

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

MISURE IN OPERA E ANALISI IN RAFFRESCAMENTO

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

end use Efficiency Research Group (eERG-PoliMI, <https://www.eerg.it/>) del Politecnico di Milano

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



KNAUFINSULATION



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

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
EXECUTIVE SUMMARY.....	5
I CASI STUDIO.....	6
L'AUMENTO DELLA FLESSIBILITÀ DELLA DOMANDA PREVISTO CON LE SIMULAZIONI È VERIFICATO IN EDIFICI REALI?.....	8
QUAL È L'INFLUENZA DEL SISTEMA IMPIANTISTICO DI EMISSIONE PRESENTE NEI LOCALI?.....	16
IN ESTATE SI POSSONO OTTENERE GLI STESSI BENEFICI DI FLESSIBILITÀ DELLA DOMANDA?.....	18
PER QUANTO TEMPO L'EDIFICIO OGGETTO DI RISTRUTTURAZIONE PROFONDA RIMANE IN COMFORT A IMPIANTO SPENTO?.....	21
QUANTO PROFONDA DEVE ESSERE LA RISTRUTTURAZIONE PER AUMENTARE SIGNIFICATIVAMENTE LA FLESSIBILITÀ DELL'EDIFICIO?.....	22
CHE VARIABILITÀ SI HA ALL'INTERNO DELL'EDIFICIO?.....	24
CHE EFFETTO AVREBBE UN CLIMA PARTICOLARMENTE CALDO SUL COMFORT NEI GIORNI SUCCESSIVI ALLO SPEGNIMENTO DELL'IMPIANTO?.....	26
CONCLUSIONI.....	28
BIBLIOGRAFIA.....	29

Il presente rapporto si configura come prosecuzione dello studio che Knauf Insulation e Politecnico di Milano, gruppo eERG (end-use Efficiency Research Group), hanno intrapreso nel 2019 in merito alla flessibilità energetica degli involucri di alta qualità termica, nuovi o sottoposti a interventi di ristrutturazione edilizia ed energetica.

Lo studio precedente ha dimostrato come un edificio altamente isolato, sia nuovo che ristrutturato, attraverso lo sfruttamento delle potenzialità di accumulo delle strutture edilizie, possa, durante l'inverno, rimanere in condizioni di comfort per alcuni giorni anche in assenza di fonti di energia e gestire nel tempo, in modo intelligente, la domanda di energia richiesta alla rete elettrica o a una rete di teleriscaldamento per la climatizzazione degli ambienti interni.

Questa accresciuta flessibilità permetterebbe di ridistribuire nel tempo la domanda di energia per il soddisfacimento degli usi energetici finali considerati, riducendo i picchi richiesti alla rete di distribuzione, anche attraverso l'ottimizzazione dello sfruttamento delle rinnovabili.

Come emerso dalle conclusioni del precedente studio tali scenari risulterebbero attuabili solamente nel caso in cui il patrimonio edilizio esistente venga sottoposto a ristrutturazioni profonde, in cui venga drasticamente ridotto il fabbisogno di energia termica per riscaldamento o raffrescamento¹ (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). Per ottenere ciò, è indispensabile che gli involucri edilizi siano termicamente ben isolati, dotati di serramenti efficienti (basse trasmittanze termiche, controllo dei parametri energetici che caratterizzano la trasmissione di radiazione termica solare e radiazione visibile), dotati di sistemi di schermatura solare progettati per ridurre gli apporti solari indesiderati durante la stagione estiva, ed un impianto di ventilazione meccanica in grado di minimizzare le dispersioni energetiche per ventilazione durante la stagione invernale, garantendo al contempo una buona qualità dell'aria dei locali interni.

Un edificio ben progettato, che rispetti le caratteristiche sopra enunciate, oltre a ridurre in modo diretto l'uso di energia e le emissioni di agenti inquinanti climalteranti, sia nuovo che ristrutturato, può favorire una più rapida ed efficace penetrazione delle fonti rinnovabili nel sistema energetico.

