



EDIFICI ALTAMENTE ISOLATI COME ELEMENTO INDISPENSABILE DI SMART CITIES, BILANCIAMENTO DELLA RETE E POTENZIALE DI ACCUMULO PER LE RINNOVABILI

Prof. Lorenzo Pagliano
Ing. Roberto Armani
Ing. Silvia Erba
Ing. Andrea Sangalli

end use Efficiency Research Group (eERG-PoliMI, www.eerg.polimi.it)
del Politecnico di Milano (Università Pubblica)



Un ringraziamento particolare al dott. Luigi Petito per i preziosi
commenti e il supporto redazionale



Rapporto realizzato nell'ambito della Convenzione di Ricerca tra Knauf Insulation
Italia e Politecnico di Milano (Università Pubblica) - Dipartimento di Energia

KNAUFINSULATION

INDICE

■ Prefazione	4
■ Executive Summary	5
■ L'isolamento termico degli edifici per la piena integrazione delle rinnovabili nel sistema energetico	6
■ la centralità del concetto di fabbisogno di energia termica per riscaldamento (o raffrescamento) nella definizione e valutazione della prestazione degli edifici	8
■ L'urgenza di ridurre il fabbisogno di energia termica per riscaldamento (o raffrescamento) come premessa indispensabile di una rapida de-carbonizzazione	10
■ Edifici nuovi ed edifici ristrutturati a basso fabbisogno di energia termica come infrastruttura proiettata nel futuro	12
■ Gli edifici flessibili come elemento indispensabile per smart cities e gestione della variabilità delle fonti rinnovabili	14
■ Analisi di un intervento di ristrutturazione relativamente profonda (edilizia popolare Comune di Milano)	15
■ Risultati dell'analisi	19
■ Conclusioni	28
■ Bibliografia	30

PREFAZIONE

L'Unione Europea (UE) sta vivendo un momento cruciale per lo sviluppo delle proprie strategie finalizzate a far fronte al cambiamento climatico e a sostenere la transizione energetica. Ursula von der Leyen, la nuova Presidente della Commissione europea, ha preso atto della mutata sensibilità dei cittadini europei, che chiedono sempre più di "agire subito" per arginare il cambiamento climatico. Di pari passo, le leggi ed i regolamenti degli Stati membri dell'UE stanno progressivamente recependo un corpus insieme di nuove direttive relative all'energia, noto come "Energia pulita per tutti gli europei".

Amministratori pubblici, legislatori e decisori politici non possono più affrontare le sfide attuali con promesse demagogiche e slogan, bensì sono chiamati a promuovere un cambiamento reale in tutti i settori della società per far fronte all'emergenza climatica, di recente dichiarata formalmente dal Parlamento Europeo insieme a diverse città e nazioni in Europa.

L'UE e le sue istituzioni hanno l'opportunità di assumere la leadership mondiale in questo ambito, fornendo ispirazione e ponendosi come modello per altre regioni del mondo. L'atteso European Green Deal (EGD), presentato nel dicembre 2019 dalla nuova Commissione, sarà foriero di un'altra serie di azioni legislative che puntano ad aumentare le ambizioni dell'UE per il 2030 in vista di ridurre a zero le emissioni entro il 2050.

Da questo punto di vista, il settore dell'edilizia gode di un grande potenziale e riveste un ruolo fondamentale per affrontare le sfide poste dalle esigenze di tutela ambientale e climatica. Infatti, il parco immobiliare nei Paesi dell'UE consuma il 40% di tutta l'energia primaria prodotta ed è responsabile del 36% delle emissioni di CO₂. Considerando l'intero ciclo di vita degli immobili, tuttavia, si arriva al 50% dell'energia primaria consumata, al 50% delle emissioni di CO₂ ed al 50% di tutte le risorse minerarie estratte a livello globale. Al fine di raggiungere obiettivi energetici e climatici di lungo termine, come quelli stabiliti nell'accordo di Parigi alla COP21, è quindi necessario decarbonizzare il settore edilizio.

La maggior parte degli europei conosce bene la necessità di regolare i sistemi di riscaldamento in modo che siano sempre accesi quando un edificio è occupato. Ciò è necessario in quanto la dispersione di calore della maggior parte degli edifici è così grande, che gli occupanti avvertono sensazioni di freddo nel giro di poche ore dopo che il riscaldamento è stato spento. E se così non fosse? Se l'edificio mantenesse il calore in modo così efficace da ridurre drasticamente la quantità di energia necessaria a riscaldarlo?

Lo studio intende rispondere esattamente a questo tipo di domande. I dati raccolti forniscono informazioni sul comportamento fisico di edifici altamente isolati in una zona climatica fredda (invernale) per verificare se e in che misura essi possano contribuire al sistema energetico tramite accumulo di energia e bilanciamento della rete. I risultati dello studio sono sorprendenti: gli autori concludono che un edificio altamente isolato, dopo essere stato riscaldato per un giorno, può mantenere una temperatura confortevole per un periodo che va fino ai quattro giorni. Per questo è possibile affermare che, se reso efficiente, il patrimonio edilizio dell'UE potrà contribuire in modo decisivo al necessario percorso di decarbonizzazione della nostra società e favorire lo sviluppo di Smart Cities.

Allo stesso tempo, è cruciale sottolineare come questa ricerca dimostri che per ottenere i migliori risultati sia necessario adottare molteplici misure che includono la coibentazione e sistemi di ventilazione meccanica controllata dotati di meccanismi di recupero del calore. Per chi definisce programmi di efficienza energetica è la conferma che incentivare singole misure non basta per raggiungere risultati ottimali.

Sono certo che i lettori di questo studio impareranno qualcosa di nuovo e spero che tale ricerca contribuirà a porre l'efficientamento degli edifici al centro dell'agenda politica e della transizione energetica. Mi congratulo infine con il gruppo di ricerca per l'eccellente lavoro svolto e attendo con ansia di poter essere testimone degli effetti positivi che deriveranno dall'attuazione delle idee contenute in questa relazione.

Adrian Joyce

Secretario Generale EuroACE (The European Alliance of Companies for Energy Efficiency in Buildings)

Bruxelles, Ottobre 2019

EXECUTIVE SUMMARY

- La ricerca offre una visione innovativa di come edifici ben isolati possano mantenere una temperatura interna confortevole fino a tre o quattro giorni dopo un solo giorno di "carica termica" attraverso il riscaldamento.
- L'accumulo di energia termica a lungo termine crea "edifici fisicamente intelligenti" e flessibili ovvero in grado di collegarsi alla rete elettrica quando sono disponibili forniture di energia rinnovabile. La ricerca dimostra che un edificio ben isolato è un elemento essenziale, insieme alla produzione di energia da fonti rinnovabili, per decarbonizzare efficacemente il parco immobiliare esistente.
- Lo studio mostra anche che ristrutturazioni edilizie profonde e di alta qualità possono ridurre i consumi di energia fino all'80%, sottolineando il ruolo fondamentale che il patrimonio edilizio efficiente dal punto di vista energetico deve svolgere nella decarbonizzazione del sistema energetico.
- Inoltre, lo studio rivela come le ristrutturazioni profonde degli edifici riducano di quattro volte l'investimento iniziale per la generazione, la distribuzione e la diffusione dell'energia negli edifici, oltre a migliorare significativamente i livelli di comfort.
- Inoltre, se l'energia termica è fornita da pompe di calore o da teleriscaldamento, le ristrutturazioni profonde riducono la domanda di energia e i relativi costi all'ora di punta ovvero nei momenti in cui tutti gli edifici convenzionali ed inefficienti richiedono energia dalle reti (elettrica o di teleriscaldamento).
- I risultati sono accompagnati da un'analisi dell'attuale uso globale di energia che dimostra che nonostante la crescita delle energie rinnovabili, in tutto il mondo si registra un costante aumento dell'uso di energia fossile.
- Alla riduzione del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento non corrisponde una diminuzione della domanda di energie rinnovabili, sensori e controlli. Al contrario, gli edifici efficienti dal punto di vista energetico rendono più facile ed efficace un uso diffuso delle energie rinnovabili e dei controlli.
- La ricerca raccomanda una ristrutturazione profonda del patrimonio edilizio esistente: l'isolamento termico degli edifici e la conseguente riduzione della domanda di energia sono presupposti indispensabili per una rapida transizione verso le energie rinnovabili e la decarbonizzazione urgente delle aree urbane.

L'ISOLAMENTO TERMICO DEGLI EDIFICI PER LA PIENA INTEGRAZIONE DELLE RINNOVABILI NEL SISTEMA ENERGETICO



Grazie a ristrutturazioni profonde e di qualità è possibile ridurre i consumi dei nostri edifici fino all'80% e quindi ridurre le bollette energetiche. Ma non solo. L'aumento dell'isolamento termico delle pareti e coperture dilata considerevolmente l'intervallo di tempo durante il quale la temperatura interna dell'edificio rimane confortevole dopo lo spegnimento dell'impianto termico.

Lo studio dell'end-use Efficiency Research Group (eERG) del Politecnico di Milano evidenzia infatti che basta un solo giorno di riscaldamento per mantenere l'ambiente confortevole per un periodo che si estende fino a tre o quattro giorni. Cio' significa che edifici ben isolati offrono la flessibilità necessaria a ricevere energia quando essa è disponibile, attenuando i picchi di domanda di potenza sulla rete elettrica (quando tutti gli edifici inefficienti

invece chiedono potenza) e sfruttando a dovere momenti di sovrabbondanza e scarsità dell'offerta di energia da fonti rinnovabili.

Il lavoro del Politecnico sostiene con dati molto significativi il principio *Energy Efficiency First* e giustifica strategie energetiche razionali in cui la riduzione della domanda di energia negli edifici è un prerequisito indispensabile per una rapida transizione verso le energie rinnovabili e verso la ormai necessaria ed urgente decarbonizzazione delle aree urbane.

L'impegno per l'efficienza energetica e per la sostenibilità nell'edilizia sono driver fondamentali della nostra azione. La convenzione di ricerca che abbiamo attivato con il Politecnico si inserisce perfettamente in questo quadro. Il mio auspicio è che il lavoro svolto sia di aiuto a tutti gli attori - politici, industriali ed accademici - impegnati nella transizione energetica e nel rilancio dell'edilizia.

