizzare i costi di gestione e conduzione dell'immobile. Le scelte progettuali, guidate dai quadri normativi locali sull'efficienza energetica, devono essere pertanto finalizzate all'ottenimento dell'equilibrio tra fabbisogno energetico e livelli di comfort interno, mediante l'impiego delle soluzioni tecnologiche più idonee alle specifiche esigenze e circostanze.

Se la riduzione del fabbisogno energetico di un edificio costituisce il primo passo essenziale per raggiungere l'obiettivo ZEB, il secondo sarà provvedere a colmare le basse esigenze energetiche mediante l'impiego di fonti rinnovabili [41].

In letteratura sono state spesso discusse e analizzate le principali strategie cui poter fare ricorso nella progettazione di un edificio ZEB.

Dal momento che la necessità di contenere i consumi è nata come esigenza in climi particolarmente rigidi, dove il riscaldamento nel periodo invernale rappresenta la vera criticità, la letteratura spesso riporta come primo step nella progettazione l'obiettivo di riduzione dei consumi di energia limitando la quantità di apporti e perdite di calore, il che si traduce comunemente in un approccio bioclimatico e in un adeguato isolamento termico.



Figura 10. Strategia di progettazione gerarchica. Fonte: rielaborazione ENEA

In secondo luogo, per far fronte alle esigenze di utilizzo di energia che non possono essere minimizzate si dovrà far ricorso all'utilizzo di energia rinnovabile mediante integrazione di opportune tecnologie innovative. È possibile semplificare immaginando una progettazione ottimizzata che preveda di affrontare in primis, in maniera gerarchica e congruente (Figura 10), la minimizzazione dei carichi termici e una progettazione ragionata con utilizzo di strategie "passive", implementazione di servizi efficienti ed integrazione di fonti energetiche rinnovabili. [30]

È facile comprendere che non esiste una soluzione unica, ma sicuramente si può delineare un approccio, una strategia, che possa essere valido in ogni circostanza. Non a caso l'Unione Europea, come precisato in questo report, non dà indicazioni precise in merito a quali siano le norme a cui riferirsi affinché un edificio possa considerarsi un edificio a zero energia.

Di fondamentale importanza sarà l'adeguamento delle strategie di progettazione più generali alle specificità del caso.

In particolare, un approccio *climate responsive* è necessario per poter rispondere all'esigenza di calore in inverno e fresco in estate individuando le giuste caratteristiche dell'isolamento degli elementi opachi e trasparenti, studiando anche l'ombreggiamento e le soluzioni per schermare l'edificio. Il "climate responsive design" presuppone, infatti, una strategia di progettazione ragionata in cui forma e struttura moderano il clima indoor per il comfort e il benessere umano, attraverso l'estensione dei principi di progettazione bioclimatica della forma e del design dell'involucro agli elementi strutturali e architettonici (che attivamente raccolgono potenziali flussi di energia), la minimizzazione dei consumi e lo sfruttamento del potenziale delle risorse energetiche naturali nell'ambiente costruito [42;43].

Per la progettazione di edifici ZEB o Net ZEB è, pertanto, imprescindibile la conoscenza di tutte le strategie passive [44] da valutare a monte e che, con un costo minimo o nullo, potrebbero consentire l'abbattimento del fabbisogno energetico del sistema edificio e migliorare il comfort interno.

La forma e l'orientamento dell'edificio sono sicuramente elementi che condizionano la prestazione energetica. La forma della struttura esterna di un edificio non ha solo valenza strutturale o estetica, ma anche energetica. Infatti, tanto più elevata è la superficie che racchiude il volume riscaldato dell'edificio, tanto maggiore sarà la dispersione termica. Inoltre, in contesti con climi rigidi sono da prediligere edifici compatti. In contesti con climi caldo-umidi, dove la stagione è più severa, sono più opportune forme capaci di creare zone ombreggiate in grado di favorire la ventilazione naturale e di limitare il surriscaldamento dell'involucro e degli ambienti interni, mentre per climi caldo-secchi sono preferibili edifici compatti ma dotati di corte interna ombreggiata per facilitare l'illuminazione e la ventilazione degli ambienti (Figura 11). Questi aspetti si possono valutare con l'indice S/V, cioè il rapporto tra la superficie disperdente e il volume lordo costituente l'edificio: più il valore è alto, maggiore è la penetrazione e la comunicazione tra edificio e ambiente esterno.

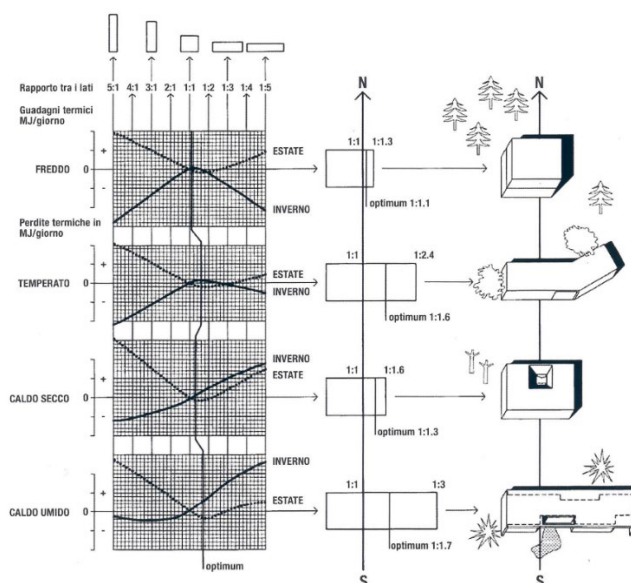


Figura 11. Rapporti ottimali tra i lati per quattro differenti zone climatiche [45]

Casi studio presenti in letteratura, che analizzano soluzioni per il raggiungimento dei requisiti di edifici ad alta efficienza, evidenziano come, nelle regioni più fredde, gli edifici debbano essere generalmente progettati con fattori di forma bassi per essere il più compatti possibili, mirando all'ottimizzazione dei flussi termici.

Nelle regioni calde per gestire il rischio di surriscaldamento è invece essenziale porre attenzione all'orientamento ed all'opportuno rapporto superficie trasparente/superficie opaca [46]. La tendenza comune nei casi studio è quella di ridurre il rapporto superficie trasparente/superficie opaca minimizzando i guadagni solari e impostando valori inferiori a 0,50.

L'orientamento dell'edificio dovrebbe essere progettato in funzione della capacità di captazione dell'energia solare, cioè di raccogliere la radiazione solare in inverno e di offrire poca superficie esposta ai raggi solari in estate. Per orientamento non si intende solo la disposizione in base all'asse elioterminico, ma anche la valutazione dei venti dominanti e l'influenza del microclima dei fattori ambientali esterni: aree verdi, soleggiamento/ombreggiamento portato da altri edifici o da elementi naturali ecc.

Rispetto agli edifici ZEB situati in climi freddi che puntano all'ottimizzazione del fabbisogno energetico invernale, la progettazione di edifici in climi mediterranei va integrata con ulteriori accorgimenti per il raffrescamento passivo, quali la creazione di spazi a differente temperatura per favorire la ventilazione naturale, la riduzione della captazione solare, la schermatura delle chiusure trasparenti, il controllo dell'inerzia termica degli ambienti, lo studio dello sfasamento e dell'attenuazione dell'onda termica dovuto alle chiusure opache (per attenuare i picchi di potenza richiesti all'impianto di climatizzazione e per favorire il raffrescamento e lo smaltimento di calore tramite ventilazione notturna degli ambienti, pur prestando attenzione ai livelli di illuminazione naturale). Infatti, la sola adozione in aree climatiche mediterranee di soluzioni super-isolanti con pacchetti di bassa trasmittanza termica e basso peso specifico, e, quindi, con limitata massa di accumulo, riduce l'inerzia termica del sistema. Inoltre, se d'inverno garantisce una riduzione del trasferimento di calore dall'interno verso l'esterno, nel periodo estivo un requisito fondamentale è la capacità delle chiusure, di smaltire verso l'esterno, nelle ore notturne, il carico termico accumulato durante la giornata.

Se in un clima rigido una corretta progettazione dell'involucro, allo scopo di ottenere prestazioni termiche molto elevate per elementi sia opachi che trasparenti, è una condizione essenziale per soddisfare i requisiti ZEB, in un clima caldo, invece, il ruolo dell'isolante può essere in taluni casi ridiscusso in funzione di condizioni microclimatiche: studi in letteratura riportano come vantaggioso un livello di isolamento nullo o basso laddove sia rilevante l'escursione termica tra il giorno e la notte [47]. Nei climi miti il controllo della radiazione solare attraverso componenti trasparenti consente lo sfruttamento ottimale dell'effetto degli apporti solari e garantisce un buon livello di comfort interno, massimizzandoli in inverno e minimizzandoli in estate.

Altro aspetto essenziale da considerare consiste nel fatto che un edificio ZEB in un'area climaticamente più fredda si differenzierà significativamente da uno ZEB localizzato in zone più calde, dato che il raffrescamento e il riscaldamento rappresentano due degli usi prevalenti di energia. L'edificio deve essere, quindi, appositamente progettato tenendo conto dei fattori climatici e ambientali locali.

Le strategie impiantistiche e l'integrazione con fonti rinnovabili devono essere adottate valutando attentamente le peculiarità dell'involucro progettato e le condizioni climatiche locali.

Allo stesso modo, si dovrà pensare inevitabilmente a come si potrebbe sfruttare l'abilità, dell'edificio ottenuto, di produrre eventualmente energia in eccesso e in particolare di energia pulita per pensare di convogliare energia nella rete o utilizzare sistemi di accumulo che la rendano, al momento dell'occorrenza, a disposizione dell'edificio stesso, slegandolo dal problema dell'incostanza di fornitura di energia, dovuta alla natura variabile delle fonti rinnovabili.

Da tutti questi presupposti si evince come sia possibile, in conclusione, definire una "triade energetica" [30] di principi base di progettazione che devono essere rispettati in direzione ZEB e che comprendono:

- criteri di progettazione passiva per ridurre il fabbisogno di energia associato a riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e altri utilizzi;
- principi di progettazione attiva per implementare sistemi di efficienza energetica;

- implementazione di sistemi di produzione dell'energia da fonti rinnovabili.

Il tutto non può prescindere da un'analisi di fattibilità economica.

Ad essa si può eventualmente affiancare anche un'analisi di "cost-optimality" delle soluzioni. Il concetto di "cost-optimal" [48] è stato introdotto nell'EPBD e rende necessario definire dei livelli di requisiti di prestazione energetica minima, così come inseriti nel Regolamento n. 244/2012 [49]. Il livello cost-optimal è definito come "il livello di prestazione energetico che porta al più basso costo durante il ciclo di vita economico stimato". La metodologia cost-optimal influenza la scelta delle misure di efficienza energetica per ridurre i consumi di energia primaria in quanto nello stesso tempo tali soluzioni devono essere anche quelle più economicamente vantaggiose [50,51,52]. Inoltre, è resa estremamente complessa dalla molteplicità di tipologie di edifici presenti e dalle differenti condizioni climatiche che comportano la scelta di diverse soluzioni difficilmente generalizzabili. Ovviamente tale metodologia si complica ancor di più per la situazione estremamente variegata delle tipologie edilizie e delle condizioni climatiche presenti in Europa, tanto che diversi sono i livelli e i pacchetti delle misure energetiche che possono essere applicate [53].

Secondo lo studio di Boemi [54] un tempo di ritorno tipico in termini di risparmio monetario per le tecnologie utilizzate in edifici ad altissima efficienza va dai 7 ai 23 anni. Tuttavia, si tratta di un tema ancor poco discusso soprattutto se visto dal punto di vista della vendibilità, dei target di mercato, delle risorse, tutti aspetti che concorrono al valore economico di un edificio. Inoltre, i consumatori sono spesso disincentivati alla realizzazione di edifici così ad alta efficienza energetica (anche se costretti per obblighi normativi) a causa degli elevatissimi costi iniziali [30].

Tuttavia, anche la fattibilità di un edificio ZEB o Net ZEB dovrebbe essere valutata non soltanto in termini economici, che spesso scoraggiano se inseriti esclusivamente nell'ottica di mercato, ma anche in termini ambientali.

In ultima analisi, uno ZEB dovrebbe essere progettato come "climate-sensitive buildings", per tener conto del cambiamento climatico. In un'ottica di valutazione quantitativa di tale aspetto, tale scopo potrebbe essere perseguibile, attraverso simulazioni multi-annuali, utilizzando il cosiddetto metodo "morphing" [55]. Attraverso di esso si potrebbero, quindi, generare profili di dati climatici utili alla valutazione della prestazione energetica degli edifici di nuova costruzione (Figura 12), ottenendo, in maniera predittiva, il comportamento applicato a tipici anni di riferimento (*horizon years*) rappresentativi del clima futuro, come ad esempio il 2030 e il 2050, in accordo con le politiche energetiche promosse dall'Unione Europea.

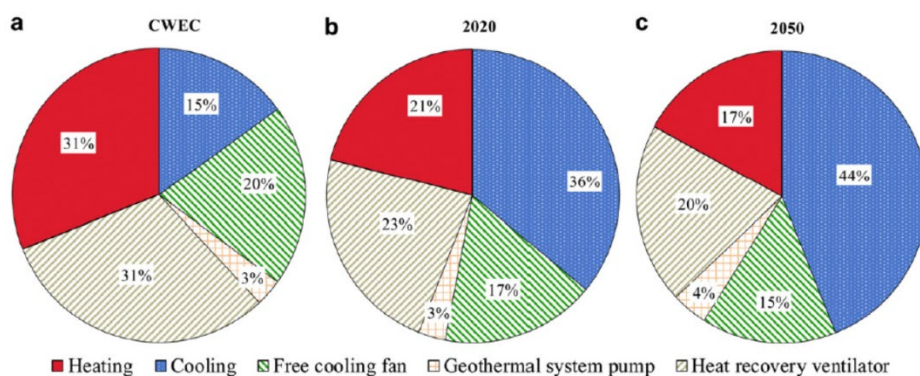


Figura 12. Esempio di analisi del consumo energetico di un edificio nell'anno corrente dello studio e proiettata al 2020 e al 2050. Fonte: [55]

È fondamentale, quindi, per i risvolti futuri della ricerca tenere conto anche del cambiamento climatico e sociale per prevenire e predire le richieste future di energia. Presupposto fondamentale è che tutti i nuovi edifici dovranno integrare e ottimizzare tutti gli elementi che possono contribuire al raggiungimento di un'elevata prestazione energetica (efficienza energetica, durabilità, mantenimento della prestazione durante l'intero ciclo di vita, comfort per gli utenti).

7 Tecnologie di involucro per edifici in direzione ZEB

Dalle riflessioni emerse dal capitolo 6, Si evince come la definizione di un involucro energeticamente efficace, oltre che efficiente, è un punto di partenza essenziale, perché da esso dipende, in maniera importante, il comportamento energetico dell'edificio. Come elemento di frontiera tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno, l'involucro non ha solo una funzione disperdente, ma è un elemento dinamico che deve possedere caratteristiche prestazionali in grado di garantire adeguate condizioni di comfort abitativo.

Tuttavia, è interessante notare che a livello di prestazione globale, il contributo dei soli materiali per l'isolamento termico è quello che ha maggior peso ponderale nel bilancio termico dell'edificio (banalmente anche per la superficie che occupano); è quindi normale che la necessità di minimizzare l'utilizzo di energia e di individuare soluzioni più efficienti dal punto di vista energetico abbia alimentato, negli ultimi decenni, da un lato il consolidamento di soluzioni tradizionali, ormai impiegate a pieno regime nel patrimonio edilizio attuale, dall'altro la ricerca di soluzioni creative e di scelte intelligenti ed innovative riguardanti l'impiego di materiali per l'isolamento termico.

Pertanto, la trattazione che segue cerca di offrire una panoramica di tutte le tecnologie di involucro impiegabili nell'ottica di un edificio progettato in direzione ZEB, offrendo un quadro d'insieme che possa essere utile a fornire indicazioni su quelle ritenute più idonee ed efficienti.

7.1 Tecnologie di involucro tradizionali

Come si è visto, nel Decreto Requisiti Minimi (Appendice A) [7] per il raggiungimento dei requisiti nZEB è richiesta la verifica di una serie di parametri relativi al fabbricato.

Relativamente ai primi è richiesta la verifica del coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente H_T e dell'area solare equivalente estiva per unità di superficie $A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$, nonché il rispetto dei valori di trasmittanza termica U dei singoli componenti d'involucro rispetto a quelli dell'edificio di riferimento, già precedentemente riportati (Tabella 4, par. 3.2). Inoltre sulle strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno si procede in conformità alla UNI EN ISO 13788 [56] alla verifica dell'assenza:

- di rischio di formazione muffe, con particolare attenzione ai ponti termici;
- di condensazioni interstiziali.

Nel D.M. 26.06.2015 è prescritto altresì quanto segue: "Per le strutture di copertura degli edifici è obbligatoria la verifica dell'efficacia, in termini di rapporto costi-benefici, dell'utilizzo di:

- materiali a elevata riflettanza solare per le coperture (cool roof), assumendo per questi ultimi un valore di riflettanza solare non inferiore a
 - 0,65 nel caso di coperture piane,
 - 0,30 nel caso di coperture a falde;
- Tecnologie di climatizzazione passiva (a titolo esemplificativo e non esaustivo: ventilazione, coperture a verde)".

Da sottolineare che l'obbligo riguarda la valutazione dell'efficacia in termini di rapporto costi-benefici, non l'utilizzo dei materiali in sé.

Nell'individuare le soluzioni tecnologiche tradizionali di involucro più performanti da adottare in ottica ZEB bisogna quindi tener conto del rispetto di tali requisiti.

Fatta questa premessa, al fine di illustrare le possibili soluzioni tecnologiche da adottare in ottica ZEB, occorre fare alcune considerazioni, derivanti dallo studio della letteratura scientifica e di settore. Il progetto "Keep Cool" [57] fu uno dei primi strumenti ad evidenziare quanto l'utilizzo di involucri edilizi massivi, o meglio "capacitivi", cioè costituiti da materiali ad elevata capacità termica, consenta nei Paesi dal clima mediterraneo il raggiungimento del cosiddetto "sustainable summer comfort", cioè il raggiungimento di buone condizioni di comfort estivo, prevedendo un consumo nullo o limitato di risorse energetiche convenzionali e un impiego di materiali ecocompatibili. Infatti, nei climi caratterizzati da un'ampia escursione termica giornaliera (15°C) e da una ventilazione notturna efficace, le murature di grosso spessore consentono

di ridurre il carico termico da raffrescamento estivo del 10-40% rispetto al caso di involucri leggeri, a parità di prestazioni isolanti. Non a caso, questa tipologia di involucro è stata da sempre una delle tecnologie costruttive privilegiate dell'area mediterranea. Importante affinché si raggiungano buoni livelli di comfort estivo è l'abbinamento di opportuni sistemi di schermatura solare e di ventilazione naturale notturna, nonché l'oculato contenimento delle aperture [58].

In Europa, gli edifici a energia zero adottano tecnologie stratificate leggere che usano isolamento termico con elevati spessori e basso peso specifico per raggiungere una trasmittanza termica assai elevata così da abbassare i costi dovuti al riscaldamento invernale. Congedo et al. [59] mostrano come nei climi temperati, come l'area mediterranea, un iper-isolamento dell'involucro non consente di scaricare il calore accumulato durante il giorno a causa dei bassi valori di massa termica e inerzia termica.

Ai fini della verifica del comfort estivo, nella scelta dei materiali costituenti il pacchetto stratigrafico occorre valutare attentamente parametri termo-fisici, quali sfasamento, attenuazione e trasmittanza termica periodica del pacchetto. Arieti [60] fornisce alcune indicazioni sui valori ottimali di queste grandezze. Lo sfasamento termico ideale è di 12 ore (o superiore), così che il calore più intenso del primo pomeriggio invada l'ambiente interno in piena notte, quando la temperatura dell'aria è un po' più bassa, ed è possibile smaltirlo con una buona ventilazione naturale. Il valore ottimale di attenuazione è inferiore o uguale a 0,15 e, normalmente, all'allungarsi dello sfasamento corrisponde un miglioramento dell'attenuazione. Sempre Arieti sostiene che se i valori di sfasamento e attenuazione sono entrambi validi, lo sarà di conseguenza anche il valore di trasmittanza termica periodica, ma non sempre è vero il contrario. Sarebbe perciò buona prassi, a garanzia del comfort climatico, una verifica di tali parametri. Arieti analizza, inoltre, alla luce di queste considerazioni, tre pacchetti costruttivi usando tre tecnologie diverse (il blocco in laterizio, la tecnologia Xlam e il telaio con pannello in OSB) e stesso isolante a cappotto esterno (8 cm di polistirene espanso). Trascurando la verifica igrometrica, i risultati evidenziano che la muratura soddisfa immediatamente la verifica rispetto ai tre parametri termici, mentre per soddisfare la verifica delle altre due tipologie costruttive è necessario costipare le intercapedini impiantistiche con 5 cm di fibra di legno, che a parità di massa, ha una capacità termica molto superiore rispetto a quella della lana di roccia, ma ha anche costi superiori.

Dai risultati dell'analisi di Baglivo et al. [61], condotta in termini di alcuni parametri termofisici dei materiali, emerge che la massa superficiale di muri esterni è importante per ottenere le migliori performance in climi caldi e che è possibile raggiungere buone performance nella stagione estiva anche con pareti relativamente più leggere. Inoltre le analisi suggeriscono il posizionamento dell'isolante verso l'esterno e del paramento a maggiore capacità verso l'ambiente interno. Inoltre, la letteratura tecnica è concorde ormai nell'affermare che non necessariamente la soluzione a minore trasmittanza (auspicabile in termini energetici) è quella più conveniente da un punto di vista economico, perché la riduzione dei costi di esercizio, dovuti al risparmio energetico conseguito, non compensa i costi di investimento più elevati in fase di costruzione [62]. Inoltre, i risultati della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica mettono in evidenza che a Palermo (zona climatica B) i valori di trasmittanza termica possano essere di gran lunga maggiori rispetto a quelli imposti per legge (Tabella 10).

Tabella 10. Confronti di trasmittanze. Fonte ENEA

DESTINAZIONE D'USO	EPOCA DI COSTRUZIONE	ZONA CLIMATICA	U_{wall} (W/m ² k)	U_{roof} (W/m ² k)	U_{floor} (W/m ² k)	U_w (W/m ² k)
Residenziale	Nuovo	Milano (E)	0,27	0,18	0,17	3,27
		Palermo (B)	1,50	0,28	0,29	3,20
	Esistente	Milano (E)	0,40	0,23	0,32	3,28
		Palermo (B)	0,80	0,31	0,49	3,95
Edificio ad uso ufficio	Nuovo	Milano (E)	0,36	0,30	0,30	1,10
		Palermo (B)	1,50	0,46	0,56	5,00
	Esistente	Milano (E)	0,17	0,32	0,29	2,90
		Palermo (B)	1,04	1,03	0,30	4,45
Edificio ad uso scolastico	Esistente	Milano (E)	0,80	0,20	0,29	3,70
		Palermo (B)	0,35	0,26	0,42	3,80

Sebbene le analisi siano state condotte su un caso esemplare ipotizzando una certa soluzione impiantistica, i risultati possono essere considerati comunque attendibili.

Inoltre, un quadro attuale sulle tecnologie costruttive impiegate nella costruzione di edifici ad alta efficienza, utili anche alla selezione di tecnologie di involucro promettenti per il raggiungimento dell'obiettivo Zero Energy, è fornito dai risultati del progetto condotto dall'ENEA all'interno dell'Osservatorio degli nZEB in Italia [25]. Dei 26 casi analizzati si prendono in analisi solo i fabbricati di nuova costruzione o ricostruzione, ben 17; di questi, 14 ad uso residenziale e 3 ad uso scolastico. Per le pareti sono state utilizzate le seguenti tecnologie: blocchi di laterizio porizzato e cappotto (6 casi), struttura in legno X-Lam e isolante (5 casi), sistemi multistrato a secco (2 casi), calce e canapa (2 casi). Gli isolanti utilizzati sono lana di roccia, che è anche il più usato con ben 6 casi, e a seguire fibra di legno, fibra di vetro, polistirene espanso e schiuma polyiso espanso (1 caso). In zona climatica E si predilige l'uso delle strutture in legno, in zona D le soluzioni più diffuse sono in laterizio o multistrato, in zona C si ritrovano soluzioni sia in laterizio che in calce e canapa. Non vi sono casi nZEB in zona A, B e F.

In questo paragrafo si trattano di conseguenza in maniera esemplificativa alcune soluzioni tecnologiche ormai consolidate nel mercato edilizio, che emergono dai principali riferimenti tecnici relativi alla progettazione di edifici ZEB e nZEB [45,60], e che si possono ascrivere tra le soluzioni più papabili per la progettazione in direzione ZEB.

7.1.1 Materiali isolanti

Gli **isolanti tradizionali** sono ancora gli isolanti più diffusi nella costruzione di nuovi edifici.