Come emerso dai risultati delle simulazioni numeriche effettuate nel precedente studio, l'aumento dell'isolamento termico delle pareti e coperture, dilata considerevolmente l'intervallo di tempo durante il quale un edificio, durante la stagione di riscaldamento, si mantiene nell'intervallo di comfort³, consentendo di:

■ **Coordinare la domanda con l'offerta di energia locale** ovvero "sciogliere" l'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.

■ **Sfruttare i momenti di sovrabbondanza di offerta da rinnovabili sulla rete** rendendo disponibile della capacità di accumulo di energia nei momenti in cui la disponibilità da fonti rinnovabili è sovra-abbondante.

■ **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). Il presente studio conferma e rafforza, con nuove analisi e dati misurati, le conclusioni del precedente.

La realizzazione delle *smart cities*, in cui gli edifici caratterizzati da flessibilità energetica possono avere un ruolo chiave, è ostacolata dal fatto che il patrimonio edilizio esistente è caratterizzato da un fabbisogno di energia termica troppo elevato, a causa di involucri edilizi inadeguati. Coperture, murature esterne, solette di contatto a terra, vetri e telai, hanno nella maggior parte degli edifici esistenti resistenze termiche molto basse (cioè valori troppo alti sia delle trasmittanze stazionarie, che determinano le perdite di energia invernali, sia delle trasmittanze periodiche, che sono una delle componenti determinanti del comportamento estivo dell'edificio). Mancano spesso, o sono inefficaci, le protezioni solari esterne necessarie al comfort termico estivo (e gli schermi interni possono solo evitare abbagliamento assorbendo e diffondendo la radiazione, ormai entrata nell'involucro). Gli edifici attuali sono simili a un circuito elettrico cortocircuitato a terra: l'energia immessa viene rapidamente scaricata a terra anziché essere utilizzata. Ristrutturazioni di qualità degli involucri edilizi esistenti possono consentire riduzioni del fabbisogno di energia termica fino all'80-90%.

Una coerente e concreta politica di riduzione del fabbisogno di energia termica consentirebbe di effettuare una più rapida ed efficace transizione alle rinnovabili, investendo e generando impiego di qualità in un settore, quello delle costruzioni, che può contribuire ad evitare il tracollo climatico e ambientale del pianeta o al contrario co-partecipare a determinare tale tracollo, se non accompagnato nella corretta direzione dall'iniziativa di indirizzo, supporto e controllo pubblico.

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

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. 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)

Gli obiettivi previsti in questa ricerca, che si configura come prosecuzione della precedente svolta nel 2019, sono sintetizzabili in tre domande a cui vogliamo rispondere:

- L'aumento della flessibilità della domanda, previsto con le simulazioni è verificato in edifici reali?
- Qual è l'influenza del sistema impiantistico di emissione presente nei locali?
- In estate si possono ottenere gli stessi aumenti di flessibilità della domanda?

L'AUMENTO DELLA FLESSIBILITÀ DELLA DOMANDA, PREVISTO CON LE SIMULAZIONI, È VERIFICATO IN EDIFICI REALI?

Abbiamo applicato le strategie di carica delle masse dell'edificio, durante la stagione invernale, su edifici reali. Questo ha permesso di validare i risultati ottenuti mediante le simulazioni numeriche.

Sono stati effettuati diversi test su due edifici caratterizzati da due differenti livelli di efficienza dell'involucro edilizio (trasmissione termica delle superfici opache, prestazione dei serramenti, tipologia di ventilazione e perdite correlate). Il confronto ha permesso di confermare che la riduzione del *fabbisogno di energia per riscaldamento* è elemento indispensabile per poter sfruttare momenti in cui l'edificio, a masse cariche, può mantenersi in condizioni di comfort, per diverse ore/giorni, ad impianto spento.

QUAL È L'INFLUENZA DEL SISTEMA IMPIANTISTICO DI EMISSIONE PRESENTE NEI LOCALI?