Paolo Curati
Managing Director, Knauf Insulation Italia
Volpiano, Giugno 2020



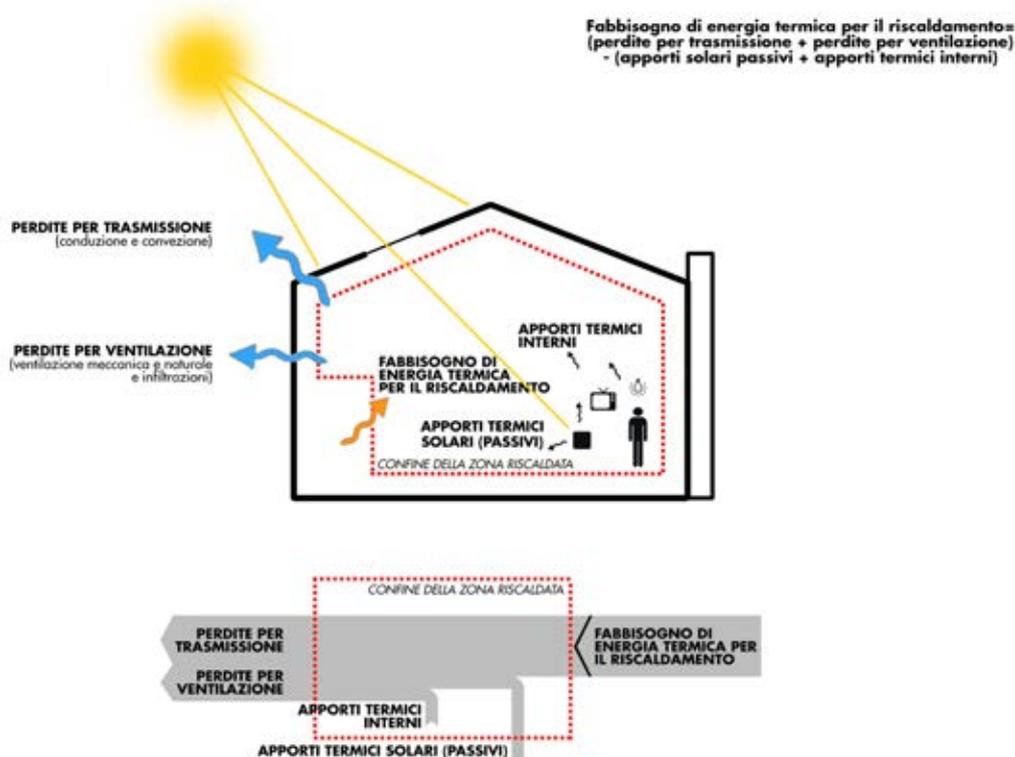
INTRODUZIONE

In assenza di una serie di definizioni condivise e di una terminologia di riferimento, c'è il rischio che una serie di questioni chiave relative all'uso dell'energia ed il conseguente impatto sull'ambiente siano esposte ad ambiguità che possono essere utilizzate per evitare un chiaro impegno all'azione. Il campo della prestazione energetica degli edifici non è esente da questo rischio. È dunque necessario iniziare ricordando l'approccio adottato dalla norma EN-ISO 52000-1 e alla cui terminologia è stato fatto riferimento nel corso della seguente ricerca. In questo rapporto tutti i termini che hanno una definizione esplicita negli standard ISO, EN o UNI sono formattati in grassetto.

Segue la definizione di **fabbisogno energetico per il riscaldamento** perché questo studio è incentrato su una simulazione delle prestazioni invernali di un edificio completamente ristrutturato nel Nord Italia. L'obiettivo è quello di verificare se il potenziale di accumulo energetico legato alla massa della struttura dell'immobile può avere un effetto positivo sul sistema energetico nel suo complesso.

LA CENTRALITÀ DEL CONCETTO DI FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA PER RISCALDAMENTO (O RAFFRESCAMENTO) NELLA DEFINIZIONE E VALUTAZIONE DELLA PRESTAZIONE DEGLI EDIFICI

Il **fabbisogno di energia termica per riscaldamento o raffrescamento**¹ (definito nella UNI TS 11300-1 come la "quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo")² è il punto di partenza di ogni calcolo di prestazione energetica degli edifici (European Commission, 2012) (UNI, 2008).



La quantità fisica **fabbisogno di energia termica per riscaldamento o raffrescamento** è inoltre necessaria per la definizione e valutazione di edifici nearly Zero Energy Buildings (nZEB) (L. Pagliano & Roscetti A., 2019).

Lo Standard EN ISO 52000-2 (CEN & ISO, 2017b) afferma:

“l’uso di un solo requisito, ad es. l’indicatore numerico di uso di **energia primaria**, è fuorviante. Nello standard ISO 52000-1 (CEN & ISO, 2017a) vengono associati diversi requisiti per una valutazione coerente dell’edificio a energia quasi zero.”

Più precisamente:

“CEN propone di combinare i differenti requisiti in una valutazione coerente di edificio a energia quasi zero. La metodologia proposta procede per passi ‘dal **fabbisogno di energia termica** alla prestazione energetica globale espressa in termini di uso di **energia primaria**’. Solo se sono soddisfatte le richieste di ogni passo, allora l’edificio può essere qualificato alla fine come ‘quasi zero energia’. Questo approccio è simile ad una corsa ad ostacoli”

L’obiettivo di questa sequenza di indicatori può essere sintetizzato come segue:

l’indicatore **fabbisogno di energia termica per riscaldamento (o per raffrescamento)**³, descrive la qualità termica dell’involucro dell’edificio in condizioni invernali (o estive) e il suo contenimento è il punto chiave dell’applicazione del principio “*efficiency first*”

l’indicatore **energia primaria totale**, che considera l’equivalente in energia primaria di tutti i flussi di energia rinnovabile e non rinnovabile entranti nel confine dell’edificio; la sua limitazione punta a migliorare le prestazioni degli impianti e la qualità delle fonti energetiche

l’indicatore **energia primaria non rinnovabile**, che considera l’equivalente in energia primaria dei soli flussi di energia non rinnovabile entranti nel confine e il cui contenimento punta a promuovere un maggiore uso di energia rinnovabile, una volta ridotta l’**energia primaria totale**.

La precisione nella definizione dei concetti principali ed in particolare del **fabbisogno di energia termica per riscaldamento (o per raffrescamento)** di un edificio è carente nel dibattito pubblico e rende vaghi gli impegni e le possibilità di monitoraggio che accompagnano le dichiarazioni a favore di “*efficiency first*”. La serie di standard EN 52000 supporta la precisione, a tutto favore di risultati ambientali certi e del riconoscimento del lavoro di qualità nell’industria della costruzione, dei componenti per l’edilizia e delle rinnovabili. Una sintesi ed esemplificazioni di calcolo degli indicatori si possono trovare nelle guida alla Energy Performance of Building Directive (EPBD) pubblicata dal Building Performance Institute Europe (Lorenzo Pagliano & Roscetti A., 2019)

Come mostrato in Figura 1, il **fabbisogno di energia termica per riscaldamento** è dato dalla differenza tra l’energia dispersa (per trasmissione attraverso l’involucro e per infiltrazioni e ventilazione) e l’energia “guadagnata” gratuitamente grazie alle radiazioni solari e all’energia emessa all’interno dell’edificio dagli occupanti, dai macchinari, dal sistema di illuminazione e altre fonti che non fanno parte del sistema di riscaldamento.

¹ In questo testo i termini che hanno una definizione esplicita negli standard UNI, EN o ISO sono formattati in **grassetto**

² Per questa quantità nello standard EN ISO 52000-1 si usa il termine **energy need for heating** o rispettivamente **energy need for cooling**

³ La “quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo”

⁴ European Union’s H2020 project, grant agreement No 754174

L'URGENZA DI RIDURRE IL FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA PER RISCALDAMENTO (O RAFFRESCAMENTO) COME PREMESSA INDISPENSABILE DI UNA RAPIDA DE-CARBONIZZAZIONE

Nonostante gli impegni internazionali ripetutamente assunti a partire dalla prima Convenzione Internazionale sul Clima, 25 anni fa, i dati 2000 - 2017 mostrano, a livello mondiale, una velocità di crescita nell'uso dell'energia molto maggiore della velocità di crescita dell'output delle fonti rinnovabili (Figura 2).

I dati mostrano che nel periodo di tempo considerato il mondo ha usato ogni anno **maggiori quantità di energia** (fossile e rinnovabile) piuttosto che effettivamente sostituire l'uso preesistente di energia fossile con energia rinnovabile (Jackson et al., 2018).

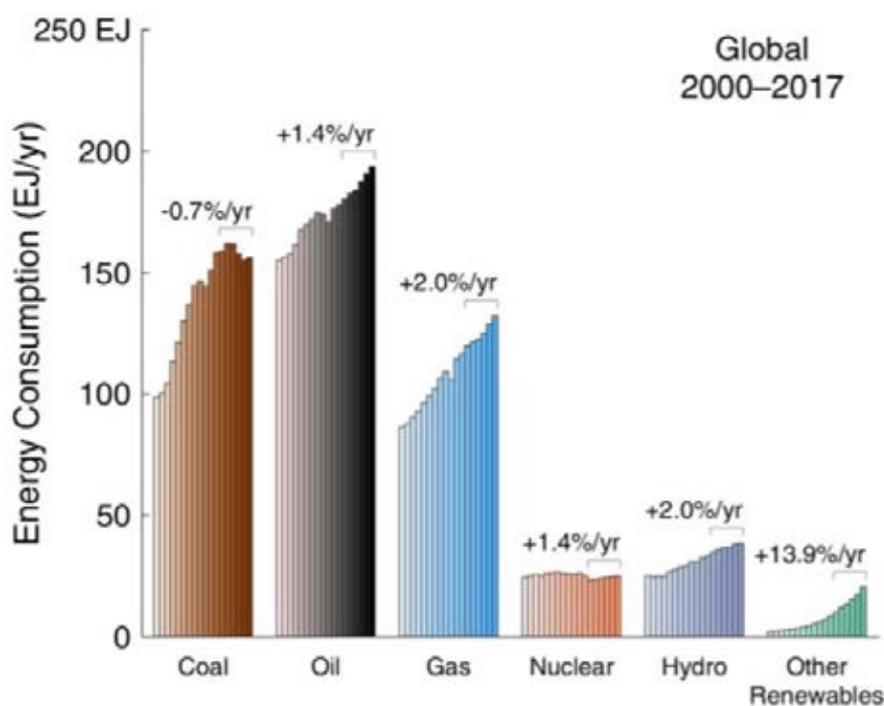


Figura 2: Crescita dell'uso finale di energia nel mondo 2000-2017 in ExaJoule/anno. Fonte: (Jackson et al., 2018)

Per quanto riguarda l'Europa l'uso di **energia primaria totale** (esclusa l'energia inglobata nei beni importati) si è ridotto nel periodo della crisi economica ed è aumentato rapidamente negli ultimi tre anni (Figura 3).