Si distinguono in

- Isolanti di origine minerale: perlite e vermiculite, argilla espansa, calcio silicato, fibre minerali, lana di roccia e lana di vetro;
- Isolanti di origine petrolchimica: polistirene espanso estruso o sinterizzato, poliuretano espanso, polietilene espanso, fibra di poliestere;
- Isolanti di origine naturale: lana di pecora, fibra di legno, fibra di canapa, sughero, tutti materiali sostenibili, salubri e riciclabili al 100%.

L'uso di isolanti leggeri, caratterizzati da ottimo potere termoisolante ma da bassa densità ed inerzia, è da privilegiare in climi freddi e rigidi, ove la necessità di isolamento nella stagione invernale è preponderante rispetto a quella estiva, e nelle chiusure orientate a nord, non soggette all'irraggiamento solare. I materiali isolanti naturali vegetali, come la fibra di legno, oltre a possedere buon potere termoisolante (ma comunque inferiore rispetto ai materiali di sintesi petrolchimica), hanno anche elevata densità e buona capacità di accumulo termico: per tale motivo offrono buone prestazioni in climi caldi e nelle superfici esposte a irraggiamento solare diretto ma, dal momento che possono essere più sensibili all'azione della pioggia, è necessario che vengano debitamente protetti.

Tra gli isolanti di sintesi petrolchimica, i più diffusi sono il poliuretano espanso (PUR) e il polistirene espanso (EPS), in quanto attualmente disponibili a basso costo e caratterizzati da ottimi valori di conducibilità termica. La lana di roccia, che si caratterizza per un valore di resistenza al vapore assai inferiore rispetto a quello dell'EPS, dal punto di vista commerciale ha mediamente un costo superiore a quest'ultimo, ma normalmente inferiore a quello della fibra di legno.

In Tabella 11 si riportano i valori termo-igrometrici significativi di alcuni materiali coibenti e le rispettive densità.

Tabella 11. Confronto tra i valori termo-igrometrici significativi di alcuni materiali coibenti. Fonte: [60].

Proprietà fisica	Conduttività	Capacità termica	Densità	Resistenza al vapore
Simbolo	λ	c	ρ	μ
Unità di misure	[W/mK]	[J/KgK]	[kg/m ³]	(adimens.)
Fibra di legno	0,037-0,060	2100	50-250	3-5-10
Sughero	0,040-0,060	1800	60-150	2-30
Idrati di silicato di calcio	0,045-0,047	1300	100-115	3
Lana da roccia	0,033-0,036	830-1000	30-100	1
Lana di vetro	0,032-0,045	850	20-100	1-3
EPS (polistirene espanso)	0,031-0,035	1450-1500	15-30	30-50
XPS (polistirene estruso)	0,030-0,040	1300-1400	15-30	20-120
PUR (poliuretano espanso con grafite)	0,023-0,024	1450-1500	30-40	(35) 150

7.1.2 Sistemi costruttivi a umido

Dalla letteratura scientifica è emerso che la soluzione tecnologica massiva in laterizio resta ad oggi una delle soluzioni tecnologiche maggiormente utilizzate che consente ottimi valori di comfort invernale (per valori contenuti di trasmittanza termica U) ed estivo nelle zone con clima mediterraneo, per la sua cospicua massa superficiale che permette il raggiungimento di valori ottimali di sfasamento e attenuazione dell'onda termica. Presenta, inoltre, ottimi valori di traspirabilità e durabilità che la rendono una soluzione ancora più valida da un punto di vista di sostenibilità dell'ambiente.

Tutte le tipologie in laterizio prevedono l'utilizzo di blocchi porizzati, cioè alleggeriti additivando all'impasto di argilla polistirolo o farine naturali che ne migliorano le caratteristiche termiche, e rettificati a incastro che consentono tempi di posa dimezzati. Inoltre, la perfetta planarità dei blocchi consente l'applicazione di un collante apposto tramite rullo dello spessore di 1-2mm al posto della classica malta cementizia con l'eliminazione dei relativi ponti termici (Figura 13).



Figura 13. Posa sul blocco rettificato del collante con apposito rullo. Fonte: [63]

Altro vantaggio è dato dai setti sottili che permettono di sfruttare al meglio le proprietà isolanti dell'aria in quiete. Blocchi di questo tipo, con conducibilità termica λ 0,09 W/mK possono raggiungere secondo le schede tecniche dei produttori valori di trasmittanza termica pari a 0,19 W/m²K per spessori di 45 cm.

Pertanto, la prestazione ottimale può essere ottenuta senza l'ulteriore riempimento o inserimento di materiale coibente nel blocco in laterizio, così da ottenere una migliore stabilità nel tempo dei materiali ed evitare le problematiche legate a smaltimento e recupero del fine ciclo di vita dei manufatti.

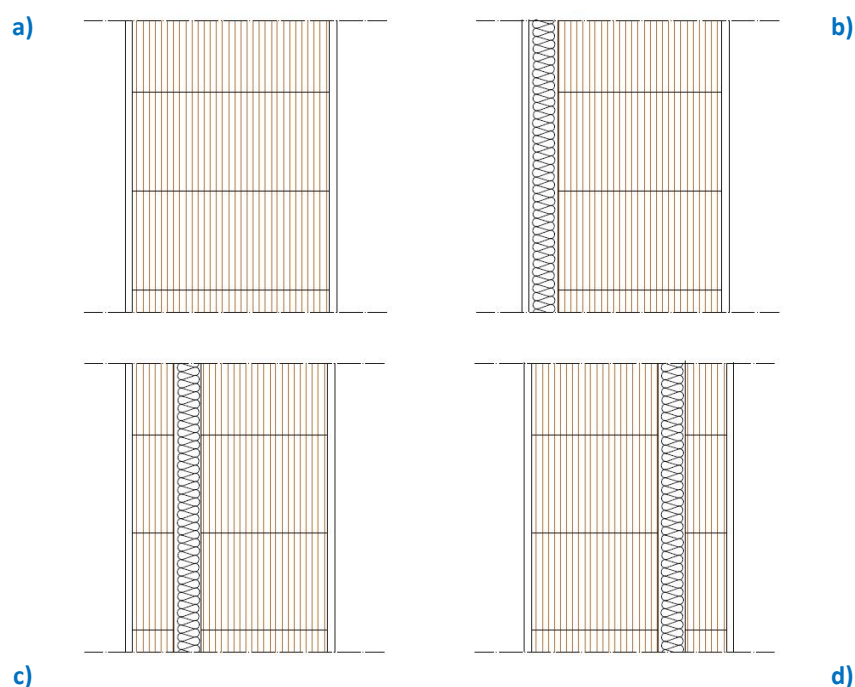


Figura 14. Stratigrafie di alcune pareti in laterizio. a) Parete monostrato; b) parete multistrato con cappotto esterno; c) parete multistrato con isolante in intercapedine (con rifodera esterna); d) parete multistrato con isolante in intercapedine (con rifodera interna)

Tabella 12. Caratteristiche termiche di alcune stratigrafie possibili. Fonte: [64]

	Spessore totale [cm]	Trasmittanza U [W/m ² K]	Massa superf. M _s [kg/m ²]	Sfasamento [ore]	Attenuazione [-]	Trasmittanza Periodica Y _{IE} [W/m ² K]
a) Parete monostrato in laterizio						
Blocco-35 setti sottili	38	0,29	270	20,50	0,04	0,012
Blocco-38 setti sottili	41	0,27	290	22,33	0,03	0,008
Blocco-40 setti sottili	43	0,26	310	23,55	0,02	0,005
Blocco-44 setti sottili	45	0,25	320	24,76	0,02	0,004
Blocco-45 setti sottili	48	0,23	350	26,59	0,01	0,002
b) Parete pluristrato in laterizio e isolamento in EPS a cappotto						
Blocco-30 + 8 EPS	41	0,24	230	16,53	0,05	0,011
Blocco-35 + 4 EPS	42	0,30	270	18,54	0,04	0,011
Blocco-35 + 8 EPS	46	0,22	270	18,98	0,03	0,006
Blocco-38 + 4 EPS	45	0,28	290	20,01	0,03	0,007
Blocco-38 + 8 EPS	49	0,21	290	20,45	0,02	0,004
c) Parete pluristrato in laterizio e isolamento in intercapedine (con rifodera esterna)						
Blocco-25+4 EPS+ tram12	44	0,33	300	17,90	0,06	0,020
Blocco-25+4 EPS+ tram12	46	0,28	300	18,24	0,05	0,015
Blocco-25+4 EPS+ tram12	48	0,24	300	18,48	0,05	0,012
d) Parete pluristrato in laterizio e isolamento in intercapedine (con rifodera interna)						
Forato8+ 4 EPS + Blocco-25	40	0,35	260	16,06	0,09	0,032
Forato8+ 6 EPS + Blocco-25	42	0,29	260	16,38	0,08	0,024
Forato8+ 8 EPS + Blocco-25	44	0,25	260	16,62	0,07	0,019

Lo svantaggio del blocco potrebbe essere legato ai maggiori costi di trasporto e movimentazione in cantiere, legati al peso e alle dimensioni notevoli dei blocchi (per le pareti monostrato gli spessori variano tra 40 e 50 cm di lunghezza).

Le principali tecnologie in laterizio si dividono in pareti monostrato portante e non (Figura 14a), pareti multistrato con isolamento a cappotto (Figura 14b), pareti multistrato in laterizio e isolante in intercapedine (Figura 14c e Figura 14d). In Tabella 12 vengono riportati i parametri termo-fisici, forniti dai produttori, delle suddette pareti costituite da blocchi rettificati. Questi servono solo a titolo esemplificativo per dare un'indicazione di massima sulle caratteristiche termiche delle varie stratigrafie e fornire un termine di paragone. Esistono infatti blocchi anche più performanti.

L'isolamento esterno a cappotto consiste nell'applicare sulla parete esterna, con un'apposita malta, i pannelli isolanti che vengono quindi ricoperti prima da una rete di fibra di vetro o in acciaio e poi da un sottile strato di intonaco plastico. Note positive sono i buoni valori di trasmittanza che si raggiungono, l'eliminazione dei ponti termici e della formazione di condensa superficiale. Uno svantaggio è dato dall'interazione con il comportamento igrometrico dell'edificio.

Per completezza si riporta anche la discussione sulle altre tipologie di pareti citate, anche se la tecnologia più auspicabile nell'ottica di una progettazione in direzione ZEB è quella dell'isolamento dall'esterno per i problemi presenti negli altri casi che si illustrano di seguito. L'isolamento in intercapedine consiste nel suddividere la parete perimetrale in due strutture separate da una camera d'aria riempita del tutto o in parte con isolante termico. La porzione di parete che dà verso l'esterno generalmente ha spessore e massa maggiore rispetto a quella che affaccia verso gli ambienti interni. Rispetto all'isolamento a cappotto, questa soluzione ha il vantaggio di proteggere il materiale isolante dagli agenti atmosferici, di avere costi ridotti di installazione e semplicità di realizzazione. Al tempo stesso, però, non sono trascurabili alcuni svantaggi quali la riduzione dell'inerzia termica delle pareti e un eventuale aumento dei ponti termici. L'isolamento della parete sul lato interno dei muri perimetrali risulta talvolta l'unica soluzione possibile per ridurre i consumi energetici nel caso di ristrutturazioni di edifici storici e/o di pregio per particolari ragioni economiche e/o tecniche. Anche l'adozione dell'intonaco termoisolante rappresenta una soluzione alternativa al cappotto nel caso in cui l'isolamento non sia compatibile con i caratteri estetici e tecnologici dell'edificio, tuttavia alcune caratteristiche, come il potere isolante inferiore rispetto ad altri sistemi e l'applicazione di strati di intonaco con spessori di 4-6 cm, la rendono una soluzione marginale nel campo delle nuove costruzioni.

Nel solaio interpiano l'isolante termico va posato al di sopra della soletta sotto il pavimento ed è soggetto, pertanto, a carichi di esercizio permanenti e a fenomeni di condensazione. Per evitare possibili danni, è opportuno perciò che sia dotato di buone proprietà igrotermiche e idonee prestazioni meccaniche. Per l'isolamento dei solai contro terra o su vespaio è necessario applicare uno strato isolante all'estradosso del solaio che dovrà avere quindi una resistenza meccanica adeguata a sopportare il peso del massetto soprastante.

Nelle coperture latero-cementizie l'inerzia termica è garantita dalla soletta piena in cemento armato, che per contro si oppone alla diffusione al vapore, pertanto può essere abbinato a un isolante come il poliuretano con ottime performance invernali, minore performance estiva e piuttosto chiuso alla diffusione al vapore. A differenza di una copertura piana (Figura 15), la copertura inclinata (Figura 16), in virtù della sua inclinazione, ha modo di innescare una ventilazione naturale dalla gronda al colmo tale da ridurre il carico termico durante il periodo estivo.

Isolamenti dall'intradosso della copertura a falde e dei sottotetti possono risultare indubbiamente vantaggiosi, in termini economici, nel caso di ristrutturazioni.

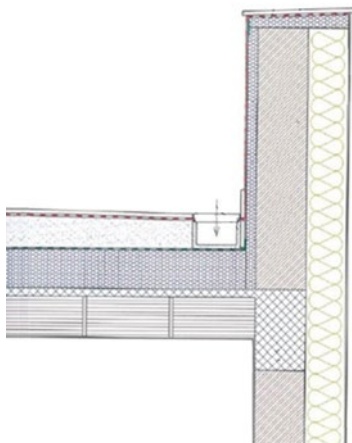


Figura 15. Stratigrafia di solaio in latero-cemento, coibentazione in lastre di XPS, telo di protezione, massetto di pendenza, guaina liquida, collante e pavimentazione in gres. Fonte: [60]

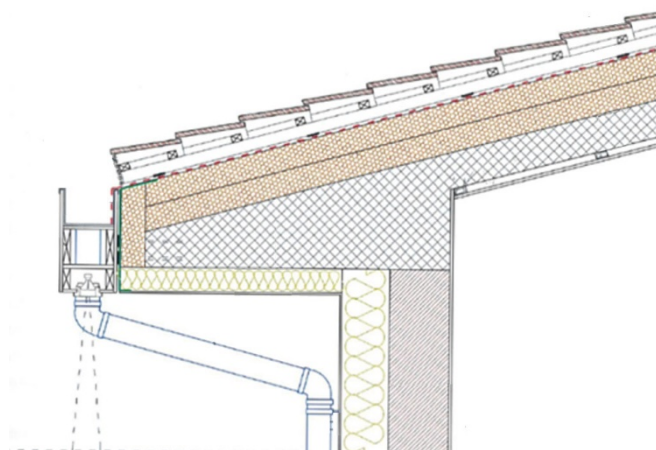


Figura 16. Stratigrafia di tetto latero-cementizio con coibentazione con lastre in schiuma di polyiso; guaina (tenuta al vento e all'acqua); traversi in legno; listelli; controlistelli; manto di copertura in coppi. Fonte: [60]

Nella realizzazione di pareti opache verticali, altre strutture a umido che emergono dalla letteratura tecnica [60] sono i sistemi a setti in calcestruzzo armato con casseforme termiche a rimanere, ad esempio in EPS (Figura 17a), che però hanno bisogno di particolari attenzioni:

- data l'elevata resistenza al passaggio di vapore propria del cemento armato, la parete risulta piuttosto chiusa alla diffusione del vapore (problema risolvibile con l'installazione di un VMC);
- se il sistema garantisce un valido isolamento invernale (per spessori compresi tra 25 e 45 cm si hanno trasmittanze di pareti finite, escluse finiture, comprese tra 0,27 e 0,15 W/m²K), in periodo estivo i valori di sfasamento variano da 7 a più di 10 ore all'aumentare dello spessore.

Un altro sistema che integra il calcestruzzo armato gettato in opera e l'isolante (in EPS) è il Blocco in legno-cemento, che nasce dalla mineralizzazione di un triturato di legno addizionato ad acqua, cemento e altri minerali. Questo sistema, se da un lato offre uguali vantaggi e svantaggi del sistema precedente, presenta qualche difficoltà in più relativamente alla continuità di materiale (in corrispondenza dei connettori) tra interno ed esterno e necessita di qualche accorgimento esecutivo in più da prevedere con attenzione in fase progettuale.

Altro sistema a umido è quello a blocchi di cemento cellulare aerato autoclavato (CCAA), portante o non, che si posa, come il laterizio classico, con giunti di malta sottili per non comprometterne le proprietà isolanti (Figura 17b). Ha trasmittanze simili a quelle del sistema con casseri in EPS a rimanere ma anche valori di sfasamento buoni (spesso maggiori a 9 ore), senza necessità di aggiungere ulteriore isolamento (Tabella 13).

A questo si aggiungono le caratteristiche di leggerezza e riciclabilità al 100%. Interessanti i larghi impieghi che trova nelle costruzioni edilizie (Figura 17c e Figura 17d).



Figura 17. a) sistema a setti in c.a. con casseforme in EPS a rimanere (Fonte: [65]); b) sistema a blocchi di CCAA; c) e d) esempi di realizzazione con l'impiego di blocchi in CCAA (Fonte: [66])

Tabella 13. Caratteristiche termo-fisiche del blocco in CCAA. Fonte: [66]

Spessore	mm	300	350	375	400	450
Trasmittanza termica U	W/m ² K	0,22	0,19	0,18	0,17	0,15
Trasmittanza periodica Y_{IE}	W/m ² K	0,050	0,027	0,020	0,014	0,008
Sfasamento	ore	11h 49'	14h12'	15h24'	16h35'	18h58'
Attenuazione	-	0,225	0,109	0,109	0,085	0,051

7.1.3 Sistemi costruttivi a secco

L'impiego di soluzioni costruttive tradizionali basate sull'utilizzo di blocchi in laterizio o calcestruzzo e isolanti termici tradizionali può far sì che, per rispettare i valori limite imposti oggi dalla normativa, le chiusure possano raggiungere facilmente lo spessore complessivo di oltre 40 cm. La tecnologia stratificata a secco può essere un'alternativa alle due soluzioni.

Le pareti multistrato costruite con tecnologia a secco (Figura 18) presentano dei valori di massa superficiale molto bassi a fronte di valori elevati di resistenza termica, mentre i ridotti valori di trasmittanza termica periodica sono legati all'azione combinata di ciascuno strato costituente la parete. Il vantaggio economico è dato dalla leggerezza dei materiali impiegati e da una posa in opera in cantiere più rapida, dal momento che i prodotti sono realizzati per la quasi totalità industrialmente [45]. Di contro, ci sono i costi di acquisto più elevati e l'impiego di teli per la tenuta all'aria dell'involucro. È un sistema che può trovare largo uso, oltre che nel nuovo, nelle ristrutturazioni e nelle facciate ventilate in edifici anche di altezza notevole.

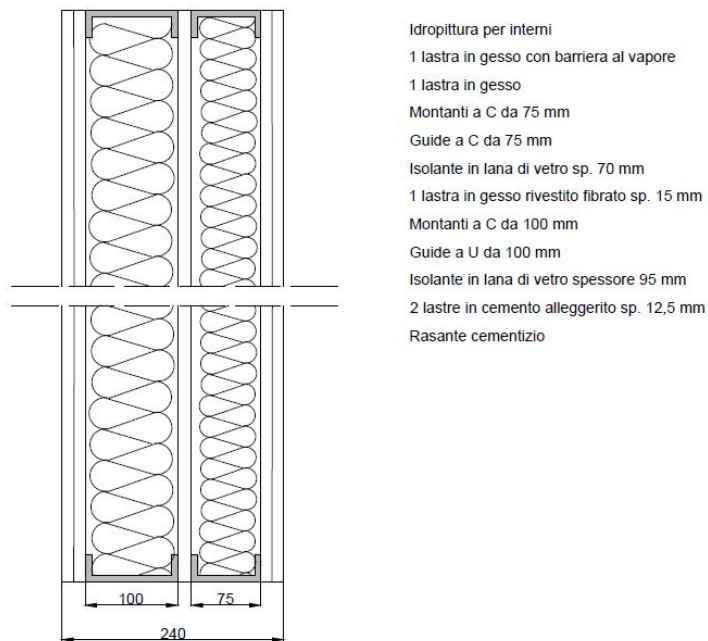


Figura 18. Stratigrafia di tamponatura a secco con $U=0,18W/m^2K$.

Tra le tecnologie multistrato a secco rientrano anche le soluzioni in legno, suddivise nelle due tecniche costruttive del telaio e dei pannelli X-Lam. La tecnica costruttiva a telaio prevede la combinazione di una maglia strutturale a travi e pilastri in legno lamellare dove le tamponature a secco vengono controventate da pannelli pluristrato o “oriented strand board” (OSB). Fra i montanti in legno ed internamente viene posizionato il materiale termoisolante, successivamente viene posato il gesso rivestito o fibrogessato. I telai sono applicabili a strutture di uno e due piani (Figura 19a).

Più versatile invece la struttura a pannelli massicci a strati incrociati X-Lam (Figura 19b), che consente la realizzazione di edifici di dimensioni maggiori e di destinazioni d’uso diverse da quella residenziale, come uffici, scuole, chiese, etc.



a)



b)

Figura 19. a) Struttura in telaio di legno lamellare; b) Struttura in pannelli di legno lamellare X-Lam.
 Fonte:[67]

I pannelli X-Lam sono pannelli prefabbricati composti da diversi strati (da 3 a 9) di lamelle di legno incrociati e incollati tra loro. Vengono utilizzati nella costruzione degli elementi portanti di un edificio come le pareti e i solai, perciò coniugano resistenza e performance energetiche. I pannelli vengono posati interposti a due strati di isolante, uno interno e uno esterno, preferendo generalmente la fibra di legno, materiale dalle ottime performance estive (Figura 20).

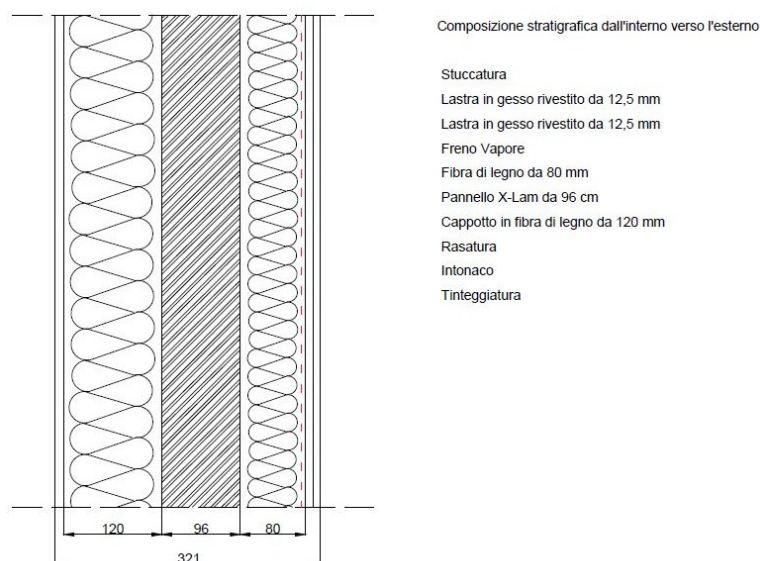


Figura 20. Stratigrafia di strutture a pannelli X-Lam. Caratteristiche termofisiche: trasmittanza $U=0,17$ W/m^2K , Trasmittanza periodica $0,007 W/m^2K$, Sfasamento 12h 22'

Di seguito si riportano due possibili stratigrafie di coperture piane: un solaio in legno con tetto verde estensivo (Figura 21) e un solaio in X-Lam (Figura 22), entrambi con isolamento in lastre di XPS.