Il sistema di emissione installato nei due edifici test è caratterizzato dalla presenza di radiatori ad acqua. Non potendo in questa fase avere libero accesso a edifici che abbiano installate altre tipologie di sistemi impiantistici (impianti a tutt'aria o sistemi radianti), a completamento delle simulazioni numeriche sono state condotte ulteriori simulazioni con lo scopo di valutare come la massa del sistema impiantistico presente all'interno dei singoli locali possa influenzare la curva di decadimento della temperatura operativa, dopo che l'edificio è stato termicamente caricato. Anche in questo caso è emerso come sistemi che prevedano l'attivazione di massa, tipo sistemi radianti, possano offrire maggiori disponibilità di energia termica accumulata che viene progressivamente rilasciata nel tempo all'interno dei singoli locali e che permette di ritardare la riattivazione del sistema stesso a causa del raggiungimento del limite inferiore di comfort (temperatura operativa pari a 19,5°C).

IN ESTATE SI POSSONO OTTENERE GLI STESSI BENEFICI DI FLESSIBILITÀ DELLA DOMANDA?

Un terzo obiettivo è stata la valutazione, attraverso simulazione numerica, di strategie di flessibilità energetica degli edifici durante la stagione di raffrescamento. I risultati ottenuti confermano che un involucro edilizio efficiente e l'utilizzo razionale delle schermature solari esterne possono garantire un consistente periodo in condizioni di comfort, ad impianto spento, anche durante la stagione di raffrescamento.

Il progetto di ricerca sviluppato dalla collaborazione tra Knauf Insulation e l'end-use Efficiency Research Group del Politecnico di Milano (eERG-PoliMI), ha interessato la tipologia di edificio per il quale è stato creato un modello di simulazione numerica per le valutazioni di flessibilità energetica durante la stagione invernale, i cui risultati sono rappresentati nel rapporto del 2019. I lavori di ristrutturazione edilizia iniziati durante lo sviluppo della ricerca iniziale oggi sono in via di conclusione. Per questo motivo e per coerenza con tutto lo studio, le simulazioni aggiuntive riferite alla valutazione della flessibilità durante la stagione estiva e l'effetto che diversi terminali di emissione hanno nell'applicazione delle strategie di accumulo nelle masse dell'edificio, sono state condotte sul medesimo modello energetico.

Essendo i lavori che riguardano la riduzione del fabbisogno di energia termica attraverso l'efficientamento energetico dell'involucro edilizio in via di conclusione, è stato possibile realizzare delle campagne di monitoraggio in campo rispetto alle ultime due stagioni di riscaldamento. In queste campagne, su alcune unità immobiliari di riferimento, sono stati fatti dei test di accumulo delle masse dell'edificio e misurate le curve di decadimento della temperatura dell'aria. In questo modo è stato possibile validare le evidenze emerse dalla simulazione numerica.

Gli interventi progettati dai tecnici del Comune di Milano col supporto di eERG-PoliMI e oggi realizzati dal Comune su suddetto edificio, sono l'applicazione di un cappotto termico isolante (25 cm con conduttività dell'ordine di 0,035 - 0,040 W/(m×K)), accurati interventi di riduzione dei ponti termici, sostituzione di infissi e vetri ed installazione di un sistema di ventilazione meccanica con recupero di calore presso un condominio di edilizia popolare⁴ nella città di Milano.

Abbiamo replicato alcuni dei test di accumulo delle masse in campo su un secondo edificio contraddistinto da un minor livello di efficienza dell'involucro edilizio ma che sia in grado di rappresentare una costruzione standard non più vecchia di 10 anni. Per coerenza e per una diretta confrontabilità delle fasi di test, il secondo edificio è stato selezionato nella stessa regione climatica di Milano. Lo scopo del secondo edificio test è quello di misurare in campo se, edifici contraddistinti da livelli di efficienza inferiori, sono in grado di garantire lo stesso livello di flessibilità energetica di ristrutturazioni prossime agli standard PassiveHaus, Casaclima o Minergie.

Di seguito le schede descrittive dei due edifici sottoposti a test di flessibilità energetica in campo.

EDIFICIO PLURIFAMILIARE RESIDENZIALE POPOLARE A MILANO



Figura 1

Edifici di Edilizia Residenziale Popolare prima e dopo la ristrutturazione profonda

4. 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.