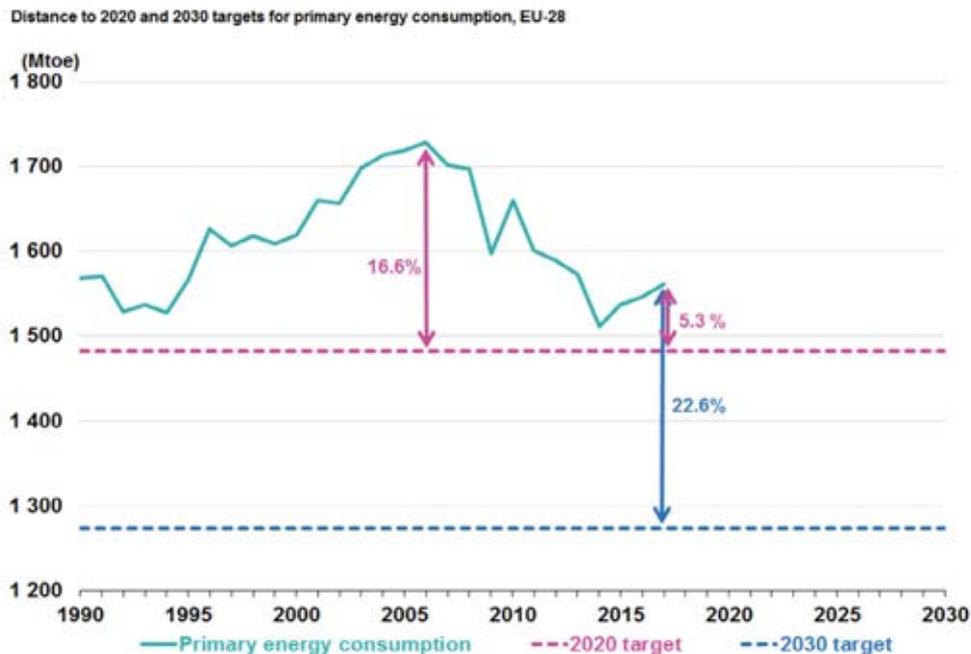


Figura 3: Andamento nel tempo del **fabbisogno di energia primaria totale** in Unione Europea (esclusa l'energia inglobata nei beni importati) 1990-2017. Fonte: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_saving_statistics

L'unico scenario che renderebbe possibile limitare il dissesto climatico entro 1,5 °C, senza commettere azzardi ed ingiustizie che assegnerebbero alle generazioni future l'onere (fin ben oltre 2100) di rimuovere CO₂ dall'atmosfera con tecnologie di cui non è provata la fattibilità tecnico-economica, richiede la riduzione dell'uso di **energia finale** mondiale del 40% al 2050 rispetto all'uso attuale.

Solo tale drastica riduzione consentirebbe una rapida de-carbonizzazione della domanda restante (Grubler et al., 2018). Una riduzione della domanda del 40% a livello globale comporterebbe ovviamente una riduzione percentuale molto maggiore nel Nord Globale, inclusa l'Europa e i suoi Stati Membri. Allo stesso tempo ridurre l'uso finale dell'energia non ridurrebbe solo le emissioni di CO₂, ma anche le emissioni di inquinanti che danneggiano direttamente la salute umana (come PM10 e PM2,5, NO₂, SO₂, cosa che non si ottiene, ad esempio, con le ipotetiche tecnologie di Cattura e Sequestro del Carbonio c.d. CCS).

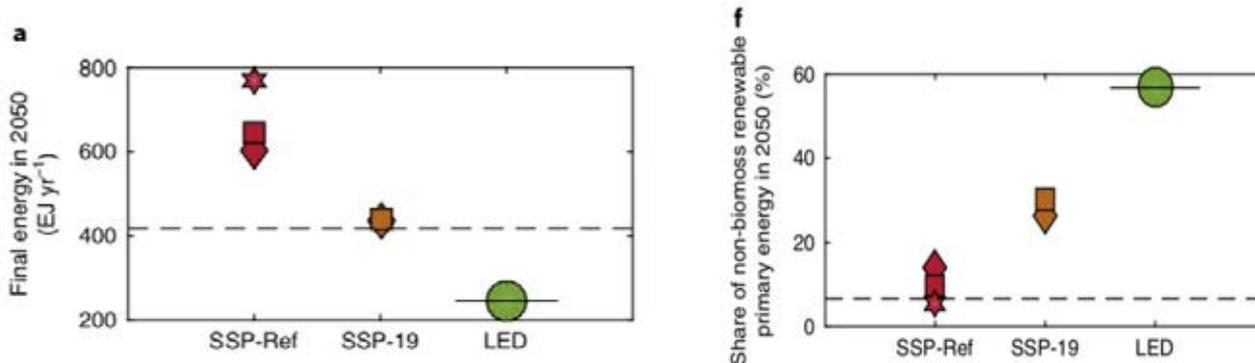


Figura 4: a) Uso di **energia finale** mondiale al 2050 in vari scenari compresi nel rapporto IPCC 2018, incluso lo scenario *Low Energy Demand* (LED) in ExaJoule/anno; f) frazione di **energia primaria** da fonti rinnovabili (escluse biomassa) al 2050. Fonte: (Grubler et al., 2018).

Le fonti rinnovabili stanno aumentando in quantità ed efficienza ma il percorso per renderle prevalenti nella fornitura di energia (ai livelli di uso di energia attuali) sarebbe una trasformazione colossale da percorrere in un intervallo di tempo brevissimo.

In una strategia razionale dunque non un solo kWh da rinnovabili dovrebbe essere utilizzato in modo inefficiente o sequestrato per usi che presto potremmo ritenere superati, come ristrutturazioni "leggere" di edifici o veicoli elettrici individuali sovradimensionati in numero e taglia.

EDIFICI NUOVI ED EDIFICI RISTRUTTURATI A BASSO FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA COME INFRASTRUTTURA PROIETTATA NEL FUTURO

Migliaia di edifici nuovi con **fabbisogno di energia termica per riscaldamento** dell'ordine di 15 kWh/(m²·anno) vengono realizzati ogni anno e rigorosamente documentati nell'ambito dell'etichettatura volontaria **Passivhaus Standard** e delle categorie più avanzate di **Casaclima** e **Minergie**. A titolo di confronto, che edifici esistenti possono avere fabbisogni tra dieci e venti volte superiori (nell'ordine di 150 kWh/m²anno per edifici esistenti in Europa occidentale e 250 kWh/m²anno per edifici esistenti nell'Europa centrale ed orientale (Harvey 2010) (Ürge-Vorsatz et al. 2014).

Non tutte le certificazioni degli edifici forniscono tuttavia informazioni univoche e facilmente confrontabili. La legislazione Italiana attuale per nuovi edifici, ad esempio, non fornisce un termine di confronto univoco per gli edifici zero energia (Attia et al., 2017). Il **fabbisogno di energia termica** con cui confrontare l'edificio reale non è una quantità fissata una volta per tutte e uguale per tutti gli edifici come nel caso delle certificazioni volontarie succitate. Al contrario il valore di un certo parametro energetico con cui confrontare l'edificio oggetto di analisi/certificazione consiste nel valore che quel parametro assume in un edificio virtuale con la stessa forma, orientamento e rapporto (superfici vetrate)/(totale dalla superficie disperdente), detto **edificio di riferimento**. Tale edificio è solo sottoposto al vincolo di avere predefiniti valori delle trasmittanze termiche stazionarie dei suoi componenti di involucro e di rendimento degli impianti. Come conseguenza, l'edificio virtuale di riferimento, e con esso il valore di riferimento del **fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento** sono diversi per ogni edificio sottoposto ad analisi/certificazione. Il che rende poco trasparente il confronto tra due edifici tra di loro, contraddicendo l'obiettivo stesso della certificazione.

L'edificio reale deve avere un valore di **fabbisogno di energia termica** minore di quello dell'edificio di riferimento. Ma il fabbisogno in quest'ultimo può risultare elevato se forma, orientamento e rapporto superfici vetrate/superficie totale sono scelti in modo sfavorevole.

Questo è in contrasto con l'Allegato I della Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici che richiede di tenere conto anche di forma e orientamento nel calcolo delle prestazioni, mentre con questo meccanismo gli indicatori di prestazione risultano indipendenti da tali parametri.

Ristrutturazioni di qualità degli involucri edilizi esistenti possono produrre una riduzione fino all'80% del **fabbisogno di energia termica per riscaldamento o raffrescamento**. Si vedano ad es. ristrutturazioni di edifici di edilizia popolare e scuole realizzati dal Comune di Milano col supporto tecnico dell'**end use Efficiency Research Group (eERG-PoliMI)** del Politecnico di Milano⁵. E' possibile ristrutturare edifici esistenti portandoli vicini al livello Passivhaus di edifici nuovi (L. Pagliano, Carlucci, Causone, Moazami, & Cattarin, 2016).

Nella situazione descritta nel capitolo precedente, costruire nuovi edifici ed effettuare ammodernamenti che non applicano le migliori strategie di progettazione unitamente all'uso dei migliori materiali e componenti edilizi divergerebbe nettamente dall'obiettivo di decarbonizzazione. Se si imboccasse tale percorso non ottimale, lo stock edilizio risulterebbe bloccato per parecchi decenni in un livello di **fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento** e di **energia consegnata** molto più alto di quanto reso possibile dall'innovazione nel settore delle costruzioni. Ne risulterebbe uno spreco di energia (perchè il suo uso potrebbe essere evitato) pari a circa l'80 % del consumo mondiale nel 2005. Tale effetto di "congelamento in situazione di spreco" è stimato e riportato nel capitolo 'Building' dell'Intergovernmental Panel on Climate Change Report 2014 (Lucon & Ürge-Vorsatz, 2014) e in (Ürge-Vorsatz et al., 2018).

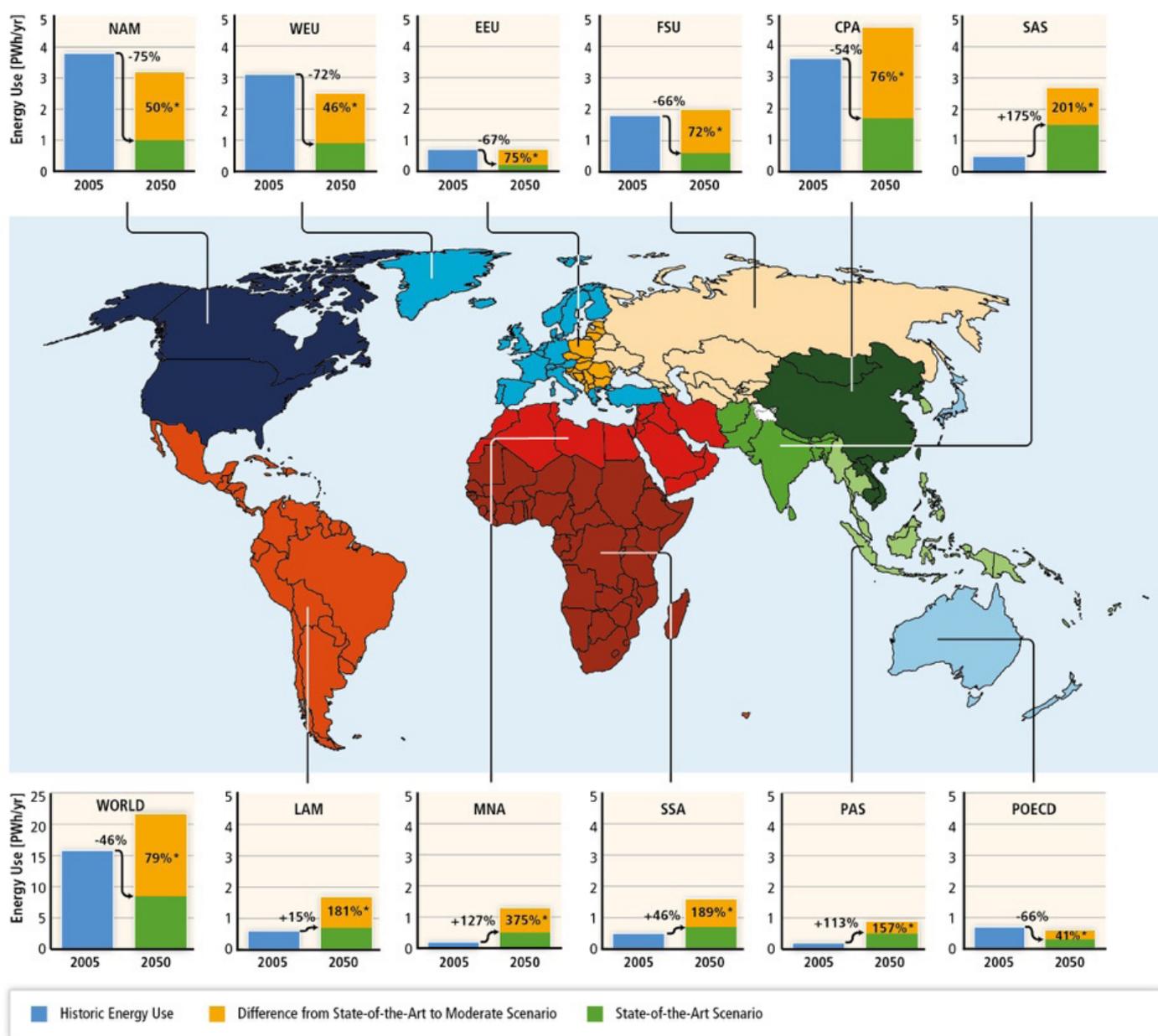


Figura 5. Effetto di "congelamento in situazione di spreco" della mancata applicazione delle migliori tecnologie negli edifici nuovi e ristrutturazioni.