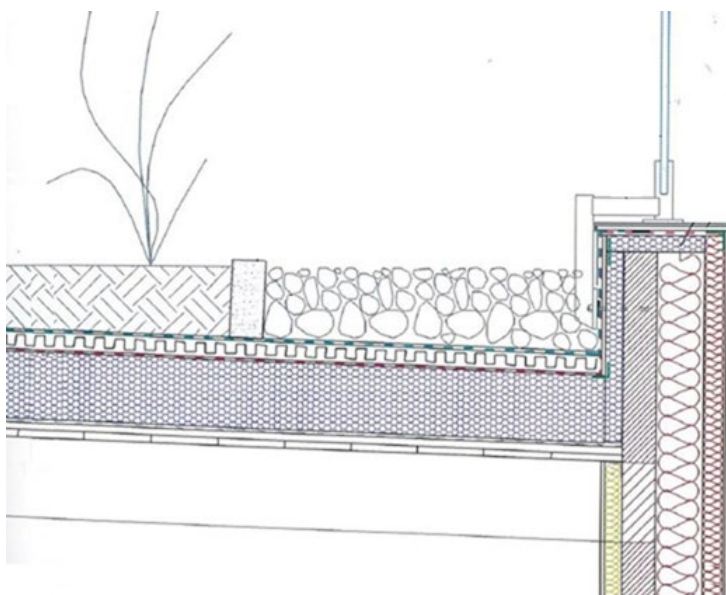


Figura 21. Stratigrafia di solaio in legno dall'interno INT all'esterno EST: doppio tavolato incrociato in legno su travi strutturali, telo di tenuta all'aria e barriera al vapore, coibentazione in lastre di XPS, materassino plastico bugnato per drenaggio, tessuto non tessuto, terreno vegetale per tetto verde estensivo [60]

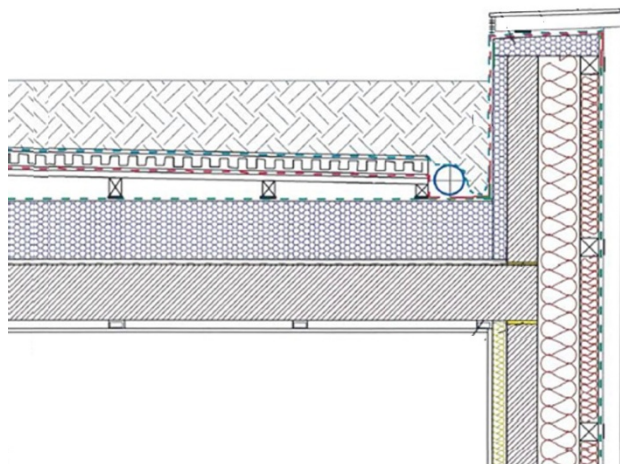


Figura 22. Stratigrafia di solaio in X-Lam, coibentazione in lastre di XPS, morali in legno di diversa altezza per supportare un piano inclinato, tavolato OSB, guaina, materassino plastico bugnato per drenaggio, tessuto non tessuto, terreno vegetale per tetto verde estensivo. Fonte: [60]

7.1.4 Facciata ventilata

Il sistema della facciata ventilata consente di ottimizzare il comfort dall'interno dell'edificio creando un effetto camino che permette la fuoriuscita di aria calda e umidità grazie al costante flusso d'aria che si genera tra isolamento e rivestimento. La ventilazione riduce il rischio di condensa all'interno del pacchetto murario, mentre il sistema di facciata garantisce un'efficace protezione contro le infiltrazioni accidentali. Il rivestimento può essere dato da lastre in fibrocemento, lastre in gres, lastre metalliche, lastre HPL, tavelle in cotto e doghe in legno. Il sistema si può applicare sia nelle nuove costruzioni che nelle ristrutturazioni, su supporti umidi (Figura 23a) o a secco (Figura 23b). Sicuramente la facciata ventilata apporta molti vantaggi, tra cui la traspirazione della facciata, la continuità dell'isolamento e l'eliminazione dei ponti termici, funge da schermatura solare in estate e riduce la condensa in inverno. Tuttavia, pur essendo teoricamente una tecnologia valida, praticamente riscontra qualche difficoltà di funzionamento e costi elevati, da valutare in ambito residenziale rispetto ai benefici.

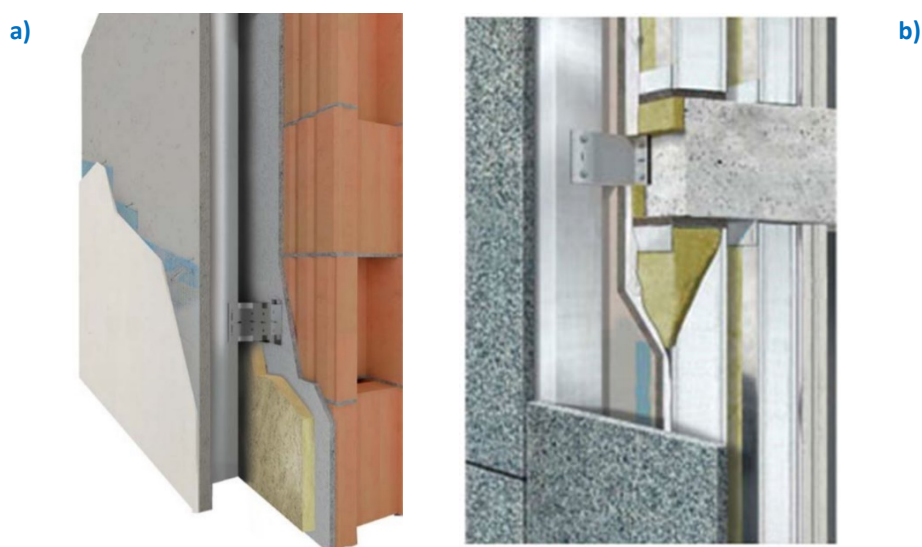


Figura 23. Sistemi a facciata ventilata: a) Facciata ventilata su supporto in laterizio; b) Facciata ventilata su montanti in alluminio. Fonte: [68]

Il tetto latero-cementizio di Figura 24a presenta un manto metallico ventilato in continuità con la parete in muratura, mentre la copertura ventilata di Figura 24b adotta la tecnologia X-Lam, coibentato con fibra di legno.

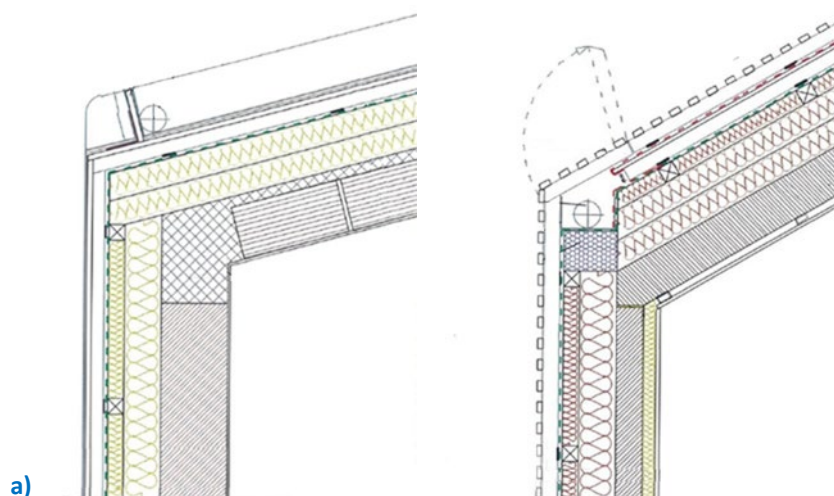


Figura 24. a) Stratigrafia di tetto laterocementizio con isolamento in lana di roccia 150kg/m³; telo di tenuta al vento (e all'acqua); montanti in legno; tavolato grezzo; manto antirombo; manto metallico di finitura; b) Stratigrafia di tetto ventilato in pannelli X-Lam, fibra di legno 150 kg/m³, fibra di legno 150 kg/m³, pannelli alternati a traversi in legno avvitati a X-Lam, telo di tenuta al vento e all'acqua, traversi in legno, tavolato superiore, guaina, traversi in legno, finitura esterna a listelli in legno. Fonte: [60]

7.2 Materiali isolanti ad alte prestazioni

Di seguito si analizzano brevemente vantaggi e limiti di alcune delle soluzioni più innovative che ad oggi, pur non avendo ancora grandissima diffusione per le ragioni che verranno esposte, è possibile reperire sul mercato, come alternativa ai prodotti tradizionali.

7.2.1 Isolanti riflettenti

La scoperta del principio dell'isolamento termico riflettente può essere fatta risalire alla metà del XIX secolo grazie all'intuizione del fisico francese Jean Claude Eugene Peclet, che condusse esperimenti con strati multipli di acciaio rivestito di stagno (superficie riflettente) intervallando strati di aria di spessore variabile tra le superfici riflettenti. In questo modo, riuscì ad evidenziare l'eccellente effetto isolante prodotto dalla superficie riflettente attraverso la riduzione del trasferimento di calore.

Tuttavia, un uso commerciale più diffuso di questo tipo di isolamento risale solo al 1925, quando Schmidt e Dykerhoff, brevettarono l'impiego di superfici riflettenti per l'isolamento [69].

A partire da esperimenti su di un foglio di alluminio molto sottile, di spessore inferiore a 0,0005 pollici (0,0127 mm) svilupparono un vero e proprio isolante efficiente e commercialmente sostenibile dando un impulso importante al settore, dal momento che l'alluminio, molto più sottile e molto leggero, risultava ben più conveniente rispetto ai convenzionali materiali isolanti, tipicamente la lana di roccia.

Pur trovando inizialmente ampia e opportuna applicazione nel settore aerospaziale, negli ultimi anni gli isolanti riflettenti hanno avuto crescente applicazione anche nel settore edile sotto forma di semplici barriere radianti il cui utilizzo è da tempo consolidato nelle applicazioni in copertura o di più complessi sistemi multistrato riflettenti (Figura 25)

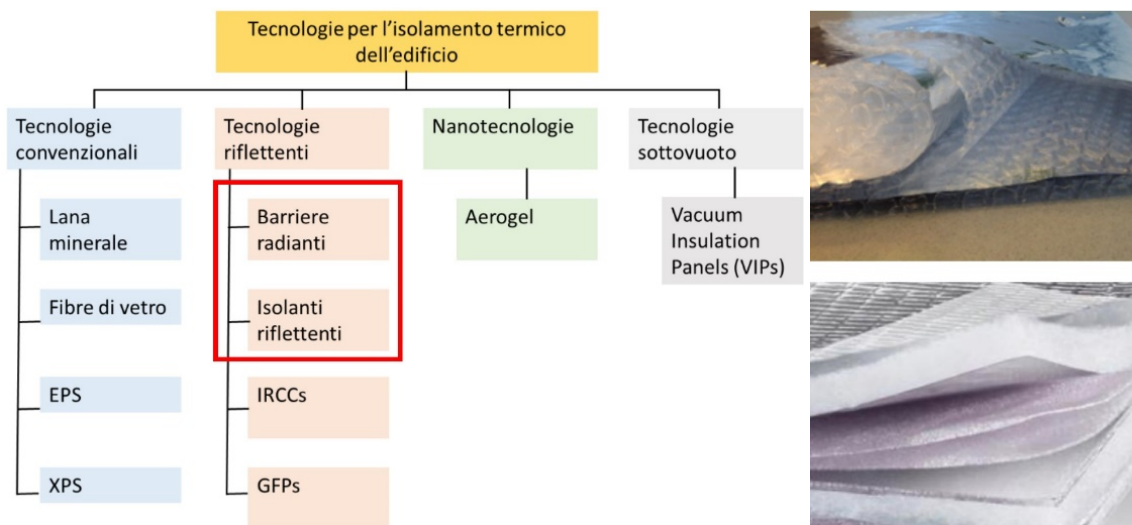


Figura 25. a) schema tecnologie di isolamento. Fonte: rielaborazione ENEA da [69]; b) e c) esempio di isolante riflettente multistrato. Fonte: web

Per comprendere la differenza tra questi due sistemi si riporta la definizione, generalmente accettata, della *Reflective Insulation Manufacturers Association International (RIMA-I)*, che specifica che, nel caso della barriera radiante, il materiale riflettente deve essere rivolto verso uno spazio aperto in cui l'aria è libera di entrare e uscire dal sistema. Solitamente le barriere radianti sono costituite da un sottile strato di foglio di alluminio laminato su uno o entrambi i lati di un altro materiale di supporto e di rinforzo, come carta kraft, film plastici, cartone, ecc. Di conseguenza, è facile intuire perché l'applicazione di questo tipo di isolamento è molto comune in copertura (Figura 26a).

Più complesso è, invece, il sistema di isolamento riflettente formato da una combinazione di superfici basso-emissive e aria che creano cavità riflettenti con bassi livelli di trasmissione di energia radiante [70]. Alcuni sistemi di isolamento riflettente utilizzano anche strati di materiali diversi come ovatta, carta o film plastici per creare più camere d'aria.

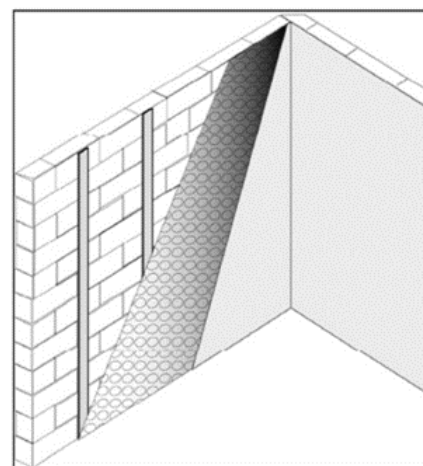
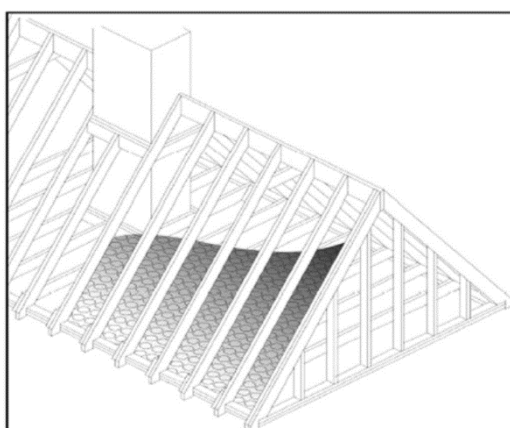


Figura 26. a) Installazione di barriera radiante in un sottotetto. b) installazione di un sistema multistrato riflettente su parete. Fonte: RIMA-I [70]

Il sistema crea una barriera alla penetrazione della radiazione elettromagnetica nel campo dell'infrarosso. Più piccola è la cavità di aria, minore sarà il calore trasferito per convezione. L'aria presente che può essere stratificata o a celle chiuse, può essere una caratteristica del pannello multistrato (realizzata in fase di produzione) o essere inclusa nel sistema durante l'installazione.

La proprietà riflettente come caratteristica del trasferimento di calore per irraggiamento, guida il calore verso il lato più caldo. Un articolo di Fricker [71] sull'analisi delle proprietà termiche delle intercapedini d'aria, basato sul documento di ricerca di Robinson e Powell [72], evidenzia come la resistenza termica dell'isolamento è influenzata da fattori che includono, in termini generali, la temperatura nell'intercapedine d'aria (temperatura media e gradiente), l'emissività di tutte le superfici di delimitazione, dimensione e orientamento della camera d'aria e la direzione del flusso di calore. Nello specifico, più riflettente è la superficie, maggiore è la resistenza termica dell'intercapedine; ciò vale sia per una superficie riflettente rivolta verso una superficie opaca, sia per due superfici riflettenti rivolte l'una verso l'altra. In generale, inoltre si osserva una maggiore resistenza termica, con una maggiore intercapedine d'aria, mentre al contrario la resistenza si riduce con l'aumento della differenza di temperatura nell'intercapedine.

I sistemi di isolamento riflettente trovano più comunemente impiego sulle pareti verticali (Figura 34b), a differenza dei pannelli o dei film radianti comunemente utilizzati in copertura. A tal proposito, studi reperibili in letteratura (Vrachopoulos et al. [73]) dimostrano come, testando su piccola scala (test box) l'effetto di un sistema isolante riflettente inserito all'interno della camera d'aria di una parete tipo con un interspazio di 10 mm su ciascun lato del materiale riflettente, durante il periodo invernale è possibile registrare una stabilizzazione della temperatura interna dovuta all'effetto di riflessione del calore all'interno. Si osserva dal test, infatti, come la temperatura della parete interna rimanga relativamente costante (10°C - 12°C), mentre maggiori variazioni di temperatura (da 4°C a 16°C) si registrano sulla parete esterna.

Durante l'estate, allo stesso modo, si è osservato come l'isolamento riflettente blocchi il calore della radiazione solare, consentendo quindi di mantenere la temperatura sulla superficie della parete interna tra 23°C e 27°C per tutto il giorno, mentre la temperatura sulla superficie della parete esterna oscilla da 17°C al mattino a circa 32°C nel pomeriggio.

Questo effetto stabilizzante delle temperature in entrambe le stagioni contribuisce ad alleggerire il carico termico per il sistema di condizionamento, con conseguente risparmio sui costi.

L'applicazione di questi sistemi, inoltre, ha il grande vantaggio, grazie a spessori molti esegui comparati agli isolanti tradizionali, di occupare spazi contenuti, riuscendo comunque ad ottenere un notevole miglioramento del valore della resistenza R (per la cui esatta definizione tuttavia sussistono incertezze legate alla dipendenza da dimensioni, orientamento delle camere d'aria, temperatura dell'aria superficiale, trasferimento di calore ed emissività della superficie riflettente [74]).

Ma se, come si è detto, l'emissività della superficie riflettente ha un ruolo fondamentale nella performance termica di sistemi di questo tipo, diventa indispensabile preservare e mantenere nel tempo le proprietà basso emissive iniziali del materiale, facendo quindi estrema attenzione a polvere, umidità, corrosione o ossidazione.

7.2.2 PCM - materiali a cambiamento di fase

I materiali a cambiamento di fase (PCM) utilizzano il calore latente del cambiamento di fase per controllare le temperature entro un intervallo specifico. Studi condotti dalla NASA a partire dagli anni '60 hanno portato allo sviluppo di un primo tipo di materiale a cambiamento di fase testato nelle tute degli astronauti allo scopo di contenere gli sbalzi termici e flussi di calore. Negli anni successivi, l'interesse per queste tipologie di prodotti è cresciuto notevolmente e si sono aperte nuove prospettive per il loro impiego in altri settori come quello edile, soprattutto nell'ottica del risparmio energetico.

Il funzionamento è così sintetizzabile: all'aumentare della temperatura i legami chimici nel materiale cominciano a rompersi e il materiale assorbe il calore attraverso un processo endotermico in cui si realizza un passaggio di stato, da solido a liquido. Analogamente al diminuire della temperatura per un processo inverso, tornerà allo stato solido, Figura 27 [75].

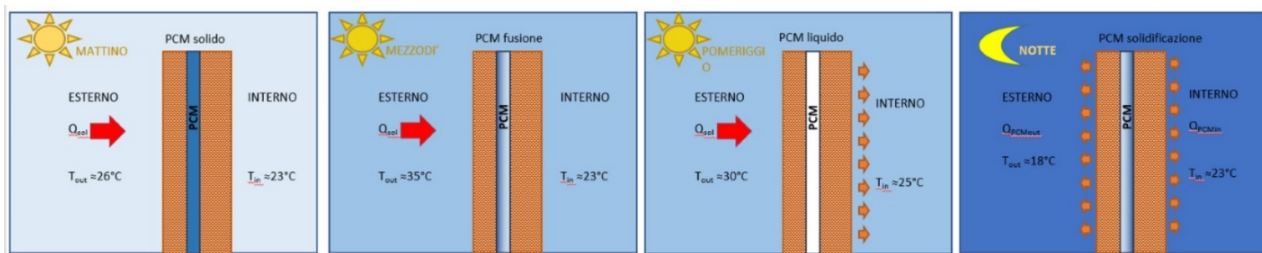


Figura 27. Schematizzazione di una parete con pannello di PCM. Fonte: rielaborazione ENEA da [76]

Dato che la temperatura di cambiamento di fase è circa pari alla temperatura ambiente, l'energia utilizzata per alterare la fase del materiale porterà a una condizione climatica interna più stabile e confortevole, oltre che alla riduzione dei picchi di raffreddamento e riscaldamento [77].

In edifici con bassa massa termica, i materiali a cambiamento di fase possono fornire un aumento della capacità di accumulo termico Figura 27.

L'intervallo di temperatura varia a seconda dei materiali.

Schröder e Gawron [78] hanno riassunto alcune delle proprietà fondamentali da verificare nei materiali a cambiamento di fase. È importante che la scelta del materiale sia opportunamente condotta in modo che la temperatura cui avviene il cambiamento di fase sia adattata all'applicazione e che il cambiamento di fase sia prevedibile con precisione.

Per massimizzare l'efficacia dei PCM è bene che la temperatura di cambiamento di fase sia adatta al clima, alla posizione nell'edificio o al tipo di sistema in cui viene utilizzato il materiale. Orientativamente il punto di fusione di sali idrati varia dai 18°C ai 30°C, per le paraffine dai 22°C ai 24 °C.

Un'elevata conduttività termica inoltre consentirà al calore di dissiparsi e lasciare il materiale più rapidamente, consentendo al PCM di assorbire o rilasciare calore a una velocità maggiore.

Di particolare rilievo sono anche la stabilità chimica ed un basso tasso di corrosione, ciò sia perché non si abbia un fenomeno di degradazione conseguente alle ripetute cristallizzazioni, sia per limitare le probabilità di reazione con materiali che sono in contatto con il PCM, al fine di allungare la vita utile del pannello. Da tener presente anche che il materiale di incapsulamento deve consentire l'espansione del PCM; è bene, quindi, che la variazione di volume durante la solidificazione sia contenuta. È, inoltre, auspicabile avere un elevato calore di fusione per unità di volume e per unità di peso, ed elevato calore specifico al fine di ottenere più efficace accumulo di calore latente con un volume il più piccolo possibile di PCM.

Pericolosità, infiammabilità, eventuale velenosità rientrano tra gli aspetti cui porre particolare attenzione in una progettazione accurata.

Esistono diversi materiali che possono essere utilizzati come PCM. Un modo comune per distinguere i PCM è dividerli in PCM organici, inorganici ed eutettici. Queste categorie sono ulteriormente suddivise in base ai vari componenti dei PCM (Figura 28).

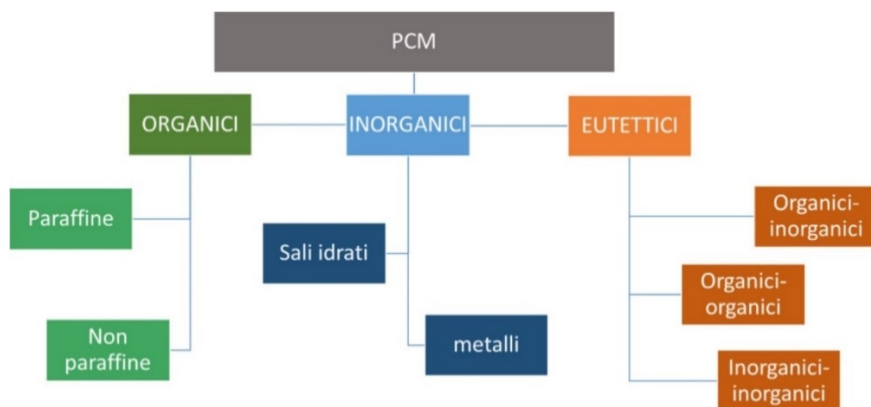


Figura 28. Classificazione dei PCM ENEA.

La Figura 29 mostra la differenza di entalpia di fusione e temperatura di fusione per alcuni dei materiali più comuni usati come PCM.

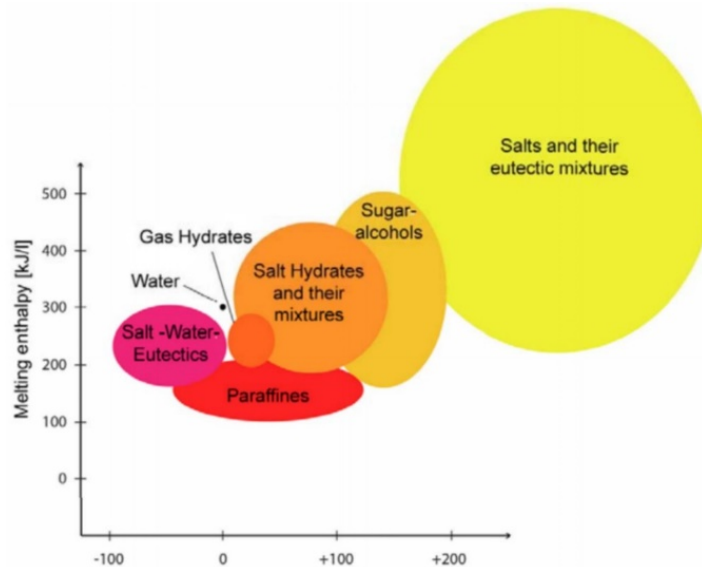


Figura 29. Melting enthalpy versus melting temperature for various materials used in PCMs. Fonte: [79]

La letteratura di settore evidenzia come risultati interessanti si siano avuti nella sperimentazione di PCM in pannelli in cartongesso o in legno, intonaci, sistemi di facciata vetrati o in plexiglas, ma anche in sistemi impiantistici come riscaldamento e raffrescamento passivo, collettori solari e scambiatori di calore.

Per caratteristiche e prestazioni, infatti, i PCM trovano felice applicazione in molti sistemi impiantistici, come ad esempio nell'ormai diffuso free cooling. Ma la capacità di accumulo di calore dei PCM può essere integrata in sistemi come pompe di calore solari, sistemi di recupero del calore e sistemi di riscaldamento a pavimento (sistemi "attivi").

Con riferimento alle applicazioni nel settore edile tuttavia sono in aumento, come la recente letteratura scientifica mette in luce, le applicazioni di questi materiali integrati nell'involucro esterno dell'edificio. La caratteristica che rende i PCM particolarmente interessanti, infatti, in questo particolare impiego è la loro elevata capacità di accumulo termico, che, per unità di spessore, è di molte volte superiore a quella dei materiali da costruzione convenzionali.

L'uso di PCM nelle applicazioni sull'involucro edilizio è stato discusso in diversi articoli, in particolare al fine di studiare l'effetto sul comfort termico umano e valutare la variazione delle fluttuazioni di temperatura [80]. PCM più comunemente usati includono paraffine, idrati salini, alcoli, acidi grassi e materiali sintetici. In virtù della loro composizione chimica, le paraffine simili a cera mostrano elevata stabilità del ciclo, bassa reattività, bassa isteresi e sono classificate come proprietà non tossiche che le rendono ideali per l'uso in applicazioni edili. Inoltre, le loro proprietà termiche, in particolare l'intervallo del punto di fusione, possono essere sostanzialmente regolate miscelando materiali puri. Lo svantaggio principale delle paraffine tuttavia, in quanto sottoprodotto della distillazione del petrolio, è la loro combustibilità [81].