Tabella 1: caratteristiche dimensionali dei fabbricati

	Superficie lorda [m ²]	Superficie utile [m ²]	Volume lordo [m ³]	Superficie lorda dispersente [m ²]	Rapporto S/V [m ⁻¹]	Rapporto superficie finestre / superficie dispersente	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	8
Scale e Ascensori	543	-

Tabella 2: caratteristiche fisiche degli involucri edilizi analizzati, prima e dopo l'intervento di efficientamento profondo.

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	[Vol/h]	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

EDIFICIO MONOFAMILIARE RESIDENZIALE A CREMA (CR)



Tabella 3: caratteristiche dimensionali del fabbricato.

	Superficie lorda [m ²]	Superficie utile [m ²]	Volume lordo [m ³]	Superficie lorda disperdente [m ²]	Rapporto S/V [m ⁻¹]	Rapporto superficie finestre / superficie disperdente	Numero di piani
Residenza monofamiliare	100	79	330	227	0,69	0,05	1

Tabella 4: caratteristiche fisiche dell'involucro edilizio.

Caratteristiche fisiche dell'involucro edilizio		
Trasmittanza termica strutture opache verticali	U [W/(m ² K)]	0,32
Trasmittanza termica solaio verso sottotetto non abitabile	U [W/(m ² K)]	0,35
Trasmittanza termica dei vetri	U [W/(m ² K)]	1,1
Trasmittanza termica del serramento	U [W/(m ² K)]	1,4
Trasmittanza solare totale dei vetri	-	0,60
Ricambi d'aria all'ora	[Vol/h]	0,5 costante
Ventilazione meccanica con recupero del calore	Efficienza di recupero %	Assente 0%
Ponti termici		Moderati

L'AUMENTO DELLA FLESSIBILITÀ DELLA DOMANDA PREVISTO CON LE SIMULAZIONI È VERIFICATO IN EDIFICI REALI?

Il caso studio preso come riferimento nelle simulazioni numeriche è un edificio reale dove gli interventi di efficientamento energetico sono stati concretamente realizzati. Questo ha permesso di effettuare un confronto diretto tra i risultati della simulazione energetica e la realtà fisica. Sono state realizzate diverse campagne di monitoraggio strumentale in alcuni alloggi messi a disposizione dell'Amministrazione Comunale, in cui è stato rilevato il decadimento della temperatura dell'aria dopo aver caricato le masse dei singoli appartamenti attraverso l'immissione di energia termica nei locali. Tale immissione di energia termica si traduce in un aumento della temperatura dell'aria interna e delle masse.

Nelle campagne di misura si è monitorato l'andamento della temperatura dell'aria, con l'assunzione che questa sia assai prossima alla temperatura operativa (parametro che tiene conto della temperatura dell'aria e delle temperature delle superfici), data l'elevata resistenza termica delle parti opache e vetrate, che fa sì che la maggior parte della caduta di temperatura tra interno ed esterno si concentri negli strati ad alta resistenza termica e dunque la differenza di temperatura tra aria e superfici interne sia molto piccola. A supporto di questa ipotesi, in un locale all'interno di uno degli appartamenti di riferimento dell'edificio plurifamiliare di Milano sono state eseguite simultaneamente, per un periodo di tempo limitato, misure della temperatura dell'aria e della temperatura operativa. Quest'ultimo parametro è stato calcolato come media aritmetica tra la temperatura dell'aria misurata e la temperatura media radiante misurata nello stesso punto, con due metodi indipendenti: a partire dalle misure di un globotermometro¹ (Figura 2) e a partire dalle misure di temperatura delle superfici del locale² (pareti, soffitto e pavimento) (Figura 3). Durante tali misure, la ventilazione meccanica in dotazione agli appartamenti è stata mantenuta spenta. In Figura 4 sono mostrati i risultati di questo test, dove si osserva una buona concordanza tra la temperatura dell'aria misurata e la temperatura operativa calcolata (rappresentata con una fascia grigia a indicare il piccolo intervallo esistente tra i risultati ottenuti con i due metodi). In un edificio con un involucro edilizio molto ben isolato come quello in esame, la temperatura dell'aria sembra quindi essere sufficientemente rappresentativa anche della temperatura operativa.