⁵ Si veda <http://eu-gugle.eu/it/citta-pilota/milano/> e <http://www.eerg.it/index.php?p=Progetti> - EU-GUGLE

GLI EDIFICI FLESSIBILI COME ELEMENTO INDISPENSABILE PER SMART CITIES E GESTIONE DELLA VARIABILITÀ DELLE FONTI RINNOVABILI

L'ipotesi di lavoro alla base della ricerca che il gruppo **eERG-PoliMI** sta sviluppando nell'ambito di una Convenzione di Ricerca con **Knauf Insulation Italia** è che l'aumento dell'isolamento termico all'esterno delle pareti e coperture, dilatando considerevolmente l'intervallo di tempo durante il quale un edificio si mantiene nell'intervallo di comfort⁶, consenta di:

Coordinare la domanda con l'offerta di energia locale ovvero limitare l'attuale rigidità della domanda di energia da parte degli edifici e dunque consentire loro di ricevere energia da fonti locali (rinnovabili o recuperi di energia) quando questa risulta disponibile o scambiarla con altri edifici in modo flessibile. Spesso l'attuale narrativa sulle smart cities, micro-grids, etc. dimentica che rendere "fisicamente smart" gli involucri degli edifici è il fattore indispensabile per rendere possibile l'uso degli altri ingredienti, come sofisticati sensori e dispositivi di controllo.

Sfruttare i momenti di sovrabbondanza di offerta da rinnovabili sulla rete rendendo disponibili strutture di accumulo di energia (nella forma di capacità termica degli edifici).

Gestire condizioni di scarsità dell'offerta di energia attenuando i picchi di domanda di potenza sulla rete elettrica o di teleriscaldamento (peak shaving, demand response, potenziale partecipazione al *capacity market* creando valore aggiunto addizionale a quello legato al risparmio di energia e aumento di comfort).

⁶Intervallo di comfort, stabilito dagli Standard internazionali sulla base di migliaia di interviste ad occupanti di edifici e contemporanee misure di parametri fisici. Cfr: ASHRAE Global Comfort Database I e II (Földváry Ličina et al., 2018).

ANALISI DI UN INTERVENTO DI RISTRUTTURAZIONE RELATIVAMENTE PROFONDA (EDILIZIA POPOLARE COMUNE DI MILANO)

Presso un condominio di edilizia popolare⁷, sono in corso di realizzazione interventi che il Comune di Milano ha progettato col supporto di eERG-PoliMI. Gli interventi includono l'applicazione di cappotto isolante (25 cm di spessore con conduttività tra 0,035 a 0,040 W/(m·K)), cura accurata dei ponti termici, sostituzione infissi e vetri, ed installazione di ventilazione meccanica con recupero di calore. Gli interventi non dipendono da particolari caratteristiche dell'edificio e sono replicabili su tipologie simili, ampiamente diffuse.



Figura 6: Edifici di Edilizia Residenziale Popolare prima (foto) e dopo (modello) ristrutturazione profonda

⁶ Dati di base raccolti nell'ambito dei progetti europei EU-GUGLE (<http://eu-gugle.eu/pilot-cities/milano/>) e Sharing Cities (<https://sharingcities.wixsite.com/milano>), elaborazioni ed analisi sulla "flessibilità" eseguite nell'ambito della Convenzione di Ricerca tra Politecnico di Milano e Knauf Insulation Italia.

La Tabella 1 illustra le caratteristiche degli edifici analizzati.

	Superficie Lorda [m ²]	Superficie utile [m ²]	Volume lordo (V) [m ³]	Superficie lorda disperdente (S) [m ²]	Rapporto S/V [m ⁻¹]	Rapporto superficie finestre / superficie disperdente	Numero di piani
Edificio_1	2836	-	8462	4583	0.54	0,14	4
Edificio_2	1797	-	5361	2967	0.55	0,14	4
Totale	4633	4170	13824	7549	0.55	0,14	4
Scale e Ascensori	543	-

Tabella 1: Dati generali (fonte: DG tecnica Comune di Milano, Arch. Manzoni e Bardeschi)

La Tabella 2 illustra le caratteristiche fisiche degli involucri edilizi analizzati, prima e dopo l'intervento di ristrutturazione profonda. Gli interventi non dipendono da particolari caratteristiche dell'edificio e sono replicabili su tipologie simili, ampiamente diffuse.

Caratteristiche fisiche dell'involucro edilizio		prima della ristrutturazione	dopo la ristrutturazione
Trasmittanza termica strutture opache verticali	U [W/(m ² K)]	1,15	0,13
Trasmittanza termica solaio verso sottotetto non abitabile	U [W/(m ² K)]	3,00	0,15
Trasmittanza termica solaio su pilotis	U [W/(m ² K)]	2,40	0,17
Trasmittanza termica dei vetri	U [W/(m ² K)]	3,00	1,42
Trasmittanza termica dei telai	U [W/(m ² K)]	5,00	1,6
Trasmittanza solare totale dei vetri	%	0,75	0,52
Ricambi d'aria all'ora	n ⁻¹	0,5 di giorno 0,25 di notte	0,5 di giorno 0,25 di notte
Ventilazione meccanica con recupero del calore	Efficienza di recupero %	Assente 0%	Presente 75%
Ponti termici		elevati	Fortemente attenuati

Tabella 2: Caratteristiche fisiche principali dell'edificio, prima e dopo la ristrutturazione

L'analisi dell'intervento di adeguamento si basa su una scelta accurata dell'intervallo di comfort e su simulazioni dinamiche che tiene conto di apporti di energia interni ed apporti solari utili.

L'edificio è stato modellato nell'ambiente di simulazione EnergyPlus, realizzando un modello geometrico dettagliato, incluse partizioni interne, per poter valutare il comportamento dei singoli appartamenti ed esposizioni (si veda Figura 7).

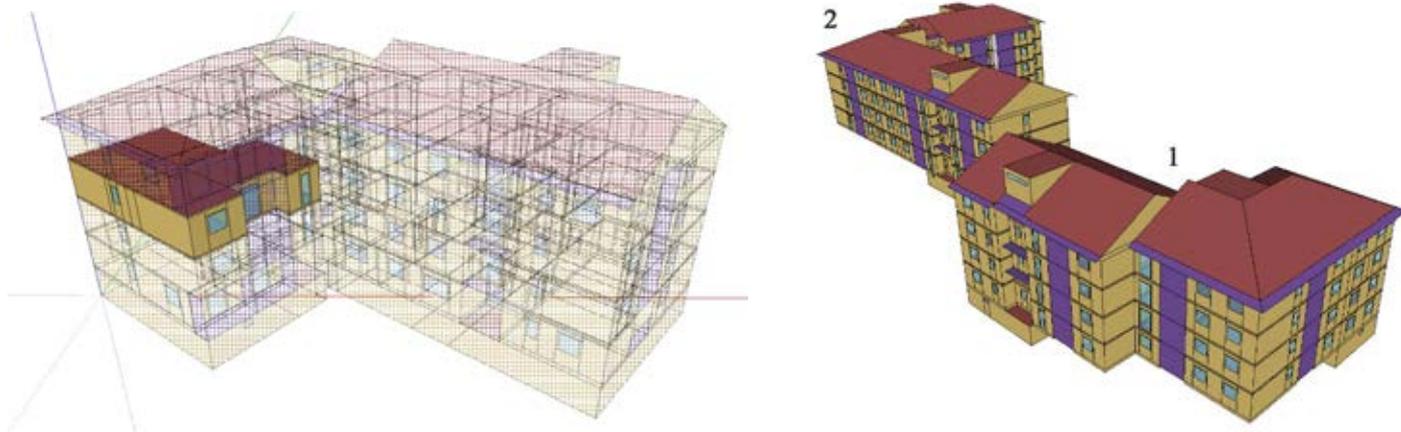


Figura 7:
Modellazione 3D degli edifici con la coppia di software sketch-up ed energyplus.
Particolare della suddivisione fine in zone termiche

Per determinare l'intervallo di comfort per la stagione invernale, si è fatto riferimento alla norma UNI EN 15251 (UNI & CEN, 2008) ed EN 16798-1:2019 scegliendo la categoria II (edifici nuovi) e si è adottato il modello di comfort di Fanger (applicabile ad edifici condizionati). Si è assunto che i fruitori dell'edificio indossino abiti invernali (1 clo), sviluppino un'attività metabolica corrispondente a lavoro di ufficio (1,2 met), l'aria si muova a velocità tipica degli interni (0,1 m/s) e che l'umidità relativa sia pari al 40%.

Utilizzando il tool online dell'università di Berkeley in cui sono incorporati gli algoritmi per il modello di Fanger e il modello Adattivo nelle versioni EN 15251 e ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017), si ottiene un intervallo di comfort che si estende da 19,5 C a 24,1 C di **temperatura operativa**. Entro questo intervallo l'ambiente risulta in condizioni di PMV (voto medio di comfort previsto) tra -0,5 e +0,5, che corrispondono appunto all'intervallo di comfort di categoria II (Földváry Ličina et al., 2018), (Lorenzo Pagliano & Zangheri, 2010). La **temperatura operativa** che è il fattore che maggiormente influenza il comfort (Lorenzo Pagliano & Zangheri, 2010), è definita nell'Annex G di EN-ISO 7726:2001, e quando la velocità d'aria è bassa può essere approssimata come il valore medio della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante, che a sua volta è una media pesata delle temperature delle superfici della stanza. Dipende dalla posizione nella stanza; qui abbiamo considerato il suo valore nel centro dello spazio riscaldato.