Di interesse è l'applicazione in climi freddi dei PCM ad un sistema "passivo" ovvero l'integrazione all'involucro edilizio, laddove gli edifici sono stati costruiti secondo standard che prevedono l'impiego di grandi spessori di isolamento per ridurre i carichi di riscaldamento in inverno, in special modo nelle costruzioni leggere dotate di bassa inerzia termica.

Altro interessante vantaggio dei PCM è la loro capacità di aumentare il comfort termico, attenuando gli sbalzi di temperatura. Studi in letteratura [82, 83] dimostrano il potenziale dell'applicazione di un PCM nelle pareti e nel tetto come barriera termica efficace nel mantenere una temperatura interna costante e stabile (Figura 30), conseguentemente una riduzione della potenza termica necessaria installata per il condizionamento dell'aria, una conseguente riduzione della domanda di elettricità, infine, un spostamento nell'ora di picco della richiesta di elettricità.

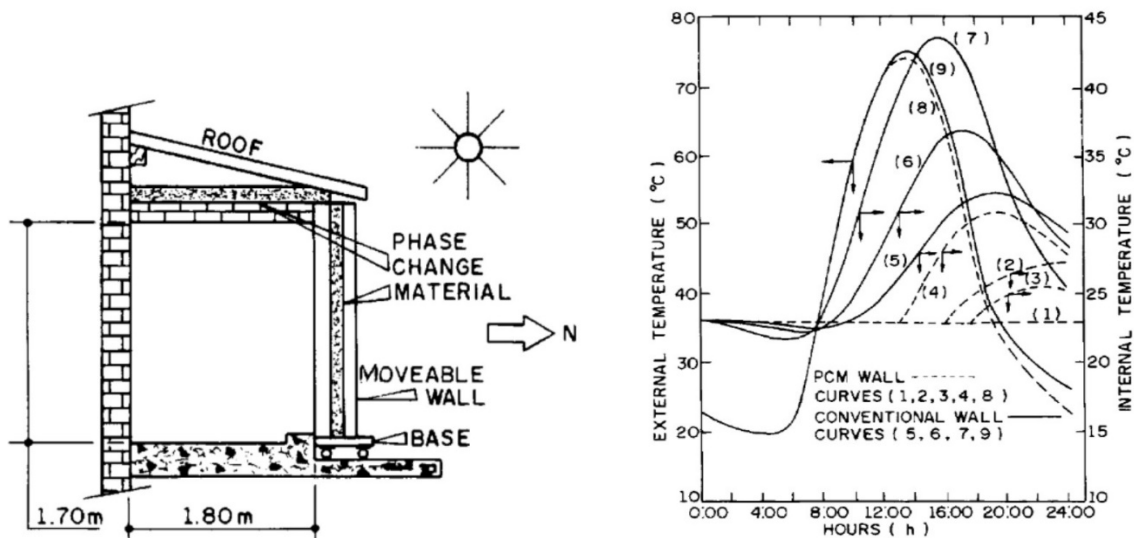


Figura 30. Inserimento di PCM nell'involucro edilizio e confronto tra una parete convenzionale ed una con PCM. Fonte: [82]

B. M. Diaconu, [84] valuta l'effetto che il modello di occupazione (quattro diversi schemi analizzati) e la ventilazione hanno sul potenziale di risparmio energetico di un sistema di un involucro con PCM. Nello specifico si è riscontrato che il modello di occupazione influenza il valore del punto di fusione del PCM; di conseguenza la scelta del valore ottimale del punto di fusione di un PCM (con il più alto potenziale di risparmio energetico) dovrebbe considerare anche il modello di occupazione. Parallelamente, la ventilazione ha ridotto il potenziale di risparmio energetico per il riscaldamento negli edifici dotati di involucro potenziato con PCM.

Un'applicazione interessante è anche rappresentata dai casi di riqualificazione energetica in clima caldo, come analizzato da Ascione et. al. [80] che esaminano applicazioni adatte all'attivazione estiva, le quali, pertanto, non raggiungono la temperatura di fusione durante l'inverno. Ciò allo scopo di capire se le prestazioni energetiche di un edificio possano essere penalizzate da alti livelli di isolamento in climi tipici, come quelli mediterranei, piuttosto critici durante i periodi caldi. In particolare, in questo caso, si osserva che la scelta di un PCM sarà dipendente sia dai carichi interni, ma molto dalle condizioni climatiche, dal tipo di utilizzo dell'edificio e dai parametri di progettazione.

Infine il volume del PCM deve essere selezionato in modo che tutta la sua massa possa essere sciolta e congelata completamente durante un ciclo giornaliero a cambiamento di fase. In generale, la soluzione tecnologica da adottare dipende sia dall'intensità che dalla durata della radiazione solare, nonché dalle condizioni climatiche globali.

Questi materiali, opportunamente impiegati, rappresentano un'interessante sistema per attenuare le fluttuazioni giornaliere della temperatura ambiente mediante la riduzione dei picchi di temperatura interna, e, quindi, dei consumi energetici necessari alla climatizzazione degli ambienti.

7.2.3 Aerogel

Sebbene siano stati scoperti già nei primi anni '30, gli aerogel sono tra i nuovi più promettenti materiali isolanti ad alte prestazioni per possibili applicazioni in edilizia, tuttavia ad oggi la disponibilità in commercio per applicazioni edili appare piuttosto limitata, per via probabilmente del prezzo sul mercato ancora abbastanza elevato. Gli aerogel sono, in termini semplici, gel essiccati con una porosità eccezionalmente elevata. Furono scoperti da Kistler nei primi anni '30, il quale ipotizzò che fosse possibile eliminare la parte liquida da un gel per ottenere una struttura solida delle stesse dimensioni del gel bagnato ed hanno trovato applicazioni in vari settori (come ad esempio quello aerospaziale) grazie a qualità come bassa densità, elevata leggerezza, ottime proprietà di isolamento termico ed elettrico e buone proprietà di isolamento acustico, oltre al vantaggio di non avere formazione di rifiuti pericolosi dal ciclo di produzione.

Queste caratteristiche hanno origine essenzialmente dal fatto che vengono essiccati mediante essiccazione supercritica. Di conseguenza, mantengono la texture porosa dello stato umido, risultando perciò caratterizzati da una superficie specifica elevata, una densità apparente molto bassa e un indice di rifrazione basso.

Questa struttura permette loro di avere una conducibilità termica inferiore all'aria ($\sim 0,01-0,02$ W/mK). Nella Tabella 14 di seguito sono riportate le principali caratteristiche degli aerogel silicei.

Nel 1970 venne introdotta la chimica del Sol-Gel, tutt'oggi applicata per i più tradizionali aerogel, che in termini generali prevede due fasi fondamentali: la prima relativa alla formazione del gel bagnato, la seconda all'essiccamento del gel per l'ottenimento dell'aerogel; tali processi hanno il vantaggio di evitare la formazione dei sottoprodotti indesiderati (sali).

La sintesi di un aerogel a base di silice, il più diffuso, può essere suddivisa in tre fasi generali: preparazione del gel mediante il suddetto processo sol-gel, invecchiamento del gel nella sua soluzione madre per evitare che il gel si restringa durante l'asciugatura e essiccamento del gel in condizioni speciali per prevenire il collasso delle strutture del gel [85].

Tabella 14. principali caratteristiche degli aerogel silicei. Fonte: (86)

Diametro principale dei pori	~ 20 nm
Diametro delle particelle primarie	2-5 nm
Densità apparente	0.003-0.35 g/cc
Area superficiale interna	600-1000 m ² /g
% solido	0.13-15%
Indice di rifrazione	1-1.05
Conducibilità termica	0.017-0.0042 W/mK
Tolleranza termica	fino a 500°C
Coefficiente di dilatazione termica	$2-4 \times 10^{-6}$
Modulo di Poisson	0.2
Modulo di Young	106-107 N/m ²
Resistenza a trazione	16 kPa
Tenacità a frattura	0.8 kPa*m ^{1/2}

Se da un lato l'elevata porosità (i micro pori della dimensione di poche decine di nanometri occupano fino al 99,9% del volume totale) consente di avere un materiale dalle proprietà fisiche, termiche, ottiche e acustiche uniche, essa è anche responsabile delle scarse proprietà meccaniche dello stesso, motivo per cui gli aerogel sono tipicamente incorporati in una matrice di fibre più forti meccanicamente e più resistenti come fibre non tessute, vetro, fibre minerali o carbonio, per migliorarne la resistenza complessiva.

Gli aerogel di silice rappresentano pertanto un'alternativa innovativa all'isolamento tradizionale grazie alle ottime prestazioni termiche, sebbene, come si è detto, i costi del materiale rimangono elevati per un settore sensibile alla fattibilità economica come l'edilizia.

Attualmente, è possibile individuare due diversi macro gruppi di applicazioni nel settore edile: l'impiego come materiali isolanti che, quindi, sfruttano prevalentemente le elevate prestazioni termiche degli aerogel di silice (sotto forma di pannelli, rotoli, integrato agli intonaci) e l'impiego come materiali isolanti traslucidi introducendo nei sistemi vetrati soluzioni a base di aerogel granulare o aerogel monolitico trasparente.

Al primo macro segmento appartengono film e pannelli isolanti comunemente reperibili in commercio. Nel caso di impiego in riqualificazioni energetiche di edifici preesistenti, alle eccezionali proprietà termiche che garantiscono la possibilità di buone prestazioni si associa l'importante vantaggio degli spessori ridotti.

La conducibilità termica dei pannelli di aerogel attualmente reperibili sul mercato è di circa 0,015 W/mK.

Altra applicazione che trova spesso impiego nella riqualificazione di edifici di pregio storico o artistico è l'intonaco additivato con aerogel, che ha il grande vantaggio di essere di semplice applicazione e di poter

seguire forme irregolari, consentendo di creare uno strato continuo di isolamento termico anche in condizioni non planari.

Questa tipologia di intonaci ha anche il pregio di essere idrorepellente, grazie alla natura idrofobica dell'aerogel, mentre risultano permeabili al vapore acqueo e più traspiranti rispetto agli intonaci convenzionali. La conducibilità termica assume valori inferiori a $0,03 \text{ W/mK}$ al variare della percentuale in volume di aerogel.

Al secondo caso invece appartengono le applicazioni in infissi super isolanti, grazie alle interessanti proprietà ottiche, con valori di trasmittanza U inferiori a $1 \text{ W/m}^2\text{K}$, buoni valori di trasmissione della luce ma valori di g (fattore solare) non troppo elevati (

Figura 31a).

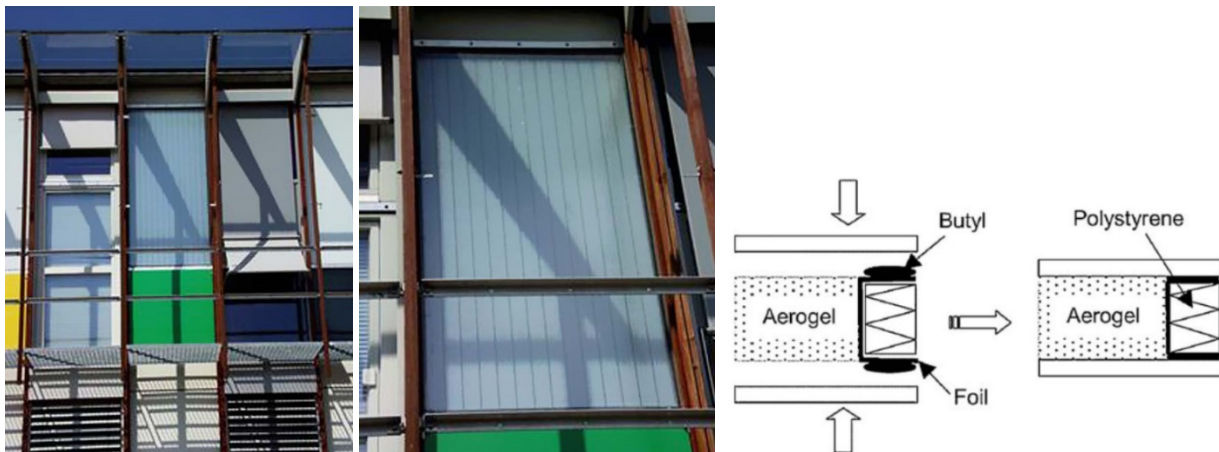


Figura 31. a. Immagine dell'infisso super isolato con aerogel, integrato nella facciata dell'edificio ZAE di Würzburg (2000). Fonte: [87] b.Sezione di un infisso con strato in aerogel. Fonte: [88]

Il progetto HILIT+ (Highly insulating and light transmitting aerogel glazing for super insulating windows) [89] dell'Unione Europea, finalizzato ad un'ottimizzazione del processo dell'aerogel ha visto lo studio di soluzioni ottimizzate di infissi, analizzando lo stato dell'arte, soluzioni di telai all'avanguardia, monitorando costantemente fenomeni di condensa [88]. La sezione rappresentata in

Figura 31b è relativa ad un infisso sviluppato in combinazione con la tecnologia del sottovuoto, applicando una pressione compresa tra 1 e 10 mbar. Sono stati misurati un coefficiente di U_w di $0,66 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ e un T_{sol} di oltre 0,85 per una vetrata con aerogel di spessore 13,5 mm, mentre si è misurata una riduzione del rumore pari a 33 dB. Si è anche osservato come l'aumento dello spessore dell'aerogel a 20 mm ridurrebbe ulteriormente il valore U a circa $0,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$.

In conclusione, allorché si riuscirà ad abbattere i costi economici ed ambientali della produzione di questo materiale, sicuramente esso rappresenterà una validissima alternativa non solo agli isolanti tradizionali grazie alle sue ottime proprietà termiche ed allo spessore contenuto, ma la sua potenzialità va anche ricercata nelle proprietà di traslucenza e buona trasparenza.

7.2.4 VIP (Vacuum Insulation Panel) – isolanti sottovuoto

Tra i materiali super-isolanti (SIM) più comuni e performanti oggi sul mercato troviamo i pannelli per isolamento sottovuoto (VIP), costituiti da un materiale interno poroso sottovuoto sigillato all'interno di un involucro multistrato. La sottrazione di aria dall'interno dei pannelli comporta una riduzione della trasmissione di energia per conduzione termica, irraggiamento e convezione, e una conseguente elevata capacità isolante. Il nucleo centrale, poroso, può essere realizzato con vari materiali come ad esempio, gommapiuma, polistirolo, poliuretano, vetroresina trattata termicamente e poi pressata o polvere minerale pressata (acido silicico microporoso), più recente è anche l'impiego delle fibre di formaldeide melaminica.

Il nucleo viene poi sigillato con un involucro in materiale multistrato tipo alluminio, nylon, polietilene ecc. al fine di ottenere un pannello impermeabile e resistente alla pressione del sottovuoto. I vuoti interni devono

avere dimensioni di circa 100 nanometri, per inibire la conduttività termica dell'aria e il trasferimento di calore. Il nucleo del VIP determina le caratteristiche meccaniche dell'intero pannello.

La bassissima conduttività termica, da 5 a 10 volte inferiore rispetto ai materiali isolanti tradizionali, consente di ottenere eccellenti prestazioni termiche con spessori ridotti.

L'involucro esterno del VIP non ha solo un ruolo di protezione del nucleo e di mantenimento del vuoto, deve avere una duplice efficacia in termini di permeabilità all'aria ed al vapore acqueo; infatti, se aria e vapore dovessero entrare nel VIP comprometterebbero le sue proprietà termiche. La scelta del metodo più adatto per la valutazione della permeabilità è ancora oggetto di numero studi, Heymans et al. [90].

come risultato del confronto di diversi metodi, si ritiene che il metodo manometrico risulti il più idoneo.

Relativamente all'involucro, la stratificazione prevede un layer interno che è sempre quello di tenuta tipicamente realizzato in polietilene. Segue lo strato deputato a fare da barriera per l'aria e l'acqua, principalmente realizzato in materiale laminato o foglio di alluminio. Il foglio di alluminio limita anche il trasferimento di calore per radiazione (a causa della sua bassa emissività). Lo strato esterno è lo strato protettivo: il suo scopo è appunto proteggere l'intero pannello da danni meccanici (Figura 32).

È facile intuire che uno dei focus fondamentali relativo ai meccanismi di degradazione è relativo al deterioramento degli strati metallici. Garnier et al. [91] hanno analizzato il cambiamento di cristallinità nel film in PET se sottoposto a temperature (circa 70 °C) e umidità relativa (90%) più elevate.

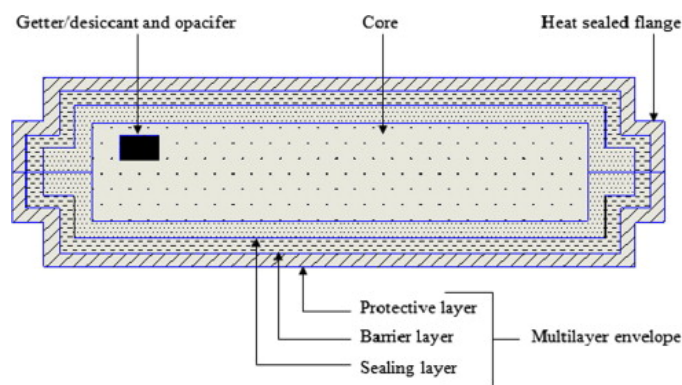


Figura 32. Schematizzazione di un isolante sottovuoto. Fonte: [92]

Ad oggi i pannelli isolanti sottovuoto più performanti sul mercato hanno un valore di conducibilità termica particolarmente basso, tra 0,002 – 0,008 W/mK.

Tuttavia, sono ancora da indagare alcuni punti come gli effetti di ponte termico tra i pannelli che, se non adeguatamente mitigati, possono compromettere le prestazioni finali e sono di difficile valutazione [93], nonché, per ovvie ragioni, l'assenza di informazioni e certezza sulla loro vita utile e sul deterioramento.

S. Charisia,[94] ha analizzato l'efficacia dell'isolamento mediante VIP, attraverso una simulazione dinamica di un modello rappresentativo di tipico edificio residenziale greco in tutte e quattro le zone climatiche della Grecia. Ha osservato come i pannelli di isolamento sottovuoto (VIP), rispetto a quelli tradizionalmente impiegati in EPS, contribuiscono in maniera importante alla riduzione del fabbisogno di energia per riscaldamento e raffrescamento dell'edificio, con uno spessore nettamente inferiore. In totale il risparmio energetico annuo può essere stimato di circa il 13,56% relativamente alla zona climatica più calda e a circa il 15% per la restante tre zone climatiche della Grecia.

L'impiego di pannelli sottovuoto in due casi di riqualificazione energetica in Spagna e in Svezia, è stato analizzato da Uriarte et al. [95]. Nello specifico i pannelli sono stati integrati ad una facciata ventilata nel caso dell'edificio di Bilbao (Figura 33), e applicati all'interno dell'edificio su struttura metallica nel caso dell'edificio di Malmö. Il consumo di energia negli edifici è stato monitorato prima e dopo la ristrutturazione, mostrando una riduzione nei consumi energetici di circa il 35% dallo stato pre-intervento. Le soluzioni sottovuoto pur sembrando promettenti, presentano ancora ampi margini di miglioramento per arrivare ad avere un prodotto robusto e affidabile sul mercato. Uno su tutti è la necessità di mantenere l'integrità del vuoto durante il processo di installazione. Per quanto riportato nell'articolo, circa il 15% dei pannelli ha perso il

vuoto durante l'installazione nell'edificio di Bilbao, a testimoniare la fragilità del sistema, e circa un 1% è arrivato sul sito già compromesso a causa di urti o tagli nel trasporto.

Inoltre la necessità di trattare i ponti termici causati dal fissaggio meccanico delle soluzioni alla facciata esistente è di grande rilevanza poiché può compromettere in modo significativo il comportamento termico complessivo della facciata, come è stato osservato con simulazioni numeriche in situ e analisi basate sui dati di progettazione della soluzione ed in fase di validazione del prototipo.



Figura 33. Dettagli sull'installazione del sistema di soluzioni di retrofitting esterno. Montaggio a parete degli elementi di fissaggio meccanico per VIP (a sinistra) e soluzione di facciata generale nel prototipo su piccola scala. Fonte: [95]

Uno dei principali ostacoli che limita l'ampia diffusione e l'applicazione di questa tecnologia accanto all'elevato costo iniziale, è appunto la fragilità che comporta qualche rischio di danni durante l'installazione legati all'eventualità di forature o tagli. Per garantire la tenuta del vuoto del pannello, le superfici esterne devono rimanere perfettamente integre, in quanto una leggera incisione sulla superficie esterna comprometterebbe la funzionalità del prodotto.

Se in molti casi è vero che i VIP risultano economicamente poco sostenibili dal punto di vista economico rispetto ai materiali isolanti tradizionali per il retrofit energetico degli edifici, generando tempi di ritorno dell'investimento molto lunghi, è anche vero che è possibile osservare alcune circostanze in cui l'impiego di VIP può diventare economicamente preferibile come riportato da S. Fantucci et. al [96] che evidenziano come la zona climatica, lo spessore dell'isolamento e l'efficienza del sistema di riscaldamento influenzano in maniera significativa la valutazione economica di un intervento con VIP.

Inoltre, ampliando le variabili da considerare nella valutazione, questi materiali risultano economicamente validi nei distretti commerciali delle grandi città o in aree in cui i valori immobiliari sono elevati. Va anche detto che, il volume totale costruito di tali distretti è piuttosto ridotto e pertanto l'impatto globale, in termini di risparmio energetico, è limitato. Un'applicazione maggiormente diffusa dei VIP sarà pertanto possibile solo riducendo i costi di produzione in maniera significativa.

7.2.5 Considerazioni finali sulle tecnologie di involucro analizzate

In un clima mediterraneo, come è quello del territorio italiano, per progettare un buon edificio a energia zero è essenziale valutare diversi aspetti in fase di progettazione, come l'orientamento e la forma, per attuare le migliori strategie passive.

È sicuramente rilevante realizzare un involucro ad elevate prestazioni, per assicurare un buon comfort sia in estate che in inverno, che, come si è visto, è possibile raggiungere attraverso diverse tecnologie consolidate sul mercato.

Tra le tecnologie a umido i blocchi in laterizio porizzati e rettificati a setti sottili hanno un buon valore di conducibilità termica (λ 0,09 W/mK) e una trasmittanza termica periodica di 0,002 W/m²K, garantendo quindi un buon comfort interno sia nella stagione invernale che in quella estiva.

La soluzione monostrato potrebbe risultare la più vantaggiosa da un punto di vista economico, per facilità di posa e per costo del materiale e, in ottica di vita utile dell'edificio, per durabilità del materiale stesso. Inoltre, essendo naturalmente un materiale traspirante, in alcuni casi in presenza di murature monostrato è possibile non ricorrere a impianti di ventilazione meccanica. D'altro canto, questa soluzione si presta per lo più alle nuove costruzioni e ha, di contro, tempi di posa più lunghi.

Un'alternativa alla soluzione monostrato è data dal blocco di laterizio accoppiato a uno strato isolante a cappotto esterno, tecnologia che viene molto utilizzata nei casi esaminati dall'Osservatorio nZEB, che si presta sia al nuovo fabbricato sia a quello esistente. In questo caso sono da valutare gli aspetti legati al tipo di materiale isolante da applicare, quali la verifica igrometrica e una valutazione economica.

Alternativa interessante è anche la soluzione monostrato in blocchi di CCAA (conduttività di 0,07 W/mK) leggeri e riciclabili al 100%.

Qualche svantaggio in più emerge dall'utilizzo di sistemi a umido che utilizzano il cemento, soprattutto in quelle pluristrato, che pertanto richiedono qualche attenzione in più in fase progettuale ed esecutiva per garantire le stesse prestazioni.

Tra le tecnologie a secco, invece, la tecnologia X-Lam abbinata a un isolante in fibra di legno risulta una soluzione valida sia nella verifica invernale che in quella estiva e interessante da un punto di vista economico, non tanto per l'economicità del pacchetto, quanto per la velocità di realizzazione, che consente di abbattere significativamente i costi di manodopera. Il legno, inoltre, è una materia prima rinnovabile e naturale, quindi può essere altrettanto una scelta sostenibile per l'ambiente.

Le facciate ventilate possono essere applicate sia su sistemi a umido che su sistemi a secco, ma potrebbero avere vantaggi esigui in rapporto costi benefici in ambito residenziale.

Non è possibile stabilire in maniera generale se sia preferibile una tecnologia massiva piuttosto che una a secco perché ciò dipende da diversi fattori, quali ad esempio il suo contesto (geo-climatico), la sua destinazione d'uso, la tipologia di intervento (ristrutturazione o nuova costruzione) nonché la sensibilità di progettista e committenza.

Il fatto che la progettazione non possa prescindere dalle condizioni al contorno, vale anche per le tipologie di materiali meno ricorrenti, per le quali si sintetizzano brevemente, di seguito, pro e contro.