1. Calcolo eseguito in conformità alla ISO 7726:1998 (Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities).

2. Calcolando i fattori di vista tra le superfici e una ipotetica persona posta nel punto considerato.



Figura 2

Stazione di monitoraggio con installata una sonda per la misura della temperatura dell'aria ed un globotermometro.



Figura 3

Localizzazione di alcune sonde di temperatura superficiale utilizzate.

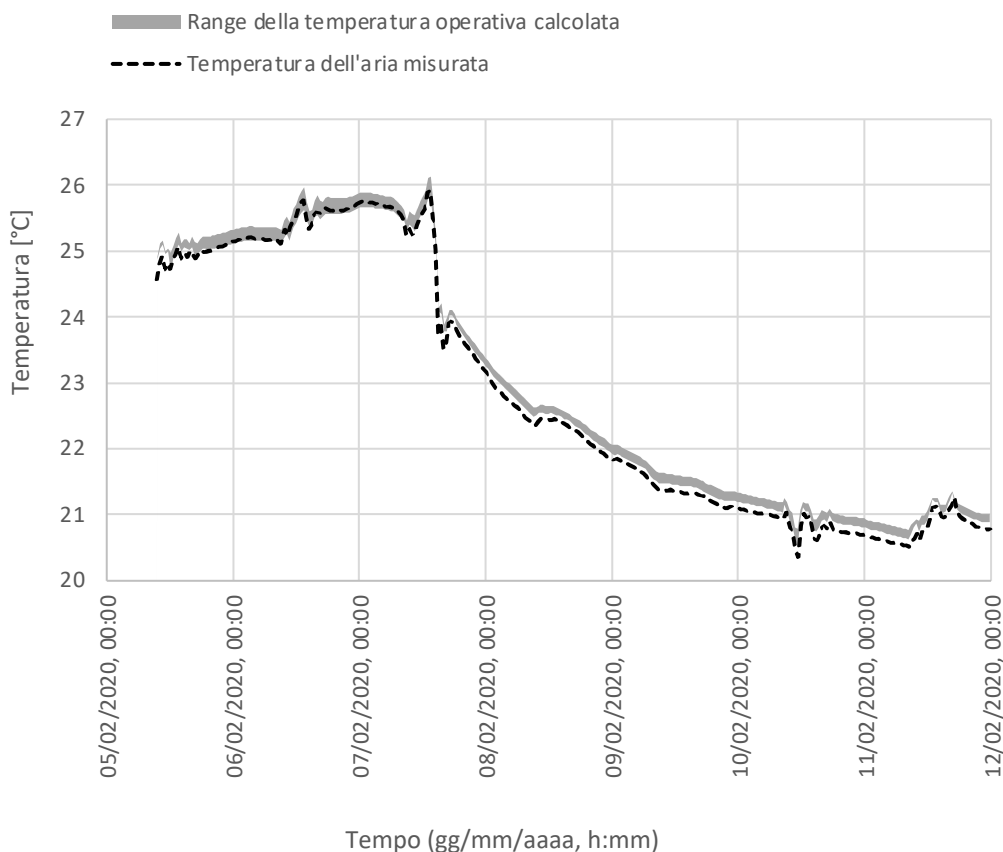


Figura 4

Andamento della temperatura dell'aria misurata e della temperatura operativa misurata nello stesso punto, all'interno di un locale campione. La banda grigia per la temperatura operativa rappresenta l'intervallo tra i risultati ottenuti con due metodi di misura indipendenti (uno basato sulle misure di un globotermometro e l'altro sulle misure delle temperature superficiali).


Il Comune ha messo a disposizione alcuni alloggi vuoti e privi di arredo per svolgere i test. Questo ha permesso da una parte di evitare le possibili perturbazioni alla misurazione da parte degli occupanti, dall'altra di non poter sfruttare completamente le masse termiche a disposizione di tutto il fabbricato, inclusi tutti gli elementi dotati di capacità termica all'interno degli alloggi (come gli arredi). Quest'ultima limitazione è da interpretare come cautelativa rispetto ai risultati ottenuti.

I risultati delle misurazioni confermano i risultati delle simulazioni, entro i margini di incertezza dovuti alle incertezze di modello, di misura, e di non perfetta corrispondenza tra gli appartamenti a disposizione per le misure e quelli simulati nel precedente studio.