Nel nostro modello di simulazione gli apporti interni ascrivibili agli occupanti, elettrodomestici, apparecchiature ed illuminazione durante la stagione invernale ammontano a 26 kWh/m² di contributi gratuiti, sulla base di una misurazione diretta dell'uso di energia elettrica in immobili selezionati e di assunzioni plausibili sull'occupazione. Un valore simile si ottiene con l'applicazione di standard nazionali per la valutazione di immobili imposti per legge. L'applicazione del **SIA standard** in uso in Svizzera a questo caso di studio fa ottenere apporti invernali interni di circa 23 kWh/m². Applicando il metodo di calcolo del PassivHaus ad una casa monofamiliare (densità di occupazione più bassa) si arriva ad un risultato di apporti invernali interni di circa 9 kWh/m². Gli apporti interni dipendono da dati soggetti a variazione da caso a caso quali il tipo ed uso delle illuminazioni ed apparecchiature interne e la densità di occupazione. Lo studio ha dunque sviluppato un'analisi di sensitività su due livelli: apporti gratuiti di 26 kWh/m² e 0 kWh/m².

Per quanto riguarda gli apporti solari attraverso le finestre, lo studio ha fatto ricorso a simulazioni dettagliate per un intero anno ricorrendo ad un archivio di condizioni meteo che rappresenta il clima locale. Il valore che ne è risultato ammonta ad un apporto di circa 8 kWh/m² durante l'inverno. Le regole di calcolo degli standard Italiani conducono ad un risultato di circa 12 kWh/m². In ogni caso, lo studio ha condotto l'analisi di sensitività considerando due livelli di **irradianza solare**: uno che si riferisce ad una normale giornata media ed un altro riferito ad una giornata invernale con clima rigido (nel seguito indicata come giornata "sfavorevole").

Per quanto riguarda il clima, come illustrato in Figura 8 e Figura 9, nelle simulazioni con EnergyPlus si è considerato un clima tipico della pianura padana, scegliendo una "giornata invernale media" che viene ripetuta ciclicamente, per depurare il calcolo dalla variabilità del clima.

Una seconda serie di simulazioni viene effettuata utilizzando una ripetizione ciclica di una "giornata invernale sfavorevole" con temperatura che si mantiene sempre sotto gli 0 °C e **irradianza solare** pari a quasi la metà di quello che si riscontra durante la succitata "giornata invernale media" (Ferrari et al. 2013).

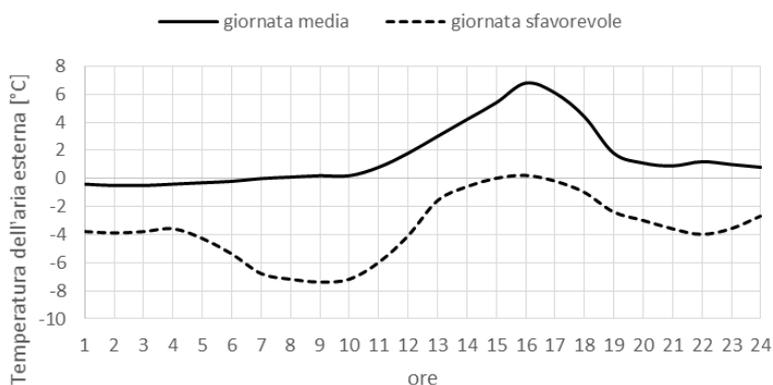


Figura 8: Temperatura dell'aria a bulbo secco in una giornata invernale media e una giornata invernale sfavorevole.

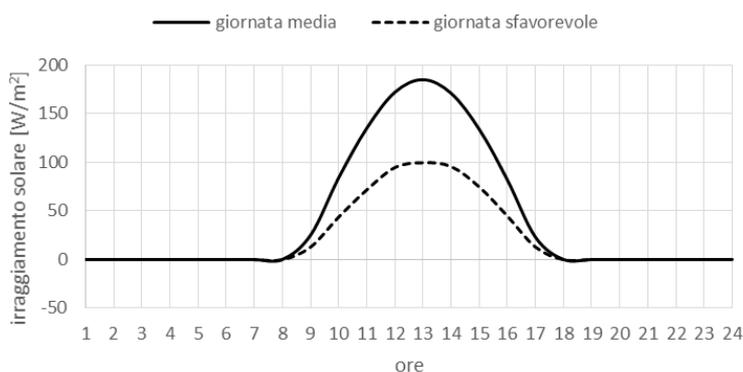


Figura 9: Irradianza solare globale [W/m²] su superficie orizzontale in una giornata invernale media e una giornata invernale sfavorevole.

Negli edifici reali che sono oggetto di analisi, l'emissione di energia negli ambienti avviene tramite radiatori. Nelle simulazioni, invece per semplicità si assume che l'energia venga fornita agli ambienti da un sistema di distribuzione tutt'aria. Questa scelta dell'impianto di riscaldamento è cautelativa in quanto esclude dal nostro calcolo la capacità termica dell'impianto idronico.

⁸ <http://comfort.cbe.berkeley.edu>

⁹ Si rammenta che secondo EN 15251 e EN 16798-1:2019 la categoria I non è una categoria "migliore" ma è destinata ad ambienti con persone fragili (bambini piccoli, anziani, malati)

PER QUANTO TEMPO L'EDIFICIO OGGETTO DI RISTRUTTURAZIONE PROFONDA RIMANE IN COMFORT A IMPIANTO SPENTO?

Dopo una ristrutturazione profonda come quella descritta, nelle nostre simulazioni portiamo la **temperatura operativa** degli ambienti a 24,1°C la manteniamo a questo valore rispettivamente per 1, 2, 3, 4 e 5 giorni prima di spegnere l'impianto. Con clima costituito dalla giornata media ripetuta, il periodo di tempo in cui la zona termica considerata rimane in comfort è diverso nei 5 casi, ma la differenza è limitata.

Caricando di energia termica (ma sempre mantenendo gli ambienti interni all'interno dell'intervallo di comfort) l'involucro per 1 giorno, gli ambienti rimangono nell'intervallo di comfort dopo lo spegnimento dell'impianto per circa 4 giorni (96 ore, come illustrato nella Figura 10).

Caricando di energia termica l'involucro per 2 giorni, gli ambienti rimangono in comfort dopo lo spegnimento dell'impianto per oltre 5 giorni (oltre 120 ore, come illustrato in Figura 11).

Un ulteriore aumento del periodo di carica produce risultati marginali, mostrando che è possibile utilizzare larga parte del potenziale di accumulo con una sola giornata di carica.

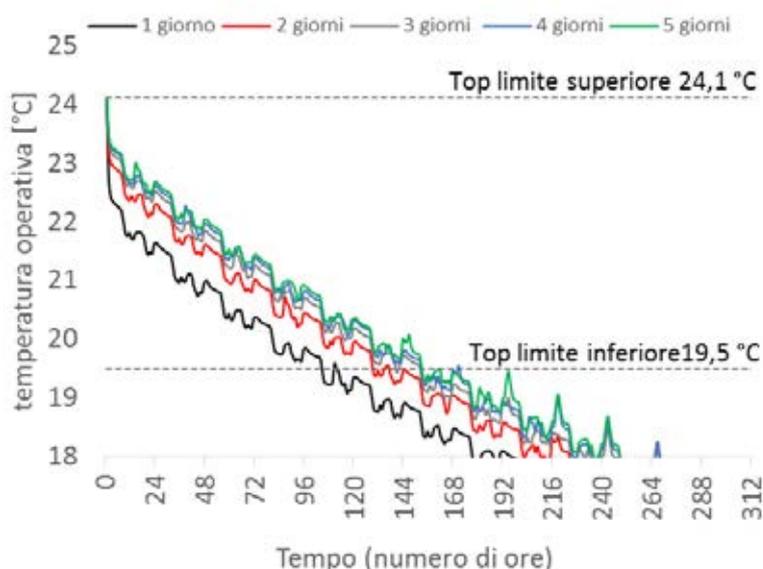


Figura 10: Evoluzione nel tempo della **temperatura operativa** (Top) di una zona termica di riferimento all'interno dell'involucro, dopo lo spegnimento dell'impianto, in funzione dei giorni di carica (da 1 a 5), con condizioni esterne pari alla giornata media ripetuta ciclicamente

QUANTO PROFONDA DEVE ESSERE LA RISTRUTTURAZIONE PER AUMENTARE SIGNIFICATIVAMENTE LA FLESSIBILITÀ DELL'EDIFICIO?

La Figura 11 mostra come la sola sostituzione dei serramenti non sia sufficiente da sola a modificare significativamente la dinamica termica dell'edificio (con un rapporto trasparente/opaco tipico del settore residenziale). Un cappotto termico della qualità considerata qui (conduttività dell'ordine di 0,035 a 0,04 W/(m·K), spessore 25 cm) è indispensabile per ottenere flessibilità dell'edificio (oltre che per risparmiare energia riducendo il **fabbisogno di energia termica**).

Ovviamente la sola sostituzione dell'impianto di generazione, non incidendo sull'involucro, non avrebbe alcuna influenza sulla flessibilità della domanda di energia da parte dell'edificio.

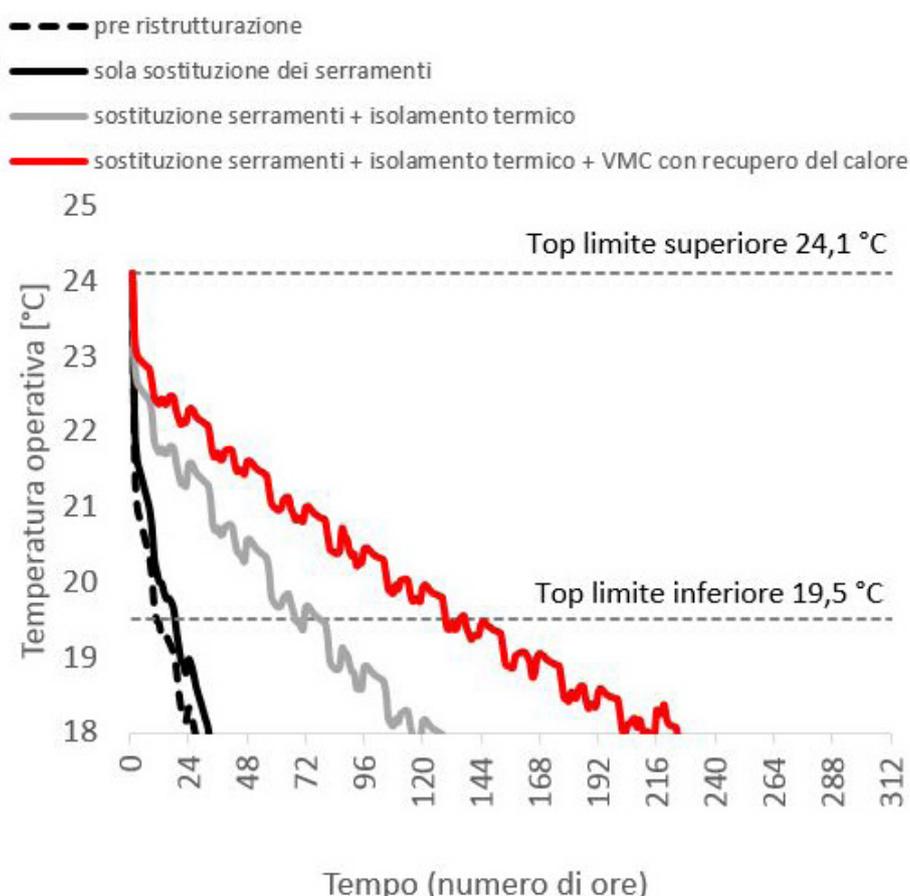


Figura 11:

Evoluzione nel tempo della **temperatura operativa (Top)** di una zona termica di riferimento in funzione delle misure di ristrutturazione applicate, dopo due giorni di carica termica, e con giornata media ripetuta

CHE VARIABILITÀ ALL'INTERNO DELL'EDIFICIO?