Nella scelta di un materiale termoriflettente va posta attenzione al valore dell'emissività: mentre per i materiali coibenti convenzionali, il valore della conducibilità termica λ che definisce le caratteristiche isolanti di uno specifico materiale omogeneo e isotropo può essere preso a riferimento come parametro prestazionale, in un sistema multistrato disomogeneo ed anisotropo è necessario effettuare test in situ per caratterizzare correttamente l'insieme, definendo una Resistenza termica complessiva di sistema, la cui metodologia di calcolo più opportuna è, come si è detto, ancora oggetto di approfondimenti. Orientativamente è possibile trovare sul mercato dei pannelli la cui resistenza può variare, a seconda dello spessore e dell'applicazione (pavimento, parete, intercapedine, soffitto), da circa 1,00 a circa 6,00 m² K/W. Ragionamento analogo vale per la valutazione del coefficiente di diffusione del vapore μ che risulta fortemente variabile, da un valore che si aggira attorno a 1700 fino al comportamento di perfetta barriera. I materiali multistrato termoriflettenti grazie alla flessibilità, presentano ottime caratteristiche di lavorabilità e un'elevata semplicità di messa in opera, garantiscono una certa reversibilità di intervento. Risultano pertanto adatti sia in caso di nuove realizzazioni che di riqualificazione di edifici.

Gli isolanti a base di aerogel presentano una conducibilità termica molto bassa (λ 0,013-0,015 W/mK) e ad oggi probabilmente risultano i più performanti. A differenza dei PCM hanno il vantaggio di un ampio intervallo di temperatura d'impiego (200 a +200 °C), oltre a possedere ottimi caratteristiche in termini di idrofobia, traspirabilità e resistenza ai raggi UV. Presentano anche un buon mantenimento delle prestazioni nel tempo. Principale limite ancora una volta è rappresentato dal prezzo elevato sul mercato e da una "polverosità" in fase di posa in opera che si associa anche ad un effetto "essiccante", dovuto alla sua natura igroscopica, che per manipolazioni prolungate potrebbe essere un problema.

Per i PCM, fermo restando le ottime proprietà termofisiche (conduttività termica elevata, buon trasferimento termico, valori elevati di densità e di calore specifico), vale quanto detto per i sistemi multistrato, ovvero è difficile riferirsi ad un valore di λ indicativo, dal momento che esistono diverse tipologie di materiale con conducibilità variabile. Tuttavia, possiamo dire che è importante che la scelta sia guidata da tipo di utilizzo e intervallo della temperatura operativa. Infatti, il tipo di materiale va selezionato in base alle variazioni termiche tra interno ed esterno specifiche del caso, perché la temperatura di cambiamento di fase deve ricadere all'interno del range operativo di temperatura desiderato. Sebbene anche in questo caso il costo sia ancora abbastanza elevato, è importante tenere a mente anche alcune proprietà ambientali fondamentali come la bassa energia incorporata, la potenzialità di riciclo e il basso impatto ambientale che possono rientrare a tutti gli effetti nei requisiti di una progettazione in direzione ZEB.

Relativamente ai sistemi sottovuoto è possibile trovare in commercio pannelli di spessore estremamente contenuto (un paio di cm) ma con valori di λ di circa 0,003-0,005 W/mK. Ancora una volta lo spessore contenuto è vincente specialmente in caso di riqualificazioni energetiche. Tuttavia oltre al già citato costo elevato, presentano una problematica di fragilità, incertezza riguardo la durabilità oltre che qualche interrogativo relativamente alla soluzione di ponti termici tra pannello e pannello. Quanto sopra brevemente riassunto è sintetizzato nella Tabella 15.

Tabella 15: confronto qualitativo materiali isolanti

	PRESTAZIONI	VERSATILITÀ	SEMPLICITÀ DI INSTALLAZIONE	DURABILITÀ	CONVENIENZA
Lana Di Roccia	●●○○	●●●●	●●●○	●●●○	●●●●
Polistirene Espanso (Eps)	●●●○	●●●●	●●●○	●●●○	●●●○
Polistirene Espanso Estruso (Xps)	●●●●	●●●●	●●●○	●●●○	●●●○
Fibre Naturali	●●●○	●●●○	●●●○	●●●○	●●●○
Multistrato Termoriflettente	●●●●	●●●●	●●●●	ND	●●○○
Aerogel	●●●●	●●●●	●●○○	ND	●○○○
Materiali a cambiamento di fase (PCM)	●●●●	●●●○	●●○○	ND	●○○○
Pannelli isolanti sottovuoto (VIP)	●●●●	●●○○	●○○○	ND	●○○○

Scarso ●○○○

sufficiente ●●○○

buono ●●●○

ottimo ●●●●

8 Tecnologie di impianto negli ZEB

La necessità di ridurre i fabbisogni energetici degli edifici ha portato, negli anni, alla definizione dei concetti di nZEB e, infine, di ZEB, ampiamente discussi nel Capitolo 5.

Se si accetta la definizione di ZEB come “edificio residenziale o terziario con una richiesta di energia molto esigua e tale da poter essere soddisfatta dalla produzione di energia da fonti rinnovabili in sito” [27], risulta chiara la sfida che questa tipologia di edifici pone: il costante bilancio fra fabbisogno energetico e produzione di energia in loco.

Per realizzare edifici ZEB, occorre una progettazione integrata, in grado di contemplare soluzioni architettoniche e tecnologie in grado di garantire l’autosufficienza energetica dell’edificio stesso.

Per questo motivo, gli edifici ZEB devono poter essere considerati come “isole autosufficienti”, ovvero in grado di produrre energia in modo da uguagliare, ed auspicabilmente eccedere, il suo utilizzo.

Per ovvie ragioni, la progettazione di un siffatto edificio pone nuovi e sfidanti obiettivi, primo tra tutti la necessità di contrastare l’inevitabile sfasamento tra la produzione di energia ed il suo consumo. A titolo di esempio, basti pensare che la maggior richiesta di energia si attesta nelle ore serali, mentre la produzione di energia per esempio da solare fotovoltaico risulta maggiore durante il giorno.

Una possibile soluzione è quella di sfruttare la rete elettrica come “sistema di accumulo”, ovvero di immettere l’eccesso di energia prodotta, salvo poi prelevare energia quando la produzione è inferiore al fabbisogno.

Il bilancio che si va a delineare deve prevedere dei precisi volumi di controllo, una possibile definizione dei quali è sinteticamente espressa nella figura che segue (Figura 34), in cui sono incluse anche le pertinenze dell’edificio.

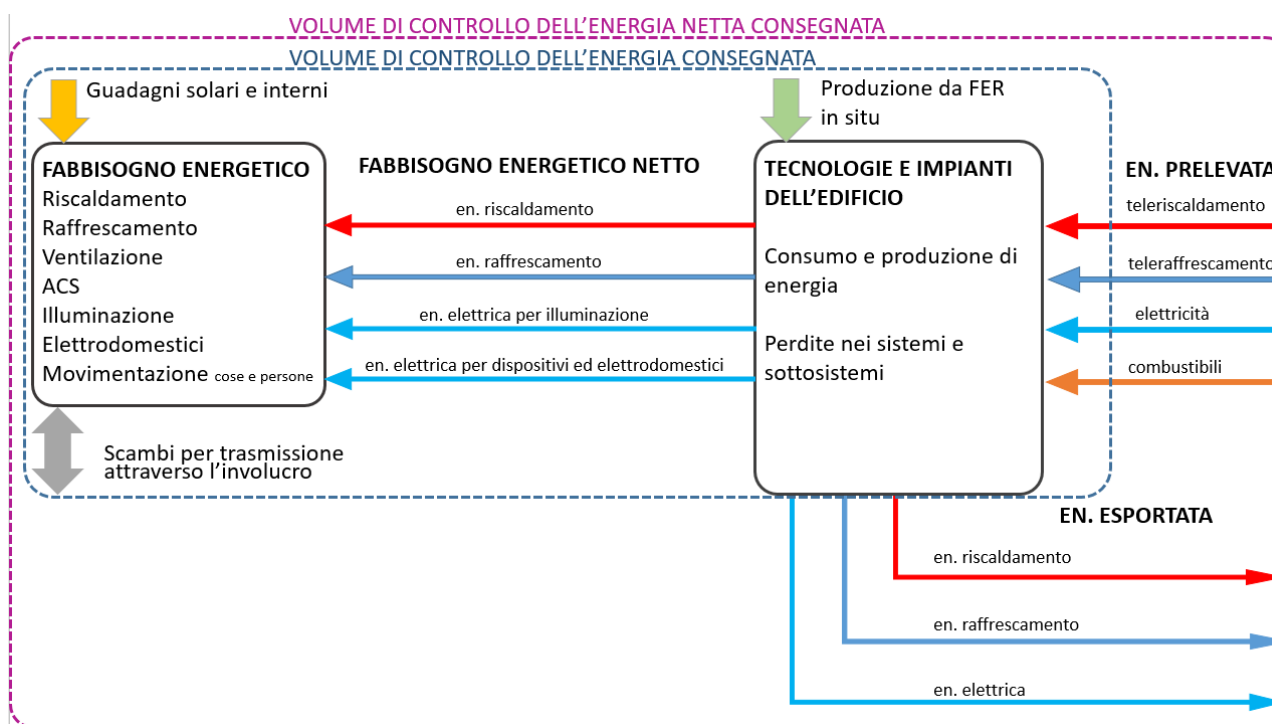


Figura 34. Volume di controllo dell’edificio e delle pertinenze ai fini degli scambi energetici (fonte: rielaborazione ENEA da [97])

La Figura 34 mostra un’altra importante necessità, particolarmente stringente per gli ZEB: quella di avere impianti meccanici diversificati ed efficienti in grado di sopperire ai fabbisogni dell’edificio stesso.

La dicitura “impianti meccanici” è volutamente riferita alla necessità, di tali soluzioni, di assolvere e superare le funzioni dei classici “impianti termotecnici”, sfidando ed integrando le più recenti evoluzioni tecnologiche. L’obiettivo di tali impianti è quello di garantire le attività dell’uomo (siano esse legate alle esigenze abitative o produttive), garantendo al contempo il soddisfacimento dei requisiti di comfort. Ovviamente, gli impianti

a servizio di un edificio del settore terziario sono diversi rispetto a quelli di un edificio residenziale. Tuttavia, le peculiarità e complessità impiantistiche sono basilarmente simili. Ecco perché, nel proseguo, ci si riferirà in maniera indistinta al concetto di edificio, e meglio, a quello di edificio-impianto (Figura 35), prescindendo dalla loro natura intrinseca, ma con l'intento di analizzare le naturali interazioni che tra essi si instaurano.

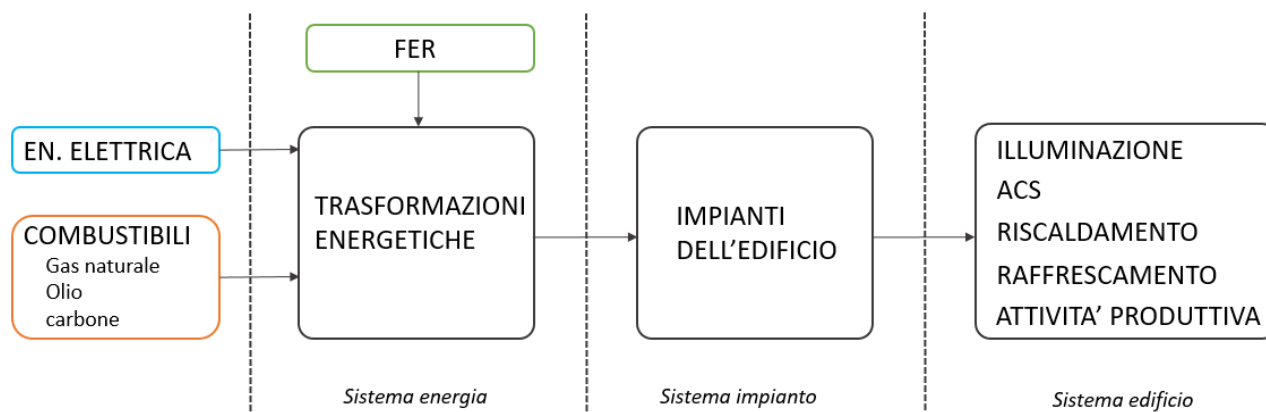


Figura 35. Definizione del sistema edificio-impianto (fonte: rielaborazione ENEA da [97].

Brevemente, è opportuno ricordare che si considerano come FER in situ (ovvero all'interno del confine blu della Figura 34) le seguenti:

- Energia solare captata da collettori solari;
- Energia solare captata da pannelli fotovoltaici;
- Energia Elettrica prodotta da micro generatori eolici;
- Energia aerotermica, geotermica o idrotermica utilizzata tal quale o avviata alle pompe di calore.

Per calcolare l'energia termica ed elettrica prodotta on site, si seguono le indicazioni della UNI TS 11300:4 (e si considera l'energia termica immessa a valle del generatore, in modo da ridurne il fabbisogno complessivo). Per quanto riguarda l'energia prelevata dalle sorgenti calde per le pompe di calore (aria, suolo o acqua), essa è rivalorizzata e valutata mediante l'efficienza della macchina stessa.

Complessivamente, l'energia elettrica prodotta in situ da fonte rinnovabile si sottrae al fabbisogno di energia elettrica, riducendo annullando o superando il fabbisogno complessivo dell'edificio.

Laddove tale energia rinnovabile sia impiegata per più di un servizio (es. climatizzazione invernale e produzione di ACS), essa viene ripartita in ragione del fabbisogno termico a monte della distribuzione dei servizi stessi.

Appare evidente che per ridurre il dispendio energetico di un edificio bisogna far sì che i componenti di impianto siano efficienti. Requisiti minimi possono, ad esempio, essere applicati per nuove installazioni o sostituzioni di impianto, con particolare riferimento a:

- impianti di riscaldamento;
- impianti di produzione di ACS;
- impianti di condizionamento d'aria;
- grandi impianti di VMC.

Riguardo quest'ultimo punto, risulta essenziale per il raggiungimento degli obiettivi ZEB integrare delle soluzioni che garantiscano il ricambio dell'aria per fini sanitari senza aggravare in maniera significativa il bilancio energetico, ovvero recuperando, per quanto possibile, l'energia termica dei flussi d'aria in emissione [98]

8.1 Tipologie di impianti di climatizzazione

Risulta difficile, se non impossibile, identificare una o più "soluzioni impiantistiche tipo" da poter applicare agli edifici ZEB.

Questo perché le differenti condizioni climatiche dei possibili siti di realizzazione di un edificio ZEB, anche solo considerando il contesto italiano, impediscono un lavoro di uniformazione. Del resto, l'impianto deve garantire le condizioni di comfort interno posto che siano soddisfatti i fabbisogni termici dell'edificio stesso), che a loro volta dipendono da fattori geometrici, di esposizione ai venti, dalle caratteristiche dei materiali impiegati per la realizzazione dell'involucro (opaco e trasparente) e così via.

Una trattazione più ampia e approfondita esula dagli scopi del presente report, che mira piuttosto a fornire una panoramica sui possibili impianti, sulle differenti tipologie e sulla loro maggiore eleggibilità ad essere asserviti ad edifici ZEB. Per questo motivo, nei paragrafi che seguono, saranno dati cenni sui sistemi di climatizzazione e sui tipi di generatore che meglio si prestano alla climatizzazione di un ZEB.

La classificazione degli impianti può essere fatta in relazione al tipo di grandezza che sono in grado di controllare. In via generale, si può dire che il condizionamento si riferisce alla possibilità, di un impianto, di garantire il controllo termo-igrometrico dell'ambiente e di poterne controllare purezza e velocità dell'aria all'interno. In riferimento alla tabella che segue (Tabella 16), si distinguono gli impianti di riscaldamento (che operano il controllo della temperatura in inverno), gli impianti di climatizzazione (che operano il controllo della temperatura sia in inverno che in estate) e gli impianti autonomi (che consentono una gestione autonoma della temperatura ma in determinati locali o ambienti).

Un discorso a parte va riservato alle pompe di calore, che, in alcune soluzioni, riescono ad operare la climatizzazione tramite modalità autonoma (es. monosplit).

Tabella 16. Classificazione degli impianti.

	TEMPERATURA		UM. RELATIVA		PUREZZA ARIA		VELOCITA' ARIA	
	INVERNO	ESTATE	INVERNO	ESTATE	INVERNO	ESTATE	INVERNO	ESTATE
RISCALDAMENTO	✓							
CLIMATIZZAZIONE	✓	✓						
AUTONOMI	✓*	✓*						
CONDIZIONAMENTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
*: solo in alcuni locali								

Le componenti principali di un impianto di climatizzazione sono:

- sistema di produzione dell'energia;
- sistema di trasporto/distribuzione;
- sistema di regolazione;
- sistema di erogazione.

La buona progettazione di un impianto, pertanto, permette di evitare sovradimensionamenti (o sottodimensionamenti) dei vari sistemi, al fine di garantire il massimo rendimento di ciascuno di essi.

Per vie generali, stanti le componenti di impianto appena elencate, possiamo classificare gli impianti in relazione a:

- tipo di generatore di calore (ovvero in ragione della fonte energetica - gas, gasolio, energia elettrica);
- tipo di fluido termovettore (ovvero acqua, aria, misto);
- tipo di terminali di impianto (radiatori, termoconvettori, ventilconvettori, pannelli radianti, travi radianti, etc).

La Figura 36 illustra in maniera sintetica quali sono le tipologie di sistemi e di relativi terminali. L'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento (in cui ricadono i sistemi centralizzati, di teleriscaldamento e anche quelli autonomi) sono abbinati a sistemi idronici e diversi possibili terminali (ventilconvettori, pannelli o radiatori).

Per quanto concerne la climatizzazione, si dispone di sistemi a tutta aria o misti (aria-acqua). Nel primo caso, si possono realizzare sistemi monocondotto o a doppio canale, nel secondo i terminali di impianto sono molteplici, potendo scegliere tra induttori, ventilconvettori, pannelli radianti o travi radianti.

RISCALDAMENTO e/o RAFFRESCAMENTO <i>Centralizzati Teleriscaldamento Autonomi</i>	SISTEMI IDRONICI	CON VENTILCONVETTORI CON PANNELLI CON RADIATORI
	SISTEMI A TUTTA ARIA	MONOCONDOTTO • portata costante • portata variabile (VAV) DOPPIO CANALE
	SISTEMI MISTI ARIA-ACQUA	CON INDUTTORI CON VENTILCONVETTORI CON PANNELLI RADIANTI CON TRAVI RADIANTI

Figura 36. Classificazione generale degli impianti per tipologia di fluido termovettore e terminali di impianto

8.1.1 Sistemi idronici

Il fluido termovettore è in questo caso l'acqua, che in ragione del tipo di terminale sarà erogata a temperatura più o meno elevata. In particolare, per la distribuzione dell'acqua si possono avere [99]:

- Circuiti a circolazione naturale;
- Circuiti a circolazione forzata mediante delle pompe, ovvero:
 - Circuiti di sola mandata;
 - Circuiti di mandata e ritorno
- Circuiti monotubo;
- Circuiti primario e secondario.

8.1.2 Sistemi a tutta aria

Se il fluido termovettore è l'aria, si parla di impianto di termoventilazione.

Il tipo di distribuzione può essere a tubi monocondotto o a doppio canale, ed i veri e propri terminali di impianto (bocchette di mandata o diffusori) devono essere posizionati negli ambienti già in fase di progetto di impianto. La regolazione degli impianti a tutta aria può essere esercitata variando la temperatura di immissione dell'aria (mantenendo la portata costante) oppure variando la portata dell'aria (VAV), come anche schematizzato in Figura 36.

La difficoltà di questa soluzione impiantistica è legata alla geometria degli spazi e all'eventuale poco spazio disponibile per la canalizzazione, sia essa il canale di mandata o di ripresa dell'aria dagli ambienti.

Per via delle caratteristiche intrinseche di questo sistema, gli impianti a tutt'aria si prestano per il condizionamento di grandi ambienti (cinema, sale congressi, teatri, etc).

Una panoramica generale delle funzioni svolte dagli impianti aeraulici è raccolta in Tabella 17.

I sistemi aeraulici sono spesso provvisti di UTA e/o di recuperatori di calore, al fine di operare una regolazione più fine ed energeticamente efficiente delle condizioni termo-igrometriche.

Tabella 17. Funzioni svolte dagli impianti aeraulici [100]

	FILTRAZIONE	RISCALDAMENTO	RAFFRESCAMENTO	UMIDIFICAZIONE	DEUMIDIFICAZIONE	DEUMIDIFICAZIONE OPZIONALE
CLIMATIZZAZIONE	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CLIMATIZZAZIONE INVERNALE	✓	✓		✓	✓	✓
	✓	✓	✓	✓		
CLIMATIZZAZIONE ESTIVA	✓		✓	✓	✓	
	✓		✓		✓	
TERMO-VENTILAZIONE	✓	✓	✓			
TERMOVENTIL. INVERNALE	✓	✓				
TERMOVENTIL. ESTIVA	✓		✓			
VENTILAZIONE	✓			✓		✓
	✓	✓		✓		
	✓		✓	✓		✓
	✓					

8.1.3 UTA (Unità di Trattamento Aria)

È un sistema in grado di fornire aria a determinate condizioni di temperatura e umidità, dopo averla fatta transitare in sezioni di scambio (batterie alettate) in cui circola acqua calda (in caso si debba realizzare climatizzazione invernale) o acqua fredda (climatizzazione estiva).

L'aria così trattata viene poi avviata, tramite un ventilatore, agli ambienti.

Se gli spazi da climatizzare sono molto ampi, o hanno destinazioni d'uso o impieghi differenti, è possibile ricorrere all'installazione di più UTA, dividendo la distribuzione per zone termicamente omogenee.

8.1.4 Sistemi misti aria-acqua

I sistemi misti aria-acqua consentono una maggiore flessibilità di uso a scapito di una maggiore complessità impiantistica, ma permettono di distribuire portate d'aria di rinnovo negli ambienti controilanciando, attraverso ventilconvettori, l'energia termica estratta. Per far ciò, sono infatti necessari sia la rete ad acqua che la rete ad aria. Quest'ultima, tuttavia, prevede dei canali d'aria (aria primaria) di dimensioni inferiori rispetto ai sistemi a tutta aria, in quanto, in questo caso, le sezioni possono essere ridotte poiché si deve prelevare dagli ambienti una frazione di aria da rinnovare (i.e. 0,5 vol/h).

In questo tipo di sistemi, è l'aria immessa che permette la regolazione in velocità e umidità, mentre la temperatura è controllata dai singoli terminali, che dispongono di una sezione (batteria) di scambio termico in cui fluisce acqua. Proprio per questo motivo, i sistemi misti sono preferibili in edifici caratterizzati da tanti piccoli ambienti (come le aule scolastiche, gli uffici, etc) in modo da garantire ai singoli utenti possibilità di regolazione e dunque di comfort.

8.1.5 Le tecnologie più promettenti: le pompe di calore

Ai fini della realizzazione di un edificio ZEB, è importante che il sistema impiantistico sia sostenibile ed efficiente, e quanto più flessibile per rispondere alle esigenze del conduttore.

All'interno del vasto panorama dei tipi di generatore, è indispensabile individuare una o più tecnologie "vincenti", in grado cioè di soddisfare i requisiti appena espressi.

Pertanto, tra i tipi di caldaie, quelle a gas naturale sono indubbiamente quelle che meglio si prestano allo scopo. Tuttavia, le pompe di calore risultano costituire la tecnologia che meglio risponde alle caratteristiche di sostenibilità ed efficienza. Del resto, anche l'attenzione nazionale e la strategia del PNIEC [2] mira ad una maggiore elettrificazione degli edifici per la climatizzazione.

Pertanto, in Figura 37 è riportato un elenco di soluzioni che si ritiene più vantaggioso impiegare negli edifici ZEB, considerato il focus del report, e la migliore selezione (evidenziata con tratteggio).

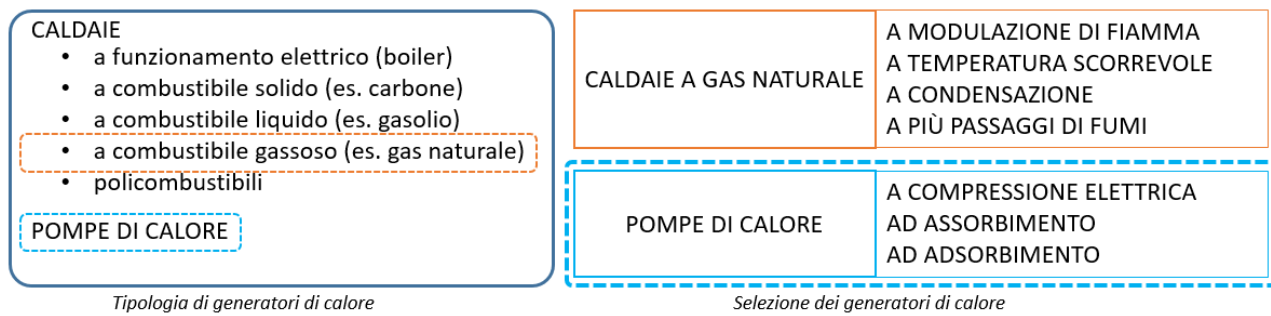


Figura 37. Selezione dei sistemi di climatizzazione per tipologia di generatore di calore

La pompa di calore è una macchina capace di trasferire calore da un sistema ad una certa temperatura ad un sistema a temperatura superiore, a spese di un lavoro esterno, come schematicamente illustrato in Figura 38. Così facendo, si utilizza per il riscaldamento l'energia ottenuta dal raffreddamento di un qualsiasi sistema più freddo di quello da riscaldare.