Il tempo in cui un edificio con un involucro ben isolato e mantenuto al margine superiore della zona di comfort per un giorno può restare entro la zona di comfort (tra 24,1 °C e 19,5 °C) può andare dai 2 - 3 giorni, fino a 4 giorni. I quattro giorni di permanenza in comfort in dinamica libera (senza impianto) sono stati raggiunti sia in test con "carica" di un giorno (Figura 5), sia con "carica" prolungata su più giorni (Figura 6).

I risultati dei test di flessibilità energetica mostrati di seguito, sono stati eseguiti con diversi tempi di carica (questo significa che a temperatura target raggiunta, questa è stata mantenuta per intervalli temporali diversi) e con condizioni climatiche esterne differenti, ma comunque rappresentative del clima medio invernale dell'ultimo decennio.

Naturalmente i risultati sono influenzati dalle condizioni esterne e dalla carica delle masse degli alloggi coinvolti nelle diverse campagne di monitoraggio, ma comunque si osserva in tutti i casi un risultato in termini di flessibilità energetica coerente con le simulazioni.



A causa di una maggiore difficoltà nel controllo delle temperature dell'aria interna nella fase di carica, legata a limitazioni tecniche e tecnologiche nell'interfacciarsi con i sistemi di riscaldamento utilizzati nei test, in alcuni casi la temperatura target di 24,1°C è stata superata. Riteniamo però che tale superamento non infici la stima dell'ordine di grandezza dell'autonomia di comfort che si misura in giorni e non in ore come negli edifici con involucri di qualità inferiore (si veda oltre).

Durante la fase di test, il riscaldamento dei locali è stato eseguito attraverso l'utilizzo di termoconvettori con potenza elettrica assorbita nota (800W - 1600 W a seconda della dimensione del locale). L'accensione e lo spegnimento di tali apparecchi (uno per locale, bagni, rispostigli e disimpegno esclusi) è avvenuto da remoto, e gli alloggi non erano occupati. L'attivazione o meno del sistema di riscaldamento è stata regolata da un sensore di temperatura dell'aria, posto in maniera baricentrica all'interno dell'appartamento e al di fuori del flusso d'aria convettivo generato dai riscaldatori elettrici ad aria.

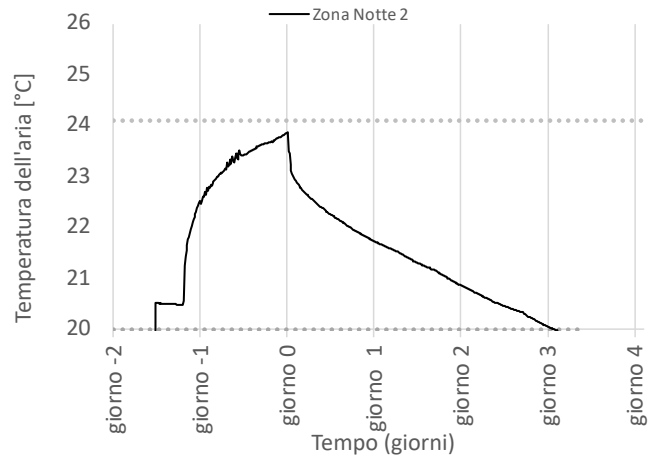
A differenza delle simulazioni numeriche è stata assunta una temperatura limite inferiore di comfort pari a 20 °C, anziché 19,5°C, per la riaccensione degli impianti o per l'interruzione del test. Questo perché nei test iniziali è stato osservato che al di sotto dei 20°C la curva di decadimento della temperatura dell'aria tendeva a un asintoto orizzontale. Ciò avveniva per effetto dei locali confinanti, che non essendo coinvolti nei test di carica delle masse, ed essendo occupati, restavano climatizzati a 20°C circa. In queste condizioni, la dispersione termica dall'appartamento in esame verso gli appartamenti confinanti risultava quindi nulla (se non addirittura negativa, in quanto i locali confinanti potevano talvolta trovarsi a temperature superiori ai 20°C, seppur di poco).