È chiaro che all'interno di un edificio plurifamiliare di certe dimensioni ci sono unità immobiliari in grado di sfruttare meglio gli apporti solari in forza di una migliore esposizione, con evidenti effetti positivi rispetto alla durata del periodo in cui è possibile mantenere adeguate condizioni di comfort in seguito allo spegnimento dell'impianto. Differenze tra gli appartamenti possono anche essere prodotte da differenze nell'estensione delle superfici esposte verso l'esterno o verso ambienti non riscaldati.

In Figura 12 è rappresentato (area in grigio) lo scostamento atteso rispetto all'appartamento di riferimento (linea in nero) nella valutazione del tempo in cui le condizioni ambientali interne rimangono nell'intervallo di comfort. Si verifica che dopo l'ammodernamento gli appartamenti si comportano tutti in modo molto simile l'uno all'altro. Il tempo di permanenza in comfort varia in modo molto limitato al variare dell'appartamento considerato.

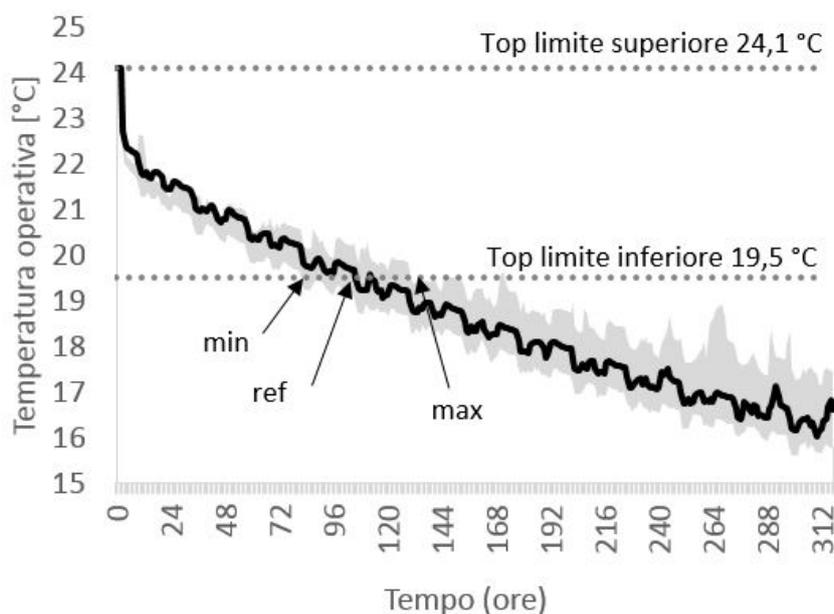


Figura 12:

Evoluzione della **temperatura operativa (Top)** in diversi appartamenti (zona grigia) dopo 1 giorno di carica e successivo spegnimento dell'impianto, in condizioni esterne di ripetizione della giornata media.

CHE EFFETTO AVREBBE UN CLIMA RIGIDO SUL COMFORT NEI GIORNI SUCCESSIVI ALLO SPEGNIMENTO DELL'IMPIANTO?

Occorre verificare l'effettivo potenziale di sfruttamento dell'accumulo di energia nelle masse termiche se a valle del periodo di carica dell'edificio si dovessero affrontare condizioni climatiche poco favorevoli nei giorni successivi.

La Figura 13 illustra i risultati delle simulazioni dinamiche effettuate ipotizzando che il periodo di carica dell'edificio sia seguito da alcuni giorni con temperature rigide e poca disponibilità di radiazione solare (simulati con una ripetizione ciclica della "giornata invernale sfavorevole").

Il periodo di tempo in cui la **temperatura operativa** rimane all'interno dell'intervallo di comfort si riduce rispetto al caso rappresentato in Figura 10, ma rimane molto interessante (circa 70 ore, ossia quasi 3 giorni). Anche in questo caso la ristrutturazione dell'involucro edilizio crea opportunità, precedentemente inesistenti, di modulare la domanda termica dell'edificio in dimensione e collocazione temporale contribuendo a ridurre la domanda di picco sulla rete.

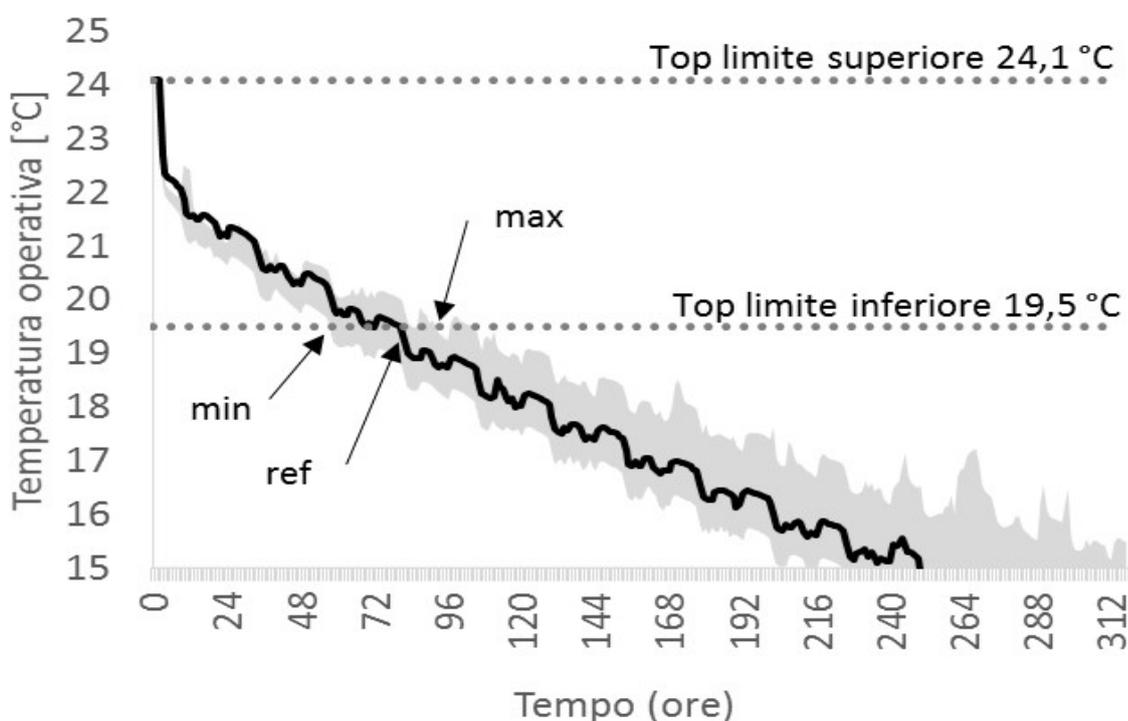


Figura 13:

Dopo un solo giorno di carica il tempo di permanenza in comfort si mantiene a circa 70 ore (circa 3 giorni) in caso di giornate sfavorevoli (basse temperature e bassa irradianza solare) ripetute. Presentate in grigio tutte le zone termiche.

Al fine di valutare le prestazioni degli edifici ammodernati per vari livelli di apporti interni ascrivibili al metabolismo degli occupanti, alle apparecchiature ed alla illuminazione artificiale, lo studio ha considerato il caso più cautelativo dove questi sono completamente assenti poiché, per esempio, l'edificio non è occupato (caso in cui non sarebbe peraltro necessario mantenere comfort termico).

Le figure 13a e 13b illustrano il risultato nei termini di decadimento della temperatura nel tempo ed il mutamento tra le varie unità abitative. Bisogna comunque ribadire che si tratta solo di un'analisi di sensibilità e non di uno scenario realistico.

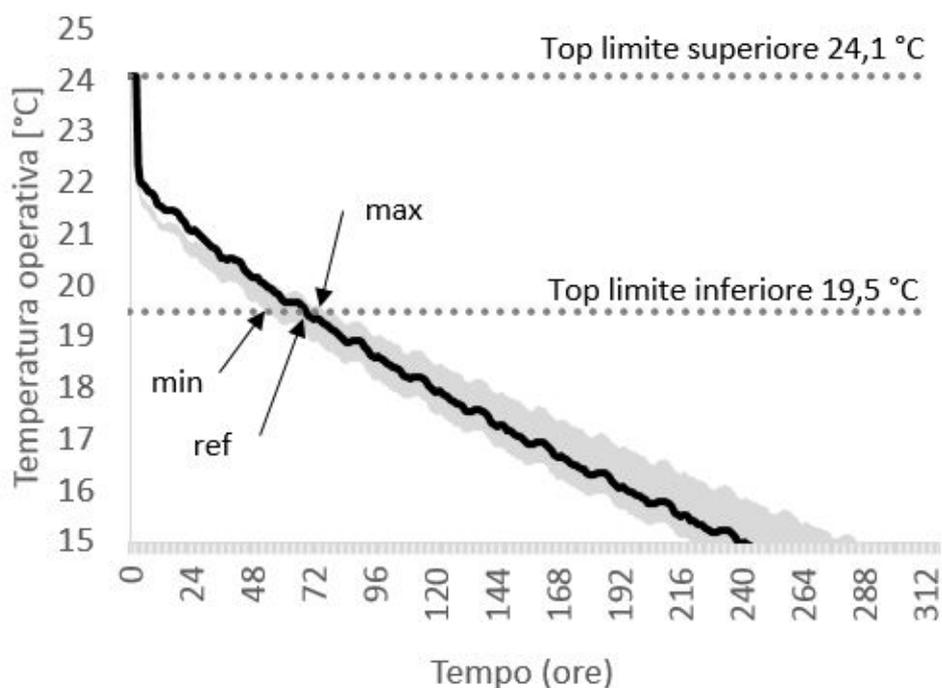


Figura 13a:

Variatione della **temperatura operativa** nel tempo in diverse unità abitative (area grigia) dopo spegnimento dell'impianto, tenuto acceso 24 ore con *set point* a 24,1 °C. Si considera totale assenza di apporti interni e la ripetizione ciclica di una giornata invernale media.