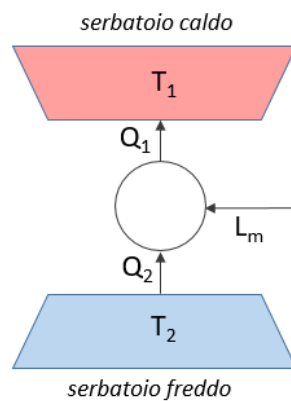


Figura 38. Diagramma a blocchi di funzionamento di una pompa di calore

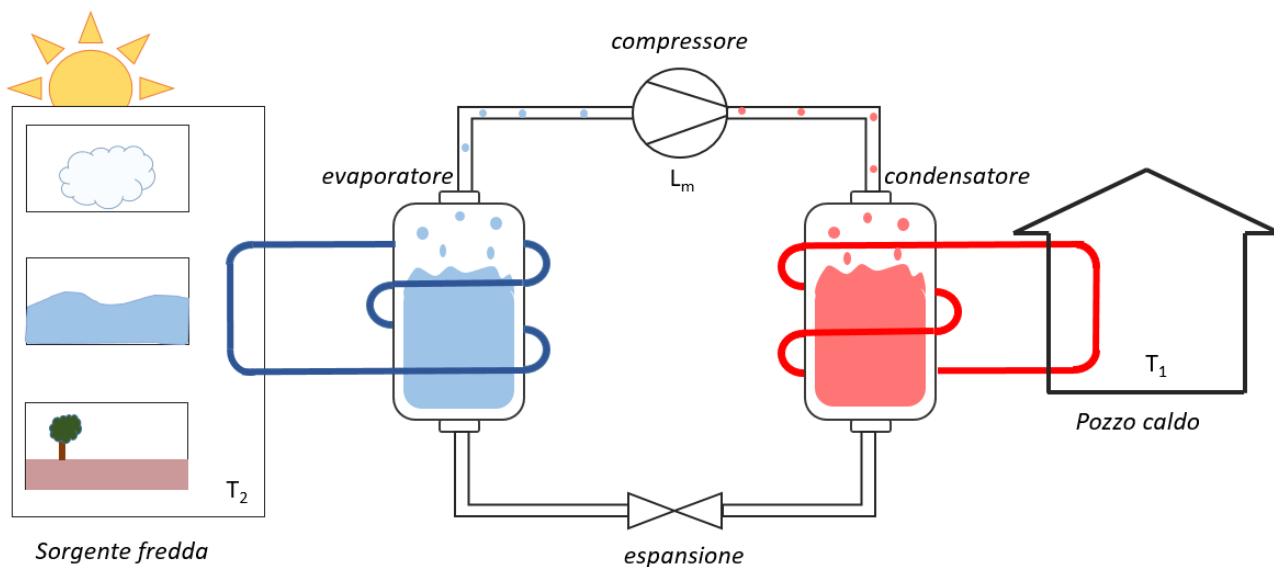


Figura 39. Principio di funzionamento di una pompa di calore

I componenti principali di una pompa di calore sono (Figura 39):

- Un pozzo o sorgente fredda a temperatura T_2 , da cui prelevare calore Q_2 ;
- Un evaporatore;

- Un compressore (che è la macchina cui fornire il lavoro esterno L_m);
- Un condensatore, che mette a disposizione il calore Q_1 ;
- Un edificio/sistema da climatizzare a temperatura T_1 (pozzo o serbatoio caldo).

L'evaporatore assorbe calore dalla sorgente fredda, che può essere costituita da aria, acqua (di lago, di fiume, di mare, di falda) o dal terreno (Figura 40).

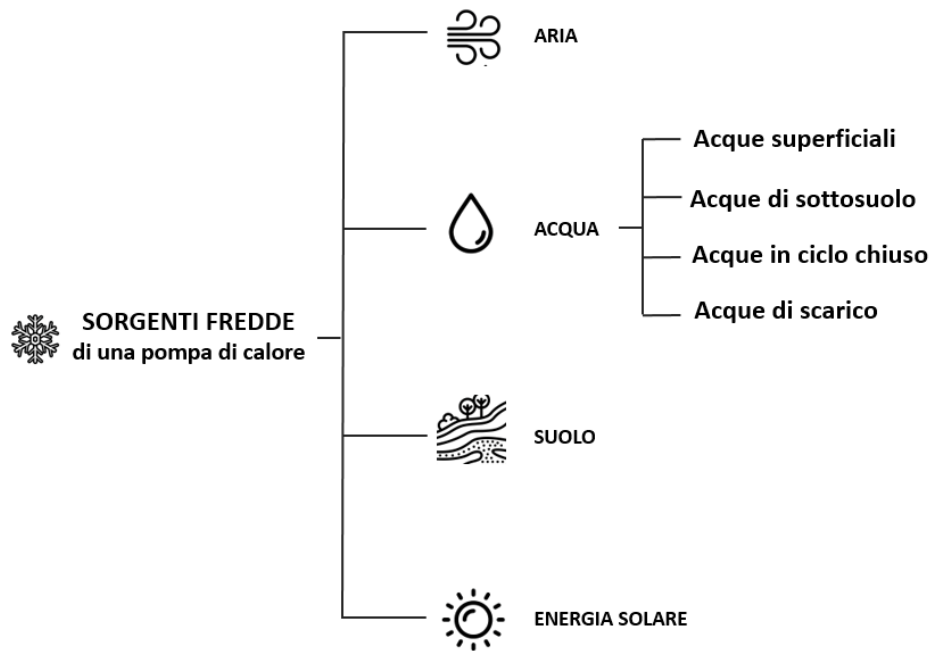


Figura 40. Possibili sorgenti fredde per impianti a pompa di calore (elaborazione ENEA da [99])

Per una trattazione dettagliata e completa delle diverse tipologie di pompe di calore, dei componenti che la realizzano e dei cicli termodinamici si rimanda al “Manuale del Termotecnico” di Rossi [99].

Le pompe di calore possono essere utilizzate sia in inverno sia in estate, prevedendo però una “inversione” che può essere operata sul ciclo o sull'impianto.

Le pompe di calore concorrono alla produzione di energia da FER per l'edificio in cui sono installate. È chiaro che non tutta l'energia termica (Q_1) che la pompa di calore mette a disposizione può essere considerata rinnovabile, ma solo il contributo (pari a Q_2) che viene prelevato dall'ambiente. Se l'energia L_m necessaria per far funzionare la pompa di calore provenisse da fonte rinnovabile (come ad esempio il fotovoltaico), allora la pdc diventerebbe un impianto totalmente rinnovabile.

Definito il coefficiente di prestazione stagionale (SPF) (dato dal rapporto tra l'energia utile resa disponibile in una stagione di riscaldamento e l'energia elettrica richiesta per l'azionamento della pdc), si avrà:

$$SPF = \frac{Q_C}{L} \quad \text{Eq. 2}$$

$$Q_{REN} = Q_C - L = Q_C \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad \text{Eq. 3}$$

Quindi la quota rinnovabile (ed incentivata dal DLgs 28/11) è pari a Q_{REN} .

Appare evidente che le nuove tecnologie per le pompe di calore devono integrare quanto più possibile dei sistemi per la produzione di energia elettrica da consumare per l'alimentazione del compressore e degli

organi di funzionamento di una pompa di calore, anche ricorrendo ad accumuli elettrici. Analogamente, è opportuno sfruttare al massimo la possibilità di accumulo termico.

Una grande possibilità è attualmente fornita dalle pompe di calore elioassistite, in cui la sorgente fredda è l'acqua riscaldata da collettori solari.

C'è da attendersi, comunque, che il futuro delle pompe di calore vedrà sempre più l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili (FER), anche e specialmente in ottica ZEB.

Pertanto, come mostrato in Figura 41, sicuramente saranno realizzate e troveranno impiego pompe di calore con possibilità di accumulo termico, che possano provvedere in maniera efficiente anche alla ventilazione degli ambienti, e che ricorrano all'utilizzo di energia elettrica da fotovoltaico, specialmente se accoppiata con accumuli elettrici.

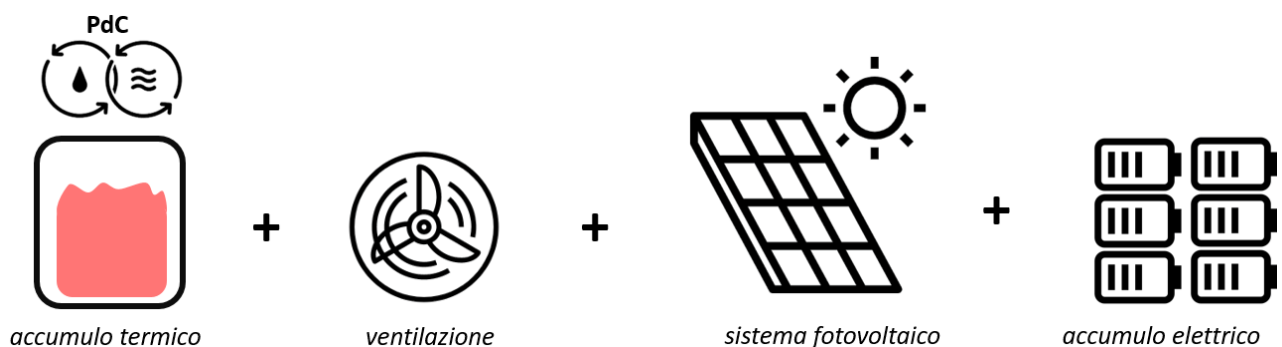


Figura 41. Futuri sviluppi tecnologici delle pompe di calore

Volendo confrontare le tecnologie di generazione termica più promettenti ed efficienti, è possibile riferirsi alla Tabella 18.

Tabella 18. Confronto tra caldaie a gas a condensazione e pompe di calore

		CALDAIE A GAS A CONDENSAZIONE	POMPE DI CALORE
	Ingombro generale	● ● ● ●	● ● ○ ○
	Utilizzabile con riscaldamento a radiatori	● ● ● ○	● ● ● ○
	Utilizzabile con riscaldamento a pavimento	● ● ○ ○	● ● ● ●
	Costo di installazione	● ● ● ●	● ● ● ○
	Costo di esercizio	● ● ○ ○	● ● ● ●
	Dipendenza dai prezzi dei combustibili fossili	● ○ ○ ○	● ● ● ○
	Emissioni di CO ₂	● ● ● ○	● ● ● ●
	Integrabilità FER	○ ○ ○ ○	● ● ● ●
	Detrazioni fiscali	● ● ● ●	● ● ● ●

8.2 VMC (Ventilazione Meccanica Controllata) e recuperatori di calore

L'aria all'interno degli ambienti può risultare contaminata da inquinanti, prodotti all'interno dell'edificio stesso (es. dai materiali da costruzione, dagli arredi) oppure dalla stessa presenza antropica (es. CO₂) (come schematizzato in Figura 42)

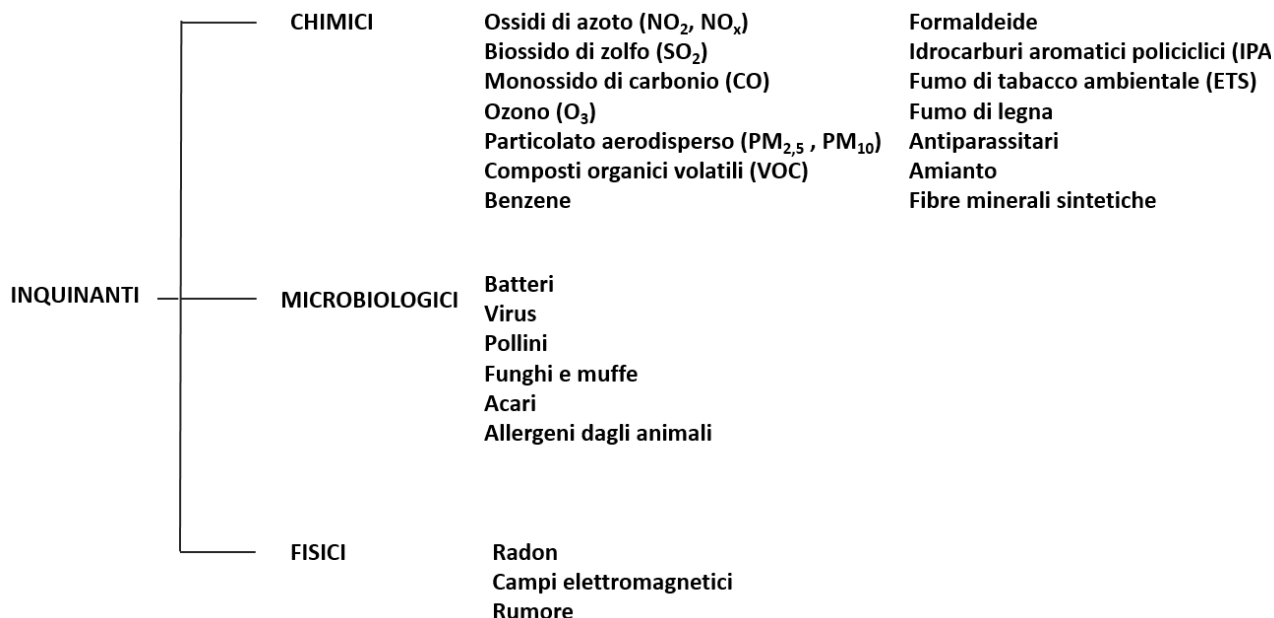


Figura 42. Principali inquinanti degli ambienti [99,101]

In via naturale, per effetto della differenza di pressione tra ambiente interno ed ambiente esterno, negli edifici si crea uno spostamento d'aria nella direzione della pressione minore. Tale flusso è chiaramente ostacolato dalla presenza di partizioni verticali e da serramenti efficienti, con buona tenuta all'aria e ben installati. Si parla in questo caso di ventilazione naturale. Questa ventilazione non è sufficiente, però, ad asportare in maniera efficace, completa e continuativa gli inquinanti dagli ambienti. Per questo motivo, si ricorre all'ausilio di dispositivi meccanici: si opera perciò la ventilazione meccanica controllata (VMC).

Un impianto di VMC consente di rinnovare l'aria all'interno dei locali di un edificio per fini igienico-sanitari. Pertanto, la funzione che assolve è quella di immettere negli ambienti aria fresca (cioè presa dall'esterno e filtrata) per sostituire l'aria presente all'interno dei locali, pur mantenendo le buone condizioni di qualità e temperatura.

I sistemi impiegati sono di tre tipologie (Figura 43):

- Impianti di immissione: l'aria fresca viene direttamente immessa negli ambienti attraverso ventilatori e distribuita anche con canalizzazioni. In ogni ambiente, delle bocchette opportunamente localizzate consentono di veicolare l'aria, controllandone portata e velocità;
- Impianti di estrazione: l'aria viene estratta dai locali con ventilatori elicoidali da finestra o da parete (o con canali posti in depressione) e la differenza di pressione così determinata fa sì che aria fresca si immetta nell'ambiente, e si distinguono in:
 - Impianti a portata fissa;
 - Impianti a portata variabile.
- Impianti di immissione ed estrazione: una portata d'aria viene estratta dal locale (ripresa) ed espulsa all'esterno; contemporaneamente, una analoga portata d'aria (rinnovo) viene prelevata dall'esterno ed immessa all'interno dell'ambiente. Si distinguono in due tipologie (schematizzate in Figura 44):
 - Centralizzati (Per edifici multipiano; Per singoli appartamenti);
 - Decentralizzati ovvero per singola stanza.

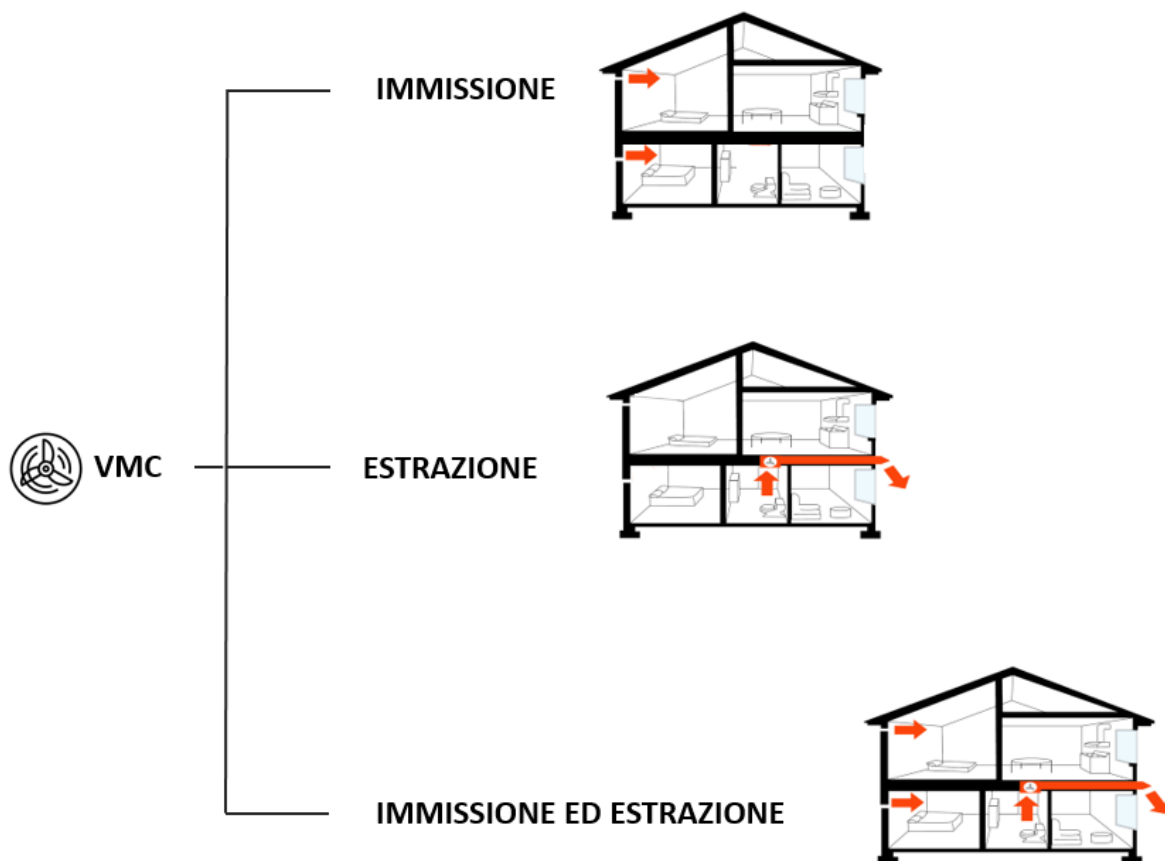


Figura 43. Sistemi di ventilazione meccanica controllata

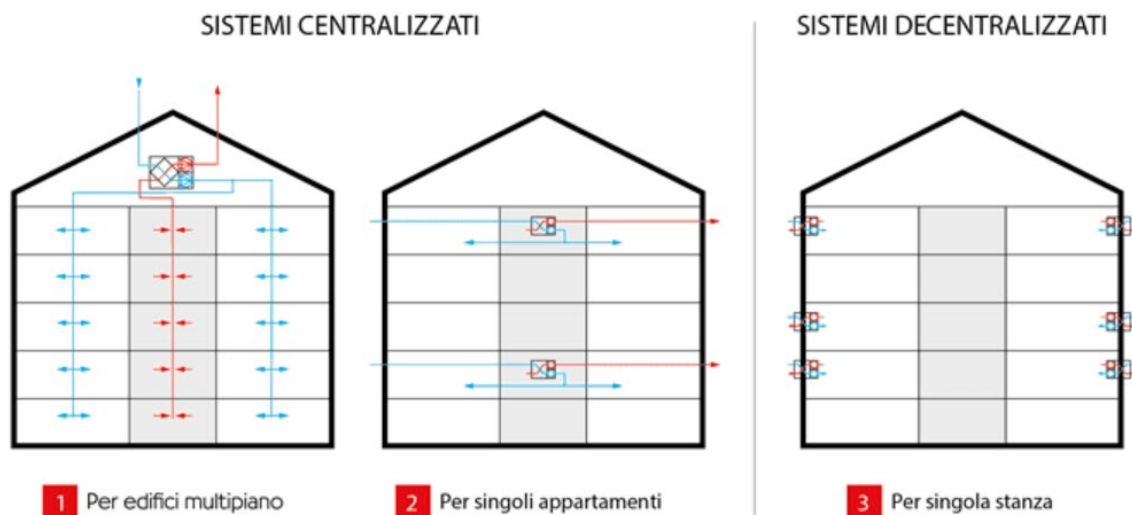


Figura 44. Tipologie di sistemi di VMC. Fonte: [102]

È possibile definire l'efficacia della ventilazione come il rapporto tra la concentrazione di inquinanti nell'aria che lascia l'ambiente (C_e) e la concentrazione presente nella zona in cui si respira (C_i) [N. Rossi, "Manuale del Termotecnico", II edizione, pp216, Hoepli, Milano]:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e}{C_i} \quad \text{Eq. 4}$$

Per rendere energeticamente efficiente la ventilazione meccanica, è opportuno prevedere un sistema di recupero di calore dalla portata di ripresa. Addirittura, in determinate zone climatiche, in presenza di un impianto di ventilazione meccanica controllata a servizio di edifici con portate di rinnovo che superano delle soglie stabilite per legge, si ha l'obbligo di adozione di recuperatori di calore.

Il recuperatore di calore è uno scambiatore che permette di far scambiare calore tra la portata di ripresa e di cederlo alla portata di rinnovo. Si possono distinguere:

- Recuperatori statici a piastre (come quello schematizzato in Figura 45);
- Recuperatori rotativi;
- Recuperatori a batterie con pompa;
- Recuperatori a tubi di calore;
- Recuperatori termodinamici.

A seconda delle esigenze, del luogo di installazione, dello spazio a disposizione, e della portata d'aria, si deve prediligere un tipo di recuperatore piuttosto che un altro (facendo ad esempio riferimento alla Tabella 19).

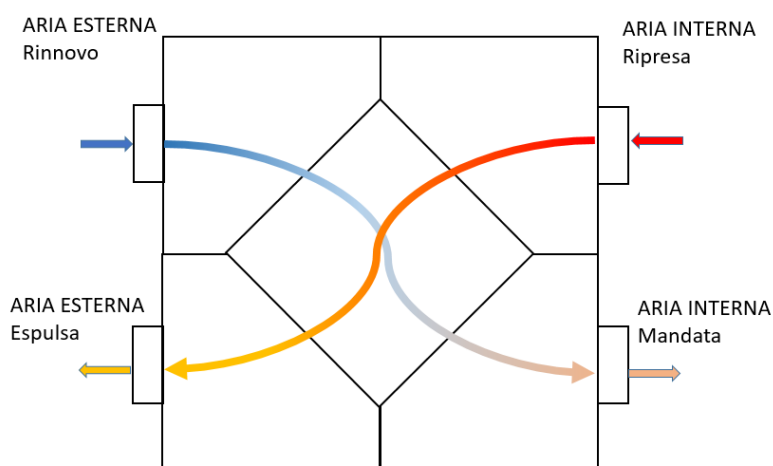


Figura 45. Schema funzionale di un recuperatore di calore statico

Tabella 19. Caratteristiche tipiche dei recuperatori di calore. Fonte: [103]

Tipologia	Temperatura massima di esercizio	Portata d'aria	Calore recuperabile nelle condizioni ottimali
	[°C]	[m³/h]	[%]
Stativo a correnti incrociate a lastre ondulate	200	1.000-80.000	45-60
Statico a tubi in acciaio	450	4.000-100.000	45-55
Statico con tubi non metallici	100-250	5.00-80.000	35-45
A tubi di calore Al/Al e Cu/Cu	200	1.000-45.000	50-80
A tubi di calore in acciaio	400	1.000-35.000	60-80
A tamburo rotante aria-aria	500	2.000-50.000	45-65
Batterie gemelle	300	15.000-100.000	40-65
Industriali specifici	750	10.000-150.000	40-80

8.3 Le fonti rinnovabili

Come già ribadito più volte nei capitoli precedenti, un edificio ZEB o Net ZEB non può esistere senza sfruttare energia proveniente da fonti rinnovabili. Tale presupposto, già presente per normativa negli nZEB (D. Lgs. 28/11 [8]), diventa ancor più stringente in quanto si presuppone che tutto il fabbisogno sia coperto da fonti rinnovabili e che si attinga ai combustibili fossili soltanto nel caso in cui non si possa prescindere dal loro utilizzo.

Le energie rinnovabili non pregiudicano in alcun modo le risorse naturali e si rigenerano almeno alla stessa velocità con cui vengono consumate o sono da considerarsi inesauribili, se rapportate al periodo temporale dell'umanità. Esse inoltre sono considerate fonti di energia pulite, ossia prive di emissioni climalteranti.

Il D. Lgs. 28/11 [8] comprende tra le fonti rinnovabili l'energia solare, eolica, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, energia da biomassa, da gas di discarica, da gas residuati dai processi di depurazione e biogas.