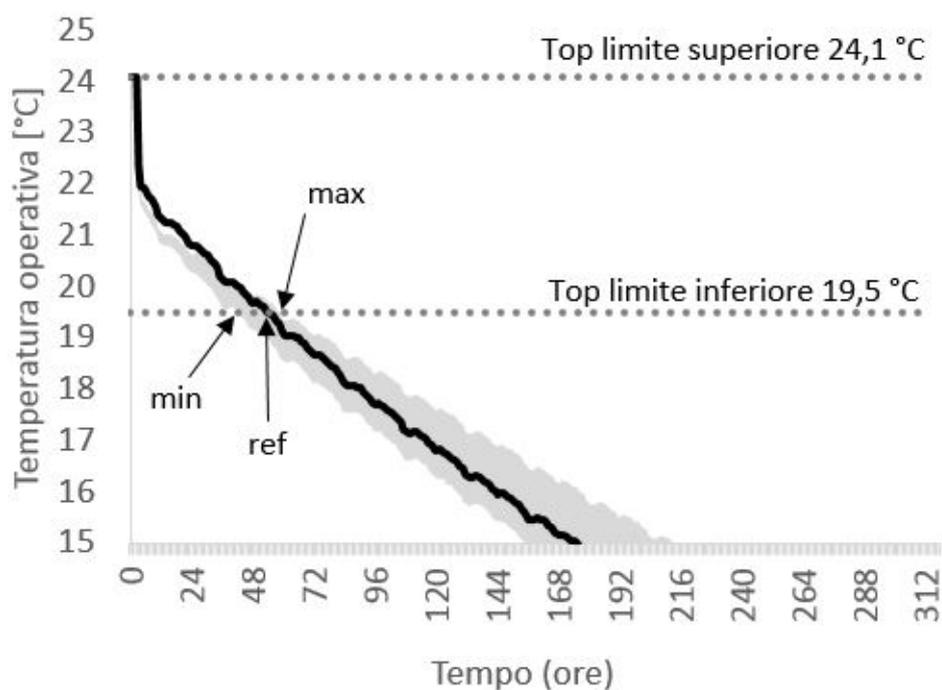


Figura 13b:

Variazione nel tempo della temperatura operativa in diverse unità abitative (area grigia) dopo spegnimento dell'impianto, tenuto acceso 24 ore con *set point* a 24,1 °C. Si considera totale assenza di apporti interni e la ripetizione ciclica di una giornata invernale sfavorevole.

PERCHÈ IL PARCO EDILIZIO ATTUALE NON PUÒ CONTRIBUIRE ALLA SMART CITY?

Anche portando a 24 °C la temperatura dell'edificio, una volta spento l'impianto l'edificio pre-ristrutturazione rimane in condizioni di comfort solo per una decina di ore (Figura 14). L'effetto di potenziale spostamento della domanda è molto limitato e molto costoso in termini di energia dispersa.

Di fatto gli edifici attuali si comportano come batterie (termiche) corto circuitate a terra. L'isolamento termico dell'involucro edilizio, possibilmente con l'integrazione di un impianto di ventilazione meccanica con recupero del calore, risulta come una condizione indispensabile per consentire all'edificio di avere flessibilità rispetto al momento in cui richiedere energia.

La maggior parte degli edifici attuali sono "rigidi" ed in inverno richiedono tutta energia nella stessa fascia oraria mattutina dopo l'attenuazione notturna.

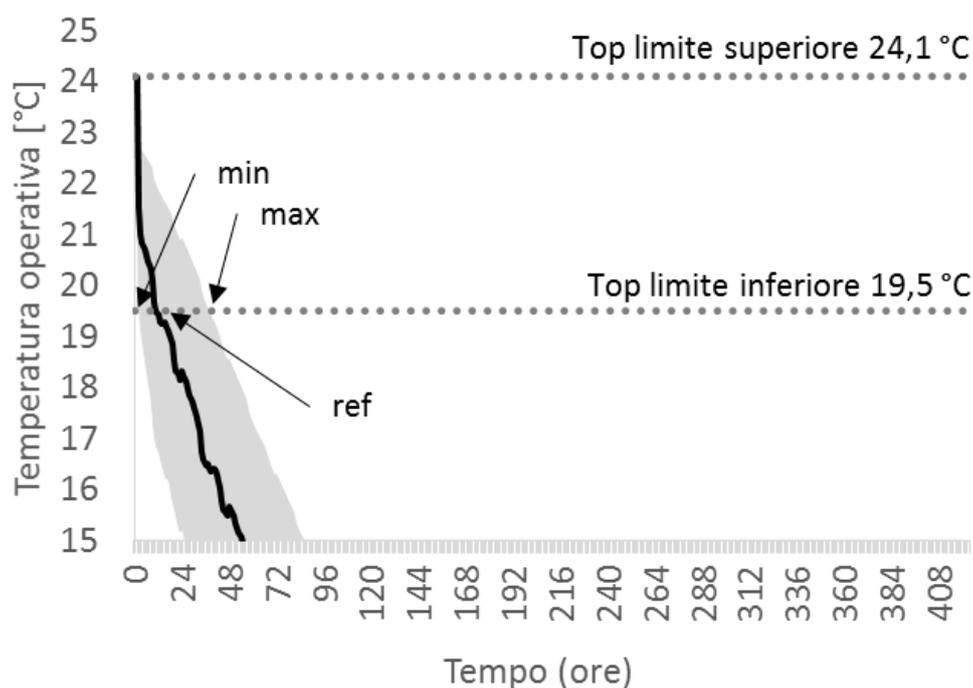


Figura 14: Evoluzione nel tempo della **temperatura operativa** nel caso pre-ristrutturazione, con spegnimento dell'impianto dopo 1 giorno di carica a 24 °C, e condizioni esterne di giornata media ripetuta

QUANTA ENERGIA TERMICA È POSSIBILE ACCUMULARE?

Il calcolo dell'energia accumulata man mano che tutti gli strati componenti la massa dell'edificio si riscaldano (mantenendo la **temperatura operativa** a 24 °C all'interno) mostra che 1-2 gg di carica sono sufficienti per utilizzare in alta percentuale il potenziale di accumulo nelle strutture. È dunque possibile limitare allo stretto necessario il numero di giorni di carica dell'edificio.

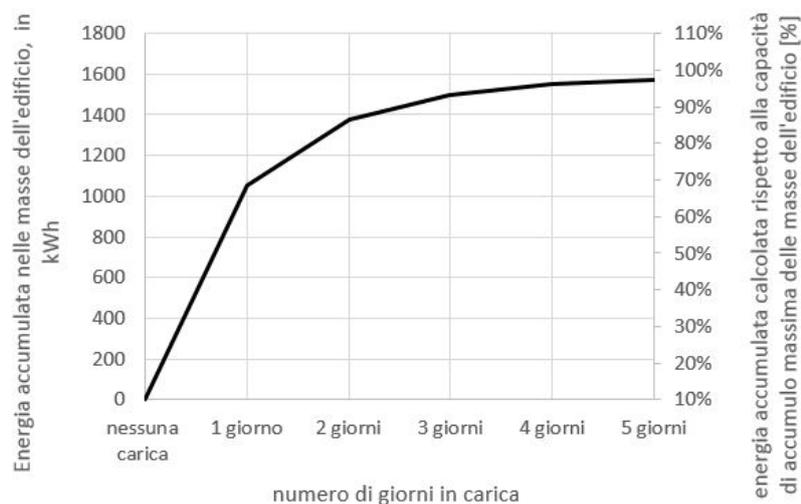


Figura 15. Accumulo di energia (in valore assoluto e percentuale) in uno dei due edifici considerati in funzione del numero di giorni di carica termica.

QUAL È IL RISPARMIO DI POTENZA TERMICA CONSEQUENTE LA RISTRUTTURAZIONE PROFONDA?

A fronte di interventi di riqualificazione energetica del parco edilizio esistente, l'applicazione di strategie finalizzate alla gestione della domanda degli edifici sulla rete, migliorando al tempo stesso le condizioni di comfort all'interno degli ambienti, contribuisce ad un risparmio di costo capitale per gli impianti e componenti per la generazione locale, distribuzione ed emissione, che risulta ridotto di un fattore 4. Se il riscaldamento dell'edificio è alimentato da teleriscaldamento o da energia elettrica via una pompa di calore, si ha analogamente una riduzione di un fattore 4 della potenza richiesta alla rete al momento di picco (quando tutti gli edifici "convenzionali" chiedono potenza), dunque nella necessità di investimenti di generazione, trasmissione e distribuzione dal lato rete.

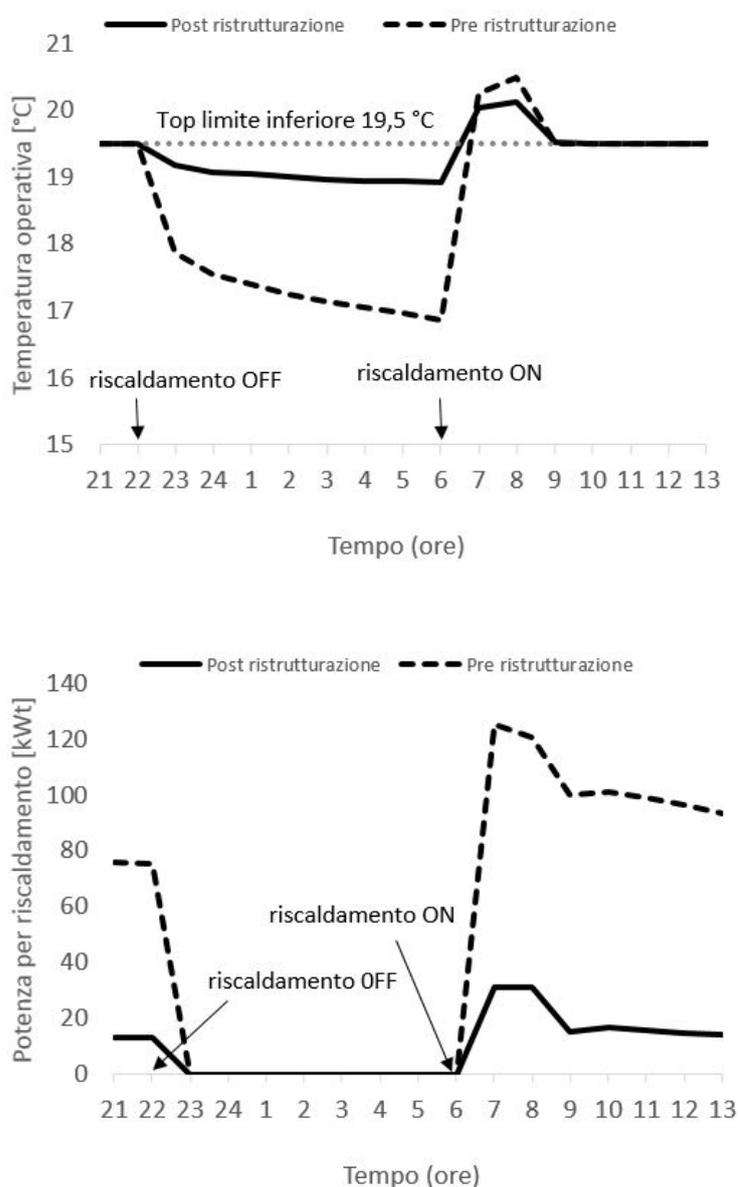


Figura 16

Profilo di temperatura operativa (sopra) e del fabbisogno di energia termica per riscaldamento nell'unità di tempo (sotto) dell'edificio in una giornata invernale media, prima e dopo la riqualificazione energetica. Condizioni imposte nella simulazione energetica: potenza termica disponibile ai terminali di emissione pre-ristrutturazione: 90 W termici /m², post ristrutturazione: 20 W termici /m², passo temporale della simulazione: 15 minuti

Come illustra la Figura 16, la domanda di potenza di picco pre-ristrutturazione dell'intero edificio si riduce da 120 kW termici a 30 kW termici dopo la ristrutturazione (cioè circa 10 kW elettrici con una pompa di calore con COP =3).