La questione più volte discussa in letteratura [29] riguarda i confini del sistema da considerare, ossia se essi coincidano con l'edificio stesso e la sua impronta oppure si estendano al di fuori di esso. Tale distinzione è essenziale per poter definire l'energia prodotta in loco o quella al di fuori e quindi anche la quota di energia rinnovabile effettivamente ascrivibile alla produzione di energia del fabbricato e al suo bilancio.

Secondo Torcellini et al. [29] e Marszal et al. [104] esistono differenti possibili classificazioni di generazione di energia da fonti rinnovabili, basate sulla vicinanza o meno all'edificio di tali fonti (Figura 46):

1. fonti rinnovabili presenti sull'edificio (fotovoltaico e solare termico o mini-eolico);
2. fonti rinnovabili in prossimità dell'edificio stesso nel confine del sito di pertinenza (fotovoltaico, solare termico, minieolico installati per esempio nei parcheggi di pertinenza dell'edificio);
3. fonti rinnovabili disponibili fuori dal sito utilizzate per generare l'energia in situ (ad esempio biomassa, pellet, biogas, ecc., che vengono prodotti altrove e trasportati in situ per produrre calore ed energia elettrica);
4. fonti rinnovabili che producono energia al di fuori del sito di pertinenza dell'edificio (campi solari fotovoltaici, pale eoliche, ecc).

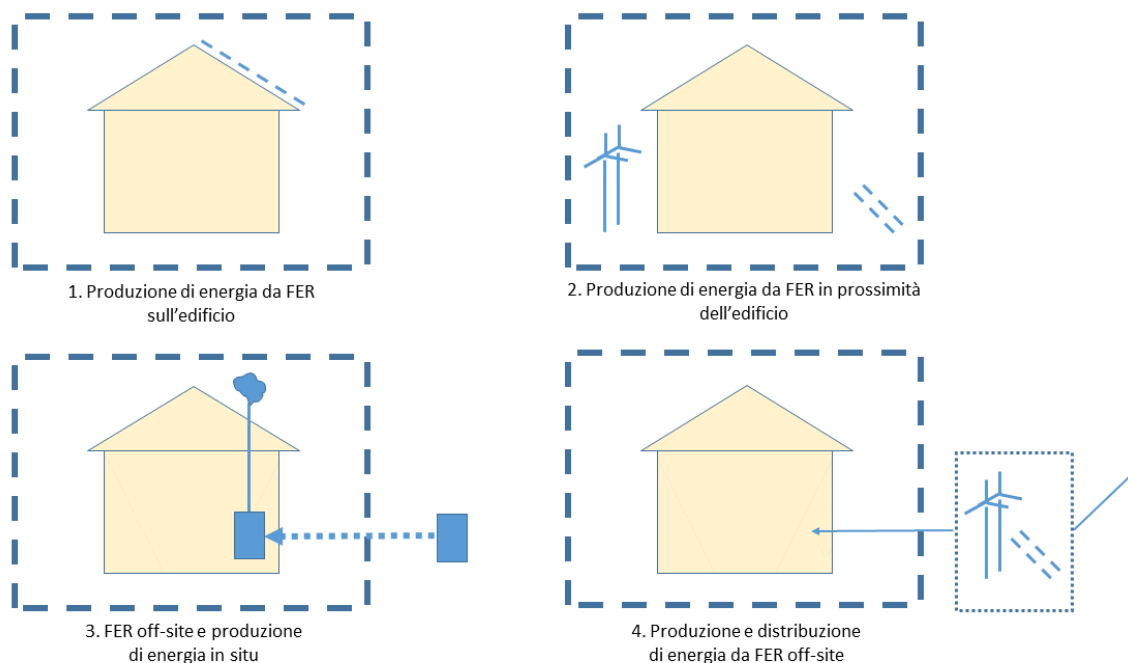


Figura 46. Possibile classificazione in base alla generazione di energia da fonti rinnovabili in-site e off-site

Secondo Torcellini ed altri [29], la scelta nell'implementazione delle tecnologie da fonti rinnovabili deve essere effettuata attraverso una classificazione delle tecnologie stesse a seconda della loro abilità nel minimizzare gli impatti ambientali e le perdite dovute al trasporto e alla conversione dell'energia, della longevità rispetto alla durata dell'edificio e della disponibilità delle fonti, oltre alla possibilità di replicabilità potenziale per futuri ZEB. È chiaro che attraverso questi criteri si prediligeranno le tecniche di produzione dell'energia in situ.

Per tale motivo, ai fini di questo report si considererà soltanto la prima tipologia, ossia la produzione di energia da fonti rinnovabili attraverso sistemi installabili sull'edificio e quindi strettamente interconnessi ad esso. Questo anche per tener conto di uno dei problemi principali di cui si è già discusso precedentemente, ossia quello dell'integrazione delle fonti rinnovabili sia con gli altri sistemi impiantistici sia dal punto di vista architettonico. È, infatti, indispensabile, come già esposto in precedenza, adottare approcci che promuovano sistemi accoppiati per esempio agli impianti di climatizzazione.

Altro problema non secondario è quello della natura imprevedibile, aleatoria e variabile delle fonti rinnovabili, che rendono necessaria la presenza di sistemi di accumulo per compensare i carichi e soddisfare i fabbisogni dell'edificio in tutte le ore del giorno e in tutte le stagioni.

Sebbene, infatti, il distacco dalla rete sia di fatto auspicabile, una connessione ad essa è comunque utile nel bilancio energetico, fermo restando che l'energia prodotta in eccesso potrebbe essere ri-immessa e utilizzata dalla rete stessa. La disconnessione totale dalla rete non risulta generalmente fattibile dato che è difficile sopperire alle variazioni stagionali della domanda di energia. Diventa in questo caso imprescindibile, appunto, l'utilizzo degli accumuli e di sistemi di immagazzinamento dell'energia. In alternativa, il problema della disconnessione dalla rete potrebbe essere in parte risolto implementando dei sistemi a livello di distretto urbano e utilizzando una serie di sistemi di generazione di energia da fonti rinnovabili.

Tra i sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili, quelle di più ampia applicazione e facile realizzazione negli edifici sono sicuramente il fotovoltaico e il solare termico. Altre tecniche applicabili possono essere parcheggi di pertinenza dell'edificio con eolico e fotovoltaico, che però risulta di utilizzo più limitato perché dipende dalla conformazione del sito in questione. Ai fini di questo report si è deciso pertanto di concentrarsi sui primi due rimandando la trattazione dettagliata ad altre sedi più opportune.

Tra i sistemi più diffusi e importanti, gli impianti fotovoltaici presentano ad oggi la possibilità di essere integrati architettonicamente all'interno dell'edificio, senza avere grandi impatti a livello estetico ed architettonico.

L'impianto fotovoltaico ha il compito di trasformare l'energia solare in energia elettrica. Per un edificio ZEB sarebbe auspicabile che esso sia autonomo e quindi dotato di accumulo per immagazzinare l'energia elettrica prodotta e utilizzarla poi all'interno dell'edificio all'occorrenza.

La necessità dell'accumulo viene meno nel caso in cui ci si possa connettere alla rete, per esempio negli edifici Net ZEB, nei quali è importante valutare la possibilità che il surplus di energia prodotta venga rilasciata alla rete stessa andando a compensare la domanda di energia in atto.

Gli impianti fotovoltaici presentano più moduli collegati in serie o in parallelo a seconda della tensione che si vuole ottenere. L'energia da essi prodotta in corrente continua viene convertita in corrente alternata attraverso l'inverter, centralizzato o dedicato al singolo modulo. Infine, sono presenti i dispositivi di distribuzione e regolazione dell'energia e, se l'impianto è connesso alla rete, un dispositivo di filtraggio delle armoniche e di rifasamento, mentre se esso è autonomo, un regolatore di carica delle batterie.

Esistono numerose tipologie di fotovoltaico, tra cui a film sottili, moduli semitrasparenti, nanostrutturali, fotovoltaico organico, facciate solari dinamiche e involucri edilizi adattivi. Generalmente il materiale più utilizzato è il silicio, tanto che i moduli possono essere in silicio monocristallino (più costosi e con rendimento del 16-20%), policristallino (meno costosi e meno efficienti, con rendimento del 15-16% e estremamente adattabili a differenti forme e dimensioni), amorfo (rendimento basso del 6-8%, ma molto economici). Particolare attenzione è da attribuire all'esclusione di eventuali ombreggiamenti e all'inclinazione e orientamento dei pannelli per massimizzare la captazione solare [105].

L'impianto solare termico invece trasforma l'energia solare in energia termica, utile alla produzione di acqua calda sanitaria, al riscaldamento degli ambienti e alla climatizzazione estiva. Generalmente è costituito da un sistema di captazione dell'energia, ossia i pannelli solari termici, un sistema di accumulo per rendere

disponibile l'energia a prescindere dal periodo di insolazione, una pompa di circolazione eventuale e un sistema di regolazione.

I pannelli solari termici più comuni e diffusi sul mercato sono i pannelli piani vetrati e i pannelli sottovuoto. I primi sono composti da una piastra metallica in un involucro isolato termicamente e ricoperto da una superficie in vetro che permette l'ingresso alla radiazione solare, ma impedisce la fuoriuscita del calore accumulato. La piastra assorbe la radiazione e riscalda il liquido termovettore all'interno del pannello. Tali pannelli risultano economicamente convenienti e hanno un buon rendimento termico per sistemi a temperature non elevate (acqua calda sanitaria, riscaldamento con elementi radianti a pavimento). I pannelli sottovuoto sono costituiti da condotti di vetro sottovuoto in cui le tubazioni assorbono la radiazione e riscaldano il liquido all'interno. Essi risultano più costosi ma con un rendimento più elevato e sono utilizzati in località con più bassa insolazione o che richiedono temperature più elevate (soprattutto in campo industriale) [105].

Nell'ottica del raggiungimento dell'indipendenza dalla rete, i sistemi più convenienti sono quelli a circolazione forzata, in cui è presente sia la pompa di circolazione sia il sistema di regolazione che la fa partire quando la differenza tra la temperatura di uscita dai collettori e quella dell'accumulo supera un certo valore (il valore dell'energia termica ottenuta deve essere superiore al costo dell'energia elettrica consumata dalla pompa stessa). In tal modo essi risultano più idonei a provvedere sia alla fornitura di ACS che al riscaldamento degli ambienti, rispetto a quelli a circolazione naturale che necessitano di un serbatoio in posizione più elevata rispetto al pannello e non troppo lontano, dato che per il movimento del fluido termovettore sfrutta la differenza di densità tra fluido caldo e fluido freddo conseguente alla captazione della radiazione solare e quindi c'è una bassa differenza di pressione disponibile per compensare le perdite di carico. In entrambi i casi descritti è comunque necessario integrare la fornitura di energia termica con altre fonti più "sicure" [105].

Un accenno, infine, va fatto per la tecnologia del mini e del micro-eolico, l'unico sfruttabile tra i sistemi che ricavano energia dal vento, per un utilizzo collegato all'edificio. Si tratta di macchine di piccola o piccolissima taglia che convertono l'energia cinetica del vento in energia elettrica. Tuttavia, tale tecnologia è più complessa da installare in un'ottica di integrazione con l'edificio stesso e, quindi, più difficilmente realizzabile se si considera esclusivamente l'energia prodotta dall'edificio.

8.4 I sistemi di accumulo dell'energia

La necessità di utilizzare l'energia proveniente da fonti rinnovabili ha determinato la crescente esigenza di accoppiare impianti di generazione alimentati da FER a sistemi di accumulo con le caratteristiche e la capacità opportune, che permettono di ottimizzare lo sfruttamento della fonte rinnovabile stessa.

Sebbene siano molto diffusi in ambito industriale, i sistemi di accumulo trovano ormai applicazioni anche in edifici terziari e residenziali, grazie alla diminuzione dei costi.

Tali sistemi hanno la funzione principale di stoccare l'energia e consentirne un utilizzo differito rispetto al momento in cui essa viene prodotta [106], permettendo allo stesso tempo di ridurre la potenza delle macchine da installare [107].

In generale, i sistemi di accumulo possono essere classificati in base alla forma d'energia che si utilizza per l'immagazzinamento (Figura 47).

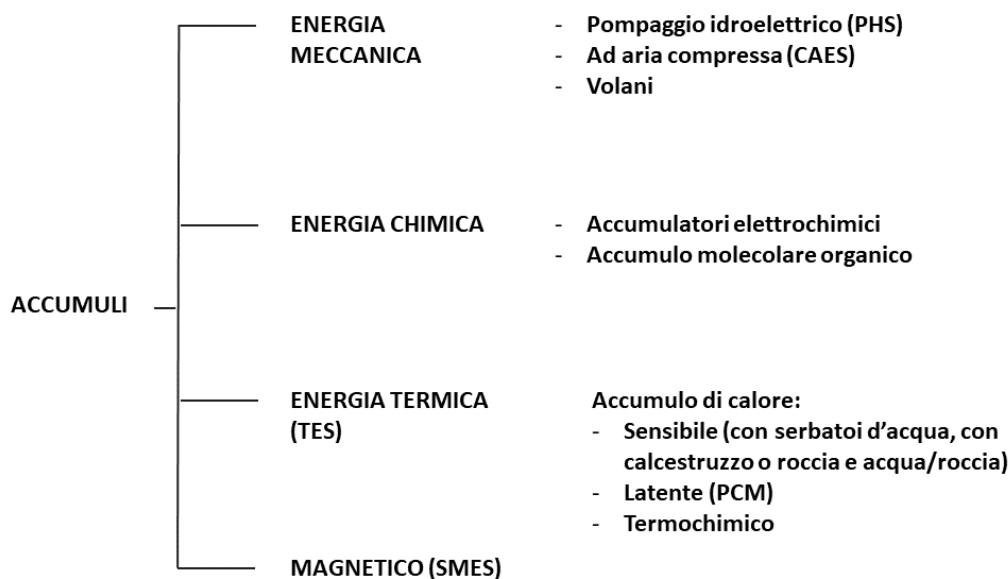


Figura 47. Tipologie di accumulo. Elaborazione ENEA da [106].

Tra questi, degni di nota per l'applicazione negli edifici sono sicuramente gli accumuli di energia termica o Thermal Energy Storage (TES) e gli accumuli elettrochimici o batterie, che immagazzinano l'energia elettrica trasformandola in energia chimica.

Gli accumuli di energia termica o Thermal Energy Storage (TES), prevedono, in ordine, una fase di assorbimento di calore (sensibile, latente o termochimico), una di conservazione dell'energia e, infine, il rilascio del calore al bisogno.

Lo stoccaggio di energia termica può essere applicato negli edifici che hanno un fabbisogno di energia significativo in inverno per il riscaldamento, e, in estate per il raffrescamento, ad esempio in una macchina ad assorbimento. Grazie all'accumulo e alla sua inerzia, il carico termico massimo si manifesta in ritardo rispetto al momento di massima insolazione.

Nel dettaglio, l'accumulo di calore sensibile si basa sullo stoccaggio dell'energia termica attraverso il riscaldamento o raffreddamento di un mezzo liquido o solido, (ad esempio, acqua); l'accumulo di calore latente avviene con materiali a cambiamento di fase o PCM; l'accumulo di calore termo-chimico (TCS) è basato su reazioni chimiche per immagazzinare e rilasciare energia termica.

Le diverse tipologie di accumulo si differenziano principalmente per range di temperatura e capacità di stoccaggio/fornitura dell'energia per unità di volume.

Gli accumuli di calore sensibile che impiegano l'acqua come fluido di stoccaggio rappresentano una tecnologia ben nota e risultano poco costosi. Essi sono tipicamente impiegati negli impianti di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria e risultano particolarmente efficienti se ad alta stratificazione e con elevato isolamento termico. Tuttavia, ciò implica generalmente grandi volumi di accumulo a causa della sua bassa densità di energia. Inoltre, è necessaria un'oculata progettazione per fornire l'energia termica a temperature costanti.

I sistemi TCS e PCM, invece, si sono diffusi soltanto negli ultimi anni e sono tutt'ora soggetti a sviluppo e verifiche sperimentali. Si stanno, infatti testando, nuovi materiali e tecniche da impiegare, sia per l'integrazione nei componenti (ad esempio incapsulando materiale a cambiamento di fase nel gesso o nelle bocchette), sia per i mezzi di trasporto dell'energia termica.

Essi risultano più performanti anche se sono economicamente sostenibili solo per le applicazioni con un elevato numero di cicli e sono più costosi rispetto ai sistemi di accumulo sensibile. La convenienza economica di un sistema di accumulo, infatti, dipende sostanzialmente dall'applicazione specifica in cui esso è utilizzato e dalle esigenze operative, compreso il numero e la frequenza dei cicli di accumulo.

I materiali PCM possono offrire una capacità di accumulo superiore in quanto sfruttano il calore latente dovuto al cambiamento di fase, durante il quale la temperatura si mantiene costante.

I TCS, invece, possono offrire una capacità d'accumulo ancora più elevata in quanto le reazioni termochimiche su cui si basano (ad esempio adsorbimento o adesione di una sostanza sulla superficie di un altro solido o liquido) permettono di accumulare e fornire energia termica e frigorifera su richiesta (regolando anche l'umidità) in molteplici applicazioni. La fase di carica del sistema d'accumulo avviene mediante una reazione endotermica, solitamente innescata dal calore ricevuto dalla fonte solare. Per il processo di scarica sono spesso utilizzati catalizzatori, i quali permettono di effettuare anche il controllo della reazione. Tali reagenti presentano spesso alcuni problemi quali tossicità, infiammabilità e costo elevato.

Come già detto, i sistemi di accumulo per gli edifici sono strettamente legati all'utilizzo di fonti rinnovabili e possono essere integrabili nella struttura dell'edificio stesso (pareti), nei sistemi di ventilazione e nel solare termico e fotovoltaico.

Sostanzialmente l'accumulo termico per applicazioni solari consente di compensare il disaccoppiamento tra produzione e domanda di energia permettendo di accumulare l'energia prodotta e non immediatamente utilizzata. La durata dell'accumulo è, quindi, un fattore indispensabile per capire quanto tempo l'energia immagazzinata possa essere conservata senza perdite significative. Essa può essere di alcune ore (accumulo giornaliero o a breve termine), di settimane o addirittura mesi (accumulo a medio o lungo termine) a seconda della tipologia di accumulo considerata.

Per quanto riguarda, invece, lo stoccaggio di energia elettrica, molte applicazioni che sfruttano l'energia solare (come gli impianti fotovoltaici) prevedono già di base un accumulatore a batteria. Quasi tutti gli accumuli a batteria stazionaria offrono generalmente la possibilità di immagazzinare l'elettricità solare in eccesso durante il giorno e metterla a disposizione di sera e di notte. Inoltre i nuovi sistemi possono alleggerire i carichi sulla rete e ottimizzare l'autoconsumo, inteso come la percentuale di elettricità prodotta e consumata direttamente nell'edificio. È necessario ovviamente un sistema di comunicazione tra impianto da energia rinnovabile (fotovoltaico), utenze, collegamento di rete e sistema di accumulo, affinché l'energia venga immagazzinata o erogata a seconda della necessità. Inoltre, il sistema consente di immettere energia nell'edificio nel momento della massima richiesta, abbassando i picchi di potenza e consentendo di alleggerire la rete e ridurre i costi.

Il sistema di accumulo più efficiente e meno costoso in un impianto fotovoltaico è sicuramente quello a corrente continua, collegato appunto all'inverter sul lato della corrente continua, tanto che si parla di "inverter ibrido". Il sistema a corrente alternata, invece, presenta maggiore versatilità in quanto è indipendente dall'impianto fotovoltaico, ma ha costi maggiori e minore efficienza.

In ogni caso, le tipologie di accumulo più comunemente utilizzate negli edifici sono quelle agli ioni di litio; il parametro più importante per l'impiego negli edifici è sicuramente la durata di vita, per i quali risultano particolarmente adatti gli accumuli al litio-ferro-fosfato. Essi sono caratterizzati da elevata sicurezza di funzionamento, anche se sono abbastanza costosi e presentano un'efficienza del 90-95%, un range di 4000-6000 cicli e un'autoscarica tra 1 e 3% al mese. Attualmente sono in fase di sviluppo anche gli accumuli al litio-nichel-manganese (NMC) per usi edili.

Per sintetizzare quanto esposto, i sistemi di accumulo attualmente in commercio consentono quindi vari vantaggi a livello di edificio:

- innanzitutto, ottimizzano l'utilizzo dell'energia prodotta all'interno dell'edificio;
- riducono la potenza massima di immissione e prelievo;
- sopperiscono al ripristino dell'energia elettrica in caso di black-out.

Obiettivi ancora parzialmente o difficilmente attuabili soprattutto a livello di quartiere e con generazione distribuita sono invece:

- utilizzo della potenza di regolazione delle batterie per la stabilizzazione della rete elettrica;
- regolazione degli squilibri tra immissione in rete e consumo,
- aumento del tasso di approvvigionamento.

Di seguito si riporta una caratterizzazione qualitativa delle due differenti tipologie di accumulo di più ampio utilizzo negli edifici (Tabella 20).

Tabella 20. Caratterizzazione qualitativa delle differenti tipologie di accumulo più diffuse negli edifici.
Elaborazione ENEA da [108]

TIPO DI ACCUMULO	EFFICIENZA	IMPATTO AMBIENTALE	FLESSIBILITÀ DI UTILIZZO	DURATA	CONVENIENZA	PROSPETTIVA D'IMPIEGO FUTURA
Accumuli a batteria	●●○	●●●	●●○	●●●	●●○	●●●
Accumuli termici ad acqua	●●●	●●●	●●●	●○○	●○○	●●○

Sufficiente ●○○ Buono ●●○ Ottimo ●●●

9 Conclusioni

L'attività svolta ha messo in evidenza come la sfida per un parco edilizio sempre più efficiente e l'obiettivo europeo al 2050 di un parco de-carbonizzato richiedano competenze multidisciplinari e conoscenze approfondite sia dal punto di vista normativo che tecnico-pratico.

Il panorama normativo attuale in Europa si presenta estremamente complesso a causa dell'eterogeneità di definizioni, criteri e parametri adottati, finalizzati al raggiungimento dell'obiettivo di edifici ad altissima efficienza nZEB.

Se, da un lato, le direttive europee emanate negli ultimi anni hanno voluto tener conto della varietà dei contesti nazionali che caratterizzano i diversi Stati membri fornendo indicazioni e definizioni ad ampio spettro, dall'altro, la conseguenza è stata quella di una disomogeneità generale nell'approccio al problema che rende difficile il confronto dei risultati raggiunti in termini di prestazioni e di efficientamento del parco edilizio.

In Italia il DM 26.6.2015 ha imposto requisiti minimi e verifiche da rispettare per il raggiungimento dello standard nZEB, sia per gli edifici di nuova costruzione sia per gli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione importante, che risultano sfidanti soprattutto per i vincoli presenti nel costruito.

L'analisi critica condotta in questa annualità ha messo in evidenza come la normativa italiana imponga requisiti piuttosto stringenti sia per la tipologia di bilancio energetico richiesto, valutato in termini mensili e non sull'intero anno, sia per la quota di energia da fonti rinnovabili prescritta per coprire il fabbisogno energetico dell'edificio.

Inoltre, il numero esiguo di edifici nZEB e la loro scarsa diffusione nel panorama italiano sono evidenti e sono dovuti principalmente ad una difficoltà di carattere strettamente economico e finanziario, a causa della crisi del mercato immobiliare delle nuove costruzioni. Si registra, in ogni caso, un trend crescente, soprattutto nel residenziale, grazie anche alle politiche di incentivazione, come confermato dall'Osservatorio nazionale degli edifici nZEB, curato da ENEA.

Ciò sottolinea quanto ancora siano ampi i margini di miglioramento per aspirare ad un parco edilizio con standard di efficienza elevatissima e pone di fronte ad alcuni interrogativi nell'ambito del contesto italiano: è necessario capire di quanto ancora sia possibile migliorare la prestazione energetica degli edifici nell'ottica di superare la soglia nZEB e gli standard normativi ad essi connessi e come si debba condurre l'effettiva valutazione del bilancio energetico, specialmente in relazione al periodo di riferimento da considerare. Rispondere a tali questioni comporta un'evoluzione nel concetto di edificio ad elevatissima prestazione energetica e la necessità di una ricognizione di quelle che sono le nuove prospettive per una progettazione di edifici ancor più efficienti o Zero Energy Buildings.

Dalla disamina della vasta letteratura scientifica presente si è arrivati alla conclusione che, nonostante le molteplici definizioni analizzate, un Edificio Zero Energy debba avere una richiesta di energia molto esigua e

tale da poter essere soddisfatta da fonti rinnovabili in situ. Al più, nel caso di Net ZEB, esso dovrebbe essere in grado di riversare in rete una quota di energia prodotta almeno pari a quella fornita dalla rete stessa.