Dopo la ristrutturazione profonda l'edificio non solo chiede meno potenza, ma dimostra anche di essere flessibile nella scelta del momento in cui richiederla se è stato caricato termicamente, anche solo leggermente (come descritto nei capitoli precedenti).

Inoltre, nell'edificio post ristrutturazione tutti gli appartamenti giungono in condizioni di comfort dopo l'attenuazione notturna e la riaccensione degli impianti, mentre nella situazione pre ristrutturazione molti appartamenti rimangono sotto il livello minimo di comfort (Figura 17).

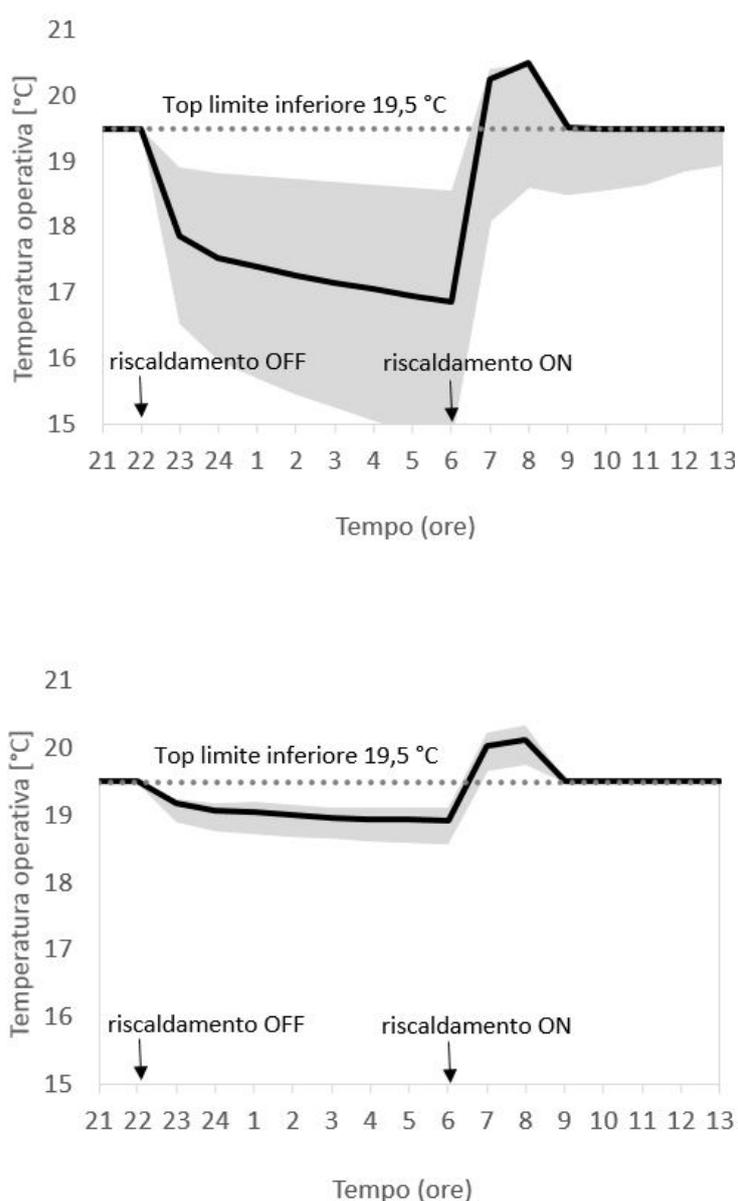


Figura 17. Nella situazione pre ristrutturazione vi è una grande differenza nelle condizioni di comfort nei diversi appartamenti, differenza che si riduce fortemente dopo la ristrutturazione.

CONCLUSIONI

Una delle maggiori barriere alla realizzazione delle smart cities e alla integrazione delle rinnovabili negli edifici è il **fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento** troppo elevato di questi ultimi, a causa di involucri insufficientemente isolati e di perdite per ventilazione.

Una coerente e concreta politica di riduzione dell'uso di energia si conferma, in analisi recenti, come via maestra:

- per effettuare rapidamente una transizione alle rinnovabili che eviti il tracollo climatico del pianeta, (Grubler et al., 2018),
- e per sviluppare fortemente l'industria delle rinnovabili senza il rischio di incontrare forti opposizioni sociali nei territori, con dimensioni eccessive di nuove installazioni per generazione, stoccaggio, trasporto di energia.

Coperture, murature esterne, solette di contatto a terra, vetri e telai, hanno nella maggior parte degli edifici esistenti resistenza termica molto bassa (cioè valori troppo alti sia della trasmittanza termica stazionaria, che determina le perdite di energia invernali, sia della trasmittanza termica periodica, che è una delle componenti determinanti del comportamento estivo dell'edificio). Mancano spesso o sono inefficaci le protezioni solari estive (per es. sono sostanzialmente inefficaci le protezioni solari interne).

Gli edifici attuali sono simili a una batteria termica cortocircuitata a terra: l'energia immessa nell'edificio viene rapidamente scaricata a terra anziché essere utilizzata. Non faremmo mai questo con una batteria elettrica, ed è allo stesso modo irrazionale farlo per il potenziale di accumulo termico presente nelle pareti e solette del parco edilizio nazionale.

Ristrutturazioni di qualità degli involucri edilizi esistenti possono consentire riduzioni del **fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento** fino all'80% (si vedano ad esempio ristrutturazioni di edifici di edilizia popolare e scuole realizzati dal Comune di Milano col supporto tecnico di end-use Efficiency Research Group www.eerg.it).

In una situazione, da cui dobbiamo uscire al più presto, in cui la crescita dell'uso di energia sopravanza nettamente il tasso di decarbonizzazione, costruire nuovi edifici ed effettuare ristrutturazioni che non applichino le migliori strategie di progettazione e i migliori materiali e componenti divergerebbe nettamente dall'obiettivo di de-carbonizzazione. Se si imboccasse tale percorso non-ottimale si bloccherebbe per molti decenni il parco edilizio su un livello di uso di energia per riscaldamento e raffrescamento in eccesso di quanto reso possibile dalla innovazione nel settore delle costruzioni, in una quantità pari a circa 80 % di quanto consumato dal parco edilizio mondiale al 2005.

Neppure un kWh di preziosa energia rinnovabile può dunque essere sprecato, e ancor meno vanno create situazioni che perpetuerebbero per decenni lo spreco o dirottano energia verso usi non essenziali.

Ma oltre a ridurre in modo diretto l'uso di energia e le emissioni climalteranti, le ristrutturazioni profonde hanno un effetto indiretto che può consentire una più rapida ed efficace penetrazione delle fonti rinnovabili nel sistema energetico. L'aumento dell'isolamento termico delle pareti e coperture, dilatando considerevolmente l'intervallo di tempo durante il quale un edificio si mantiene nell'intervallo di comfort¹¹, può consentire di:

- **Coordinare la domanda con l'offerta di energia locale** ovvero "sciogliere" la attuale rigidità della domanda di energia da parte degli edifici e dunque consentire loro di ricevere energia quando disponibile da fonti locali (rinnovabili o recuperi di energia) o scambiarla con altri edifici in modo flessibile. Spesso nella narrativa sulle smart cities, micro-grids,... si trascura il fatto che il rendere "fisicamente smart" o "flessibili" gli involucri degli edifici è il fattore abilitante, la condizione *sine qua non* della possibilità di utilizzo degli altri ingredienti, come sofisticata sensoristica e controlli).
- **Sfruttare i momenti di sovrabbondanza di offerta da rinnovabili sulla rete** rendendo disponibile della capacità di accumulo di energia nella massa termica degli edifici.
- **Gestire condizioni di scarsità dell'offerta di energia** attenuando i picchi di domanda di potenza sulla rete elettrica o di teleriscaldamento (*peak shaving, demand response*, potenziale partecipazione al *capacity market* creando valore aggiunto addizionale a quello legato al risparmio di energia e aumento di comfort).

Lungi dall'essere contraddittori o conflittuali, i vari elementi (riduzione del **fabbisogno di energia per riscaldamento e raffrescamento**, controlli, rinnovabili) sono dunque parte di un quadro in cui risultano strettamente sinergici. Ridurre il fabbisogno di energia non ridurrà la necessità (e il mercato) per rinnovabili e controlli. Al contrario costituisce un prerequisito indispensabile perché rinnovabili e controlli possano essere dispiegati con risultati efficaci e ambientalmente e socialmente accettabili, e dunque per una loro rapida penetrazione, di cui abbiamo urgentemente bisogno se vogliamo avere qualche possibilità di evitare il disastro climatico.

¹¹ Stabilito dagli Standard internazionali sulla base di migliaia di interviste ad occupanti di edifici e contemporanee misure di parametri fisici. Cfr: ASHRAE Global Thermal Comfort Database I e II (Földváry Ličina et al., 2018)

BIBLIOGRAFIA

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). (2017). Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

Attia, S., Eleftheriou, P., Xeni, F., Morlot, R., Menezo, C., Kostopoulos, V., ... Maria Hidalgo-Betanzos, J. (2017). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 155, 439-458. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043>

CEN, & ISO. EN ISO 52000-1 Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment - Part 1: General framework and procedures. , (2017).

CEN, & ISO. Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment. Part 2: Explanation and justification of ISO 52000-1 (ISO/TR 52000-2:2017). , (2017).

European Commission. Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements. , (2012).

Földváry Ličina, V., Cheung, T., Zhang, H., de Dear, R., Parkinson, T., Arens, E., ... Zhou, X. (2018). Development of the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*, 142, 502-512. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.022>

Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., ... Valin, H. (2018). A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6), 515-527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>

Jackson, R. B., Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Korsbakken, J. I., Liu, Z., ... Zheng, B. (2018). Global energy growth is outpacing decarbonization. *Environmental Research Letters*, 13(12), 120401. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf303>

Lucon, O., & Ürge-Vorsatz, D. (2014). Building. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Pagliano, L., Carlucci, S., Causone, F., Moazami, A., & Cattarin, G. (2016). Energy retrofit for a climate resilient child care centre. *Energy and Buildings*, 127, 1117-1132. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.092>

Pagliano, Lorenzo, & Roscetti, A. (2019). Calculating Energy Performance. In *Future-proof buildings for all Europeans. A guide to Implement the EPBD (2018/844)*. Retrieved from http://bpie.eu/wp-content/uploads/2019/04/Implementing-the-EPBD_BPIE_2019.pdf

Pagliano, Lorenzo, & Zangheri, P. (2010). Comfort models and cooling of buildings in the Mediterranean zone. *Advances in Building Energy Research*, 4(1), 167-200. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0406>

UNI. UNI/TS 11300-1 Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. , (2008).

UNI, & CEN. UNI EN 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. , (2008).

Ürge-Vorsatz, D., Rosenzweig, C., Dawson, R. J., Rodriguez, R. S., Bai, X., Barau, A. S., ... Dhakal, S. (2018). Locking in positive climate responses in cities. *Nature Climate Change*, 8(3), 174. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0100-6>



Rapporto realizzato nell'ambito della Convenzione di Ricerca tra Knauf Insulation Italia e Politecnico di Milano (Università Pubblica) - Dipartimento di Energia

KNAUFINSULATION



Rapporto realizzato nell'ambito della Convenzione di Ricerca tra
Knauf Insulation Italia e Politecnico di Milano - Dipartimento di Energia

kNAUFINSULATION