Nonostante le differenti definizioni di ZEB e Net ZEB, come ampiamente dimostrato nel report, influenzino l'intero percorso progettuale per la realizzazione dell'edificio, presupposti fondamentali e comuni devono essere il raggiungimento di elevate prestazioni e bassissime (se non nulle) emissioni di CO₂, attraverso sistemi avanzati e integrati, senza, tuttavia, trascurarne la fattibilità economica, che molto spesso rappresenta una criticità nella loro realizzazione. Gli edifici del prossimo futuro dovrebbero, inoltre, incorporare strategie energetiche resilienti e perfettamente integrate anche a livello di quartiere.

Per tale motivo, passando dagli aspetti teorici a quelli più pratici, un edificio in direzione ZEB presuppone una strategia di progettazione ragionata in un'ottica "climate-responsive", che considera l'edificio, in tutte le parti che lo compongono, come un elemento attivo e in grado di "rispondere" alle differenti condizioni climatiche, specifiche del contesto in cui sorge, mantenendo prestazioni energetiche elevate, minimizzando i consumi e sfruttando il potenziale delle risorse naturali presenti.

Ciò implica che la realizzazione di un edificio ZEB o Net ZEB dovrebbe essere fondata su una triade di principi che comprenda una progettazione passiva per ridurre il fabbisogno di energia; una progettazione attiva per implementare sistemi di efficienza energetica; l'attenzione all'integrazione dei sistemi di produzione dell'energia da fonti rinnovabili. Il tutto non può prescindere da un'analisi di fattibilità economica, che influenza la scelta delle misure di efficienza energetica volte a ridurre i consumi di energia primaria, in quanto esse devono essere, nello stesso tempo, anche economicamente realizzabili.

In ultimo, uno ZEB dovrebbe essere progettato come un "climate-sensitive building", per tenere conto del cambiamento climatico e sociale e prevenire e predire le richieste future di energia, mantenendo nel tempo un'elevata prestazione energetica.

A partire da tali presupposti, il risultato finale è stato lo studio e la selezione di tecnologie di involucro e impianto sia consolidate sia avanzate, presenti sul mercato, che possano essere utilizzate nell'ottica di edifici ZEB, pur tenendo conto delle specificità locali e climatiche, adattabili a edifici residenziali e non.

Dalle riflessioni emerse, si evince come la definizione di un involucro energeticamente efficiente debba essere un punto di partenza essenziale, perché da esso dipende, in misura importante, il comportamento energetico dell'edificio. Pertanto è stata indispensabile l'analisi sia di tecnologie tradizionali, il cui impiego è diffuso e consolidato, sia di materiali innovativi, che rappresentano gli strumenti ad oggi disponibili per la realizzazione di un involucro ad alta efficienza. Nello specifico sono state analizzate:

- tecnologie di involucro tradizionale ritenute valide per l'obiettivo di una progettazione di edifici a zero energia, tra cui materiali isolanti tradizionali, sistemi costruttivi a umido e a secco, oltre a facciate ventilate;
- tecnologie di involucro innovative con materiali isolanti ad alte prestazioni quali isolanti riflettenti, materiali a cambiamento di fase (PCM), aerogel, isolanti sottovuoto (VIP).

Da tale disamina si è evinto come l'adozione di ciascuna tecnologia e/o sistema costruttivo debba essere inquadrata nel suo contesto (geo-climatico), nella sua destinazione d'uso, nella tipologia di intervento (ristrutturazione o nuova costruzione) e dipenda dalla sensibilità di progettista e committenza.

Per quanto riguarda i materiali isolanti, invece, quelli tradizionali sono risultati sicuramente quelli più convenienti dal punto di vista economico, rispetto ai materiali isolanti innovativi ad alte prestazioni, per i quali non è attualmente possibile quantificare neanche la durabilità nel tempo. Tuttavia, questi ultimi risultano sicuramente più prestanti dal punto di vista della capacità di isolamento e delle prestazioni energetiche, aprendo nuove prospettive per il mercato futuro.

Dal punto di vista impiantistico, la criticità più sostanziale emersa è la necessità di pensare a sistemi impiantistici integrati che possano sfruttare prima di tutto le fonti rinnovabili e consentano allo stesso tempo l'integrazione con sistemi di accumulo elettrico e termico per ovviare all'imprevedibilità della natura delle FER stesse e raggiungere l'obiettivo ZEB. La sfida dei sistemi di accumulo si rivela anche in questo ambito, quindi, quanto mai attuale e preponderante.

Anche in questo caso, in particolare negli impianti di climatizzazione, risulta difficile identificare una soluzione unica e generalizzabile per tutte le tipologie di edifici, in quanto non si può prescindere dalle valutazioni sulla destinazione d'uso e sul contesto climatico locale. È evidente, tuttavia, che la tecnologia di generazione più promettente sia quella che prevede l'installazione di pompe di calore, nell'ottica della realizzazione di edifici full electric, possibilmente accoppiata, in futuro, a sistemi di accumulo elettrico. Le pompe di calore risultano inoltre economicamente convenienti e incentivabili, oltre che perfettamente integrabili con le FER.

Per concludere, è evidente come il tema trattato sia estremamente vasto e complesso e richieda l'approfondimento di molteplici aspetti connessi sia a problematiche teoriche, legate alla definizione del target da raggiungere in un edificio ZEB e alla valutazione delle prestazioni energetiche che esso dovrebbe avere, sia a problematiche tecnico pratiche che necessitano una valutazione delle tecnologie effettivamente applicabili. La difficoltà sostanziale è quella di affrontare una progettazione integrata, in grado di contemplare soluzioni architettoniche e impiantistiche per garantire l'autosufficienza energetica dell'edificio stesso.

In questo report è stato presentato un quadro d'insieme dello stato dell'arte che risulta propedeutico ad un'analisi più strettamente tecnica e quantitativa delle prestazioni raggiungibili adottando le tecnologie descritte.

Al fine di valutarne l'efficacia, gli sviluppi futuri della ricerca prevedranno, quindi, l'individuazione di modelli di edifici-tipo in direzione ZEB e Net ZEB, localizzati in differenti contesti climatici e con diverse destinazioni d'uso (residenziale e non), all'interno dei quali sarà presente la combinazione delle diverse tecnologie qui analizzate. Il tutto sarà finalizzato al calcolo dell'effettiva prestazione in termini di bilancio energetico, anche attraverso metodi dinamici avanzati, tenendo conto delle diverse condizioni climatiche e delle peculiarità locali. In tal modo, si offrirà uno strumento utile a capire se e in che modo si riesce a raggiungere il target ZEB o Net ZEB, quantificando le prestazioni energetiche e valutandole dal punto di vista economico, obiettivi entrambi non semplici e di immediata realizzazione per le implicazioni che una visione integrata delle varie tecnologie comporta.

10 Riferimenti bibliografici

1. Ministero dello Sviluppo Economico e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, "Strategia Energetica Nazionale" (SEN), 2017, accessibile presso il sito <https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Testo-integrale-SEN-2017.pdf>.
2. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima" (PNIEC), Dicembre 2019, accessibile presso il sito <https://www.mise.gov.it/index.php/it/energia/energia-e-clima-2030>.
3. Delia D'Agostino, P. Zangheri, L. Castellazzi, "Towards Nearly Zero Energy buildings (NZEBs) in Europe: a focus on retrofit in non-residential buildings", *Energies*, 2017, 10, 117; doi:10.3390/en10010117
4. ODYSSEE – MURE, Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors, An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases, 2015, available at: <http://www.odyssee-mure.eu/publications/br/energy-efficiency-in-buildings.html>
5. D. D'Agostino, B. Cuniberti, P. Bertoldi, Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings *European, Energy and Buildings* 153 (2017) 72–86, DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.062.
6. Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA), "Consumi finali di energia elettrica per settore economico", in: *Annuario dei dati ambientali*, Ed. 2018, disponibile online sul sito: <https://annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/7070>
7. Decreto Ministeriale 26.6.2015 Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle precisazioni e dei requisiti minimi degli edifici.
8. D.Lgs. 3.3.2011, n. 28 Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.

9. G. Centi, C. Romeo, P. Signoretti, A. Griffo, E. Passafaro, F. Caffari, "Valutazione delle prestazioni energetiche (EP) negli edifici nZEB: Residenze multifamiliari", Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2018/144, ENEA, 2018.
10. D. Bravo-Hidalgo, A. Baez-Hernandez, "Technologies of zero energies buildings. A review", *Ingeniería y Competitividad*, Vol. 21, N. 2, 2019, pp. 1-11, DOI:10.25100/iyc.v21i2i.7150
11. Scopus. Disponibile online su: www.scopus.com
12. VOSviewer v. 1.6.13. Disponibile online su: <https://www.vosviewer.com/>
13. Direttiva(UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30/05/2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.
14. Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia.
15. Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 ottobre 2012 , sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE
16. Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
17. Buildings Performance Institute Europe (BPIE), Nearly Zero Energy Buildings Definitions Across Europe, EPISCOPE Project (IEE/12/695/SI2.644739), 2015, <http://bpie.eu/publication/nzeb-definitions-across-europe-2015>.
18. RePublic_ZEB. Zeroing in on energy. Disponibile online in data 28 gennaio 2020. <http://www.republiczeb.org/page.jsp?id=5>
19. D. D'Agostino e L. Mazzarella, "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions", *Journal of Building Engineering*, Vol. 21, 2019, pp. 200-212. DOI: 10.1016/j.jobeb.2018.10.019.
20. 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 edifici di nuova costruzione siano a energia quasi zero.
21. ENEA, RSE, CTI, "PANZEB. Piano d'Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero", Allegato 2 del Piano d'Azione Italiano per l'Efficienza Energetica, giugno 2017.
22. UNI EN 15193: 2017 Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione.
23. UNI/TS 11300-2:2014. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione.
24. UNI EN 15232:2017. Prestazione energetica degli edifici - Parte 1: Impatto dell'automazione, del controllo e della gestione tecnica degli edifici.
25. E. Costanzo, R. Basili, F. Hugony, M. Misceo, R. Pallottelli, F. Zanghirella, N. Labia, "Osservatorio degli edifici a energia quasi zero (nZEB) in Italia 2016-2018", ENEA, 2019.
26. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE 2020: Producing Net Zero Energy Buildings. Providing tools by 2020 that enable the building community to produce market viable NZEBs by 2030", 2007, pp. 1-38.
27. G. Cammarata, M. Cammarata, G. D'Amico, F. Russo, "Edifici quasi zero energia. Principi di termofisica e bioclimatica per la progettazione di edifici a quasi zero energia e la riqualificazione energetica degli edifici esistenti", 2015, pp. 9-10, GRAFILL S.r.l., 2ed., Palermo.
28. U.S. Department of Energy, "A Common Definition for Zero Energy Buildings", DOE/EE-1247, 2015. buildings.energy.gov
29. P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, D. Crawley, "Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition", Conference Paper NREL/CP-550-39833, ACEEE Summer Study, National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy, US, 2006, 1-12.
30. L. Wells, B. Rismanchi, L. Aye, "A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context", *Energy and Buildings*, 158 (2018), pp. 616-628. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.055.

31. S. Kilgis, "A New Metric for Net-zero Carbon Buildings", ASME Energy Sustainability Conference, Long Beach, California, 2007. DOI: 10.1115/ES2007-36263.
32. D. Kolokotsa, D. Rovas, E. Kosmatopoulos, K. Kalaitzakis, "A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings", *Solar Energy* 85 (2011), pp. 3067–3084. DOI:10.1016/j.solener.2010.09.001.
33. L. Wang, J. Gwilliam, P. Jones, "Case study of zero energy house design in UK", *Energy and Buildings* 41 (2009), pp. 1215–1222.
34. A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, "Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies", *Energy and Buildings* 43 (2011), pp. 971–979. DOI:10.1016/j.enbuild.2010.12.022.
35. M. Noguchi, A. Athienitis, V. Delisle, J. Ayoub, B. Berneche, "Net Zero Energy Homes of the Future: A Case Study of the ÉcoTerraTM House in Canada", *Renewable Energy Congress*, Glasgow, Scotland, 2008.
36. J. Laustsen, "Energy Efficiency Requirements in Building Codes", *Energy Efficiency Policies for New Buildings*, OECD/IEA, 2008.
37. M.T. Iqbal, "A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland", *Renewable Energy* 29 (2) (2004), pp. 277–289, DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00192-7.
38. W. Gilijsse, "Zero-energy houses in the Netherlands", in: *Building Simulation '95*, Madison, Wisconsin, USA, 1995.
39. S. Rosta, R. Hurt, R. Boehm, M.J. Hale, "Performance of a zero-energy house", *Journal of Solar Energy Engineering Transactions of the ASME* 130 (2), 2008, pp. 0210061–0210064. DOI: 10.1115/1.2844429.
40. D.S. Parker, M. Thomas, T. Merrigan, "On the Path to Zero Energy Homes", *National Renewable Energy Laboratory*, DOE/GO-102001-1287, 2001.
41. S. Charisi, "The Role of the Building Envelope in Achieving Nearly-Zero Energy Buildings (nZEBs)", *Procedia Environmental Sciences* 38, Elsevier, 2017, pp. 115 – 120. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.092
42. R. Hyde, "Climate Responsive Design: A Study of Buildings in Moderate and Hot Humid Climates", Editore: Taylor & Francis; Novembre 2015.
43. R. Looman, "Climate-responsive design- A framework for an energy concept design-decision support tool for architects using principles of climate-responsive design", in *Architecture & Building Environment* n.1, 2017, ISBN 978-94-92516-36-7.
44. N. Gupta, G.N. Tiwari, "Review of passive heating/cooling systems of buildings", *Energy Science & Engineering*, 4(5) (2016), pp. 305-333, DOI: 10.1002/ese3.129.
45. E. S. Mazzucchelli, "Edifici a energia quasi zero. Materiali, tecnologie e strategie progettuali per involucri e impianti innovativi ad alte prestazioni", 2013, p. 32, Maggioli Editori.
46. L. Belussi, B. Barozzi, A. Bellazzi, L. Danza, A. Devito, F. C. Fanciulli, M. Ghellere, G. Guazzi, I. Meroni, F. Salamone, F. Scamoni, C. Scrosati, "A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions", *Journal of Building Engineering*, Volume 25, 2019, 100772.
47. M. Krarti, P. Ihm, "Evaluation of net-zero energy residential buildings in the MENA region", *Sustainable Cities and Society* Volume 22, 2016, pp. 116-125.
48. V. Corrado, I. Ballarini, I. Ottati, S. Paduos, "Aggiornamento della metodologia comparativa cost-optimal secondo Direttiva 2010/31/UE", Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/2014/107, Accordo di Programma MISE – ENEA, 2014.
49. Regolamento delegato (UE) n. 244/2012 della Commissione, del 16 gennaio 2012, che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi Testo rilevante ai fini del SEE.
50. I. Zacà, D. D'Agostino, P.M. Congedo, C. Baglivo, "Assessment and cost-optimality and technical solutions in high performance multi-residential buildings in the Mediterranean area", *Energy and Buildings*, vol. 102, 2015, pp. 250-265. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.04.038
51. I. Zacà, D. D'Agostino, P. M. Congedo, C. Baglivo, "Data of cost-optimality and technical solutions for high energy performance buildings in warm climate", *Data in Brief*, vol. 4 (2015), pp. 222-225. DOI: 10.1016/j.dib.2015.05.015.

52. C. Baglivo, P.M. Congedo, D. D'Agostino, I. Zacà, "Cost-optimal analysis and technical comparison between standard and high efficient mono-residential buildings in a warm climate", *Energy*, vol. 83 (2015), pp. 560-575. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.062.
53. Buildings Performance Institute Europe (BPIE), "Implementing the cost optimal methodology in EU countries. Lessons learned from three case studies", 2013 pp. 1-82. ISBN 9789491143083. Disponibile online sul sito: <http://bpie.eu/costoptimalmethodology.html>.
54. S.-N. Boemi, O. Irulegi, M. Santamouris, "Energy Performance of Buildings: Energy Efficiency and Built Environment in Temperate Climates", 2016, pp. 1-543, Springer, Svizzera, Ristampa ed. 2019.
55. A. Robert, M. Kummert, "Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past", *Build. Environ.* 55 (2012) 150–158, DOI:10.1016/j.buildenv.2011.12.014.
56. UNI EN ISO 13788:2013. "Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo."
57. M. Varga et al, "Service Buildings Keep Cool: Promotion of sustainable cooling in the service building sector - Final report", Austrian Energy Agency, Vienna 2007, p. 7.
58. Giuseppe Margani, *Murature Massive e comfort sostenibile in clima mediterraneo*, pp.9-10 in <https://www.casaportale.com/public/uploads/19028-pdf1.pdf>, consultato in data 13/12/2019.
59. P.M. Congedo, B. Conterio, "Edifici a consumo quasi zero per regioni calde", *Impianti Building* 103 (2013) pp. 11-16, Tecneedit Edizioni, Italia.
60. F. Arieti, "Progettare edifici a energia zero", pp. 43-44, Maggioli Editore, San Marino, 2017.
61. C. Baglivo, P.M. Congedo, A. Fazio, D. Laforgia, "Multi-Objective Optimization Analysis For High Efficiency External Walls Of Zero Energy Buildings (Zeb) In The Mediterranean Climate", *Energy and Buildings*, 84 (2014) pp. 483–492. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.08.043
62. Associazione Nazionale degli Industriali del Laterizi (ANDIL), "La casa NZEB in Laterizio. Antisismica, sostenibile e confortevole: una proposta per il clima mediterraneo", in: "i laterizi: risparmio energetico, sostenibilità e salubrità. Guida per gli operatori e i tecnici di cantiere", ed. FORMEDIL, Roma, pp.22-56.
63. Disponibile online sul sito www.wienerberger.it.
64. Disponibile online sul sito www.poroton.it.
65. Disponibile online sul sito www.bioisotherm.it
66. Disponibile online sul sito www.poroton.it
67. Disponibile online sul sito www.costantinilegno.it.
68. Disponibile online sul sito www.knauf.it.
69. S. W. Lee n, C. H. Lim, E. I. B. Salleh, "Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65, 2016, pp. 643–661. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.002
70. Reflective Insulation Manufacturers Association International (RIMA-I), "Understanding and Using Reflective Insulation, Radiant Barriers and Radiation Control Coatings", 2014.
71. J.M. Fricker "Computation alanalysis of reflective air spaces", *AIRAH J*, 1997.
72. H E Robinson, F J.Powell "The Thermal Insulating Value of Airspaces.". *Hous Res Pap No 32,Natl Bur Stand Proj ME-12*, US Gov Print Off Washington, DC1954.
73. M. G. Vrachopoulos, M.K. Koukou, D.G Stavlas., V.N Stamatopoulos, A.F. Gonidis, E.D. Kravvaritis, "Testing reflective insulation for improvement of buildings energy efficiency" *Central European Journal of Engineering*, vol.2, 2012, pp.83–90.
74. A. Joudi, H. Svedung, M. Cehlin, M. Rönnelid, " Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance", *Applied Energy* Volume 103, 2013, pp. 562-570. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.019
75. S. E Kalnæs, B. P Jelle "Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities" *Energy and Buildings* Volume 94, 1 May 2015, pp. 150-176. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.02.023
76. F.Haghighat, "Applying Energy Storage in Ultra-low Energy Buildings - FINAL REPORT", 2014.

77. R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, "Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review" *Energy and Buildings*, 42 (2010), pp. 1361-1368). DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026
78. J. Schröder, K. Gawron, "Latent heat storage", *Energy Res.*, 5 (1981), pp. 103-109.
79. J.H. Dieckmann, "Latent heat storage in concrete", Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany.
80. F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F.de' Rossic, G. PeterVanoli, "Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season", *Applied Energy*, Volume 113, January 2014, pp. 990-1007. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.045
81. M. Koschenz, B. Lehmann, "Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings" *Energy and Buildings*, Volume 36, Issue 6, June 2004, pp.567-578. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.01.029
82. K.A.R. Ismail, J.N.C. Castro, "PCM thermal insulation in buildings", *International Journal of Energy Research*, 21 (1997), pp. 1281-1296.
83. W. A.Qureshi, N. C.Nair, M.M.Farid "Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management", *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 5, May 2011, pp. 2110-2120. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.12.008
84. B. M. Diaconu, "Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: Influence of occupancy pattern and ventilation" *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 1, January 2011, pp.101-107
85. R. Baetens, B. P. Jelle, A. Gustavsen, "Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review" *Energy and Buildings* 43, 2011, pp.761–769. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.08.019
86. Disponibile sul sito: http://www.antonio.licciulli.unisalento.it/Corso_Ceramici/download/aerogel2.pdf
87. M.Reim, W.Körner, J.Manara, S.Korder, M.Arduini-Schuster, H.-P.Ebert, J.Fricke, "Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting", *Solar Energy* Volume 79, Issue 2, August 2005, pp131-139). DOI: 10.1016/j.solener.2004.08.032
88. K.I. Jensen, J.M. Schultz, F.H. Kristiansen, "Development of windows based on highly insulating aerogel glazings", *Journal of Non-Crystalline Solids* 350 (2004), pp. 351–357. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.047
89. Disponibile online sul sito: <https://cordis.europa.eu/project/id/ENK6-CT-2002-00648/it>
90. L. Heymans, B.Yrieix, E. Pons, "Permeation of water vapor through high performance laminates for VIP", 11th International Vacuum Insulation Symposium Proceedings, 2013.
91. G. Garnier, Y. Brechet, L. Flandin, F. Dubelley, E. Planes, C. Bas, E.Pons and B. Yrieix "Degradations of barrier multilayer films exposed to high temperature and/ or humidity", Proceedings of the 11th International Vacuum Insulation Symposium, Duebendorf, September 19 – 20, 2013, Empa, Switzerland, pp. 61-64.
92. M. Alam, H., Singh, M.C.Limbachiya, "Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions" *Applied Energy*, Volume 88, Issue 11, N2011, pp.3592-3602. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.04.040
93. F. E. Bofo, J.Ahn, J. Kim, J. Kim, "Computing thermal bridge of VIP in building retrofits using DesignBuilder", *Energy Procedia* 78, 2015, pp. 400 – 405. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.683
94. S. Charisi, "The Role of the Building Envelope in Achieving Nearly-Zero Energy Buildings (nZEBs)", *Procedia Environmental Sciences* 38 (2017) 115 – 120. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.092
95. A.Uriarte, I. Garai, A. Ferdinando, A. Erkoreka, O. Nicolas, E. Barreiro, "Vacuum insulation panels in construction solutions for energy efficient retrofitting of buildings. Two case studies in Spain and Sweden" *Energy & Buildings* 197 (2019), pp. 131–139. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.05.039
96. S. Fantucci, S. Garbaccio, A. Lorenzati, M.Perino, "Thermo-economic analysis of building energy retrofits using VIP - Vacuum Insulation Panels", *Energy & Buildings* 196 (2019) 269–279. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.05.019
97. G. Cammarata, "Impianti termotecnici - impianti di riscaldamento", vol 1b (2014)"

98. T.de Rubeis, I. Nardi, D. Ambrosini, D. Paoletti, "Is a self-sufficient building energy efficient? Lesson learned from a case study in Mediterranean climate", *Applied Energy* 218 (2018) 131-145. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.166
99. N. Rossi, "Manuale del Termotecnico", II edizione, 2007, pp560, Hoepli, Milano.
100. UNI 10339: 1995. Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.
101. A. Lepore, V. Ubaldi, S. Brini, "Inquinamento indoor: aspetti generali e casi studio in Italia", *Rapporti* 117/2010 (ISBN 978-88-448-0451-0) (2010): <http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00010300/10392-rapporto-117-2010.pdf>
102. Disponibile online sul sito: <https://www.thesan.com/it/progettare/ventilazione-meccanica-controllata/>
103. V. Bearzi, "Impianti di riscaldamento", IV edizione, Tecniche nuove, 2012, p. 235.
104. A.J. Marszal, J.S. Bourrelle, E. Musall, P. Heiselberg, A. Gustavsen, K. Voss, "Net Zero Energy Buildings – Calculation Methodologies versus National Building Codes", in: EuroSun Conference, Graz, Austria, 2010.
105. L. de Santoli, F. Mancini, "Progettazione degli impianti di climatizzazione", 2017, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN).
106. P. M. Putti, O. Bramanti, "Le tecnologie delle fonti rinnovabili di energia", GRUPPO24ORE, ENEA, 2012.
107. Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen, "Thermal energy storage: system and application", II ed., WILEY, 2011.
108. Svizzera Energia, "Accumulatori a batteria stazionari negli edifici", Ufficio federale dell'energia UFE, Berna, 2018.

11 Abbreviazioni ed acronimi

ACS	Acqua Calda Sanitaria
CCAA	Cemento Cellulare Aerato Autoclavato
EPS	Polistirene Espanso
FER	Fonti Energetiche Rinnovabili
IoT	Internet of Things
Ms	Massa superficiale
nZEB	nearly Zero Energy Building
NZEB	Net Zero Energy Building
NZSiEB	Net Zero Site Energy
NZSoEB	Net Zero Source Energy
NZEC	Net Zero Energy Costs
NZEmB	Net Zero Emissions Building
OSB	Oriented Strand Board
ZEXB	Net Zero Exergy Building
PEB	Positive Energy Building
PCM	Phase Change Materials
pdc	Pompe di calore
SIM	Super Insulating Materials
TCS	ThermoChemical energy Storage
TES	Thermal Energy Storage
VIP	Vacuum Insulation Panel
XPS	Polistirene Estruso
ZEB	Zero Energy Building