Non è stato quindi ritenuto significativo attendere la discesa della temperatura dell'aria a 19,5°C, anche solo per questioni di durata temporale di ogni singolo test. Interrompere il test al raggiungimento della soglia inferiore di 20°C ha permesso di effettuare più misurazioni.

Il fatto che, durante la fase di carica, solo le unità immobiliari selezionate per i test venivano caricate termicamente pone ulteriori spunti di riflessione sull'analisi della curva di decadimento della temperatura dell'aria misurata. Nella fase di carica delle masse, infatti, la restante parte dell'edificio rimaneva nelle normali condizioni di riscaldamento (circa 20°C). Questo significa che, durante le fasi iniziali di decadimento della temperatura, dopo lo spegnimento dei sistemi impiantistici di emissione, si è attivato un termine di dispersione termica verso gli appartamenti confinanti (a temperatura più bassa), che non avremmo avuto nell'ipotesi in cui tutto l'edificio fosse stato caricato a 24,1 °C. Sembra quindi lecito attendersi che, nel caso in cui si effettuasse una carica dell'intero edificio, il tratto iniziale delle curve di decadimento possa avere una pendenza inferiore rispetto a quella misurata in campo, comportando così un decadimento ancora più lento di quello osservato.

Nei grafici che seguono è indicata con una linea tratteggiata di colore grigio l'intervallo di comfort considerato nello studio (per le misurazioni in campo da 20°C a 24,1°C).

Decadimento della curva dell'aria
Riqualificazione energetica - MILANO



Temperatura dell'aria esterna
MILANO

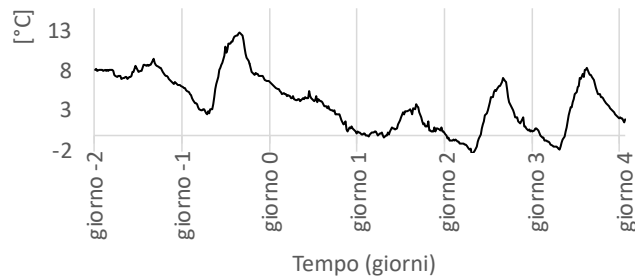
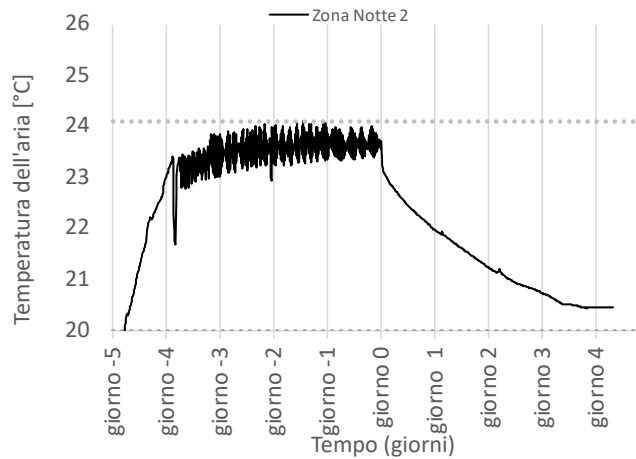


Figura 5

Applicazione del test di flessibilità energetica nell'unità immobiliare n. 13 all'interno di un edificio plurifamiliare. Gli ambienti sono stati riscaldati fino a 23-24 °C e mantenuti in temperatura per 24 ore. MILANO

Decadimento della curva dell'aria
Riqualificazione energetica - MILANO



Temperatura dell'aria esterna
MILANO

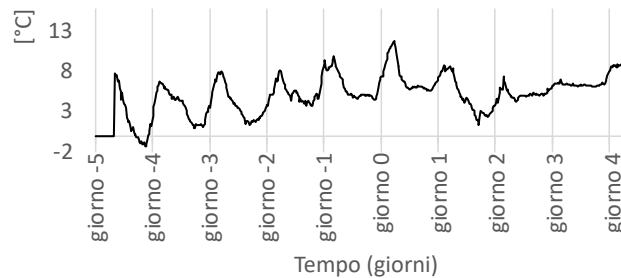


Figura 6

Applicazione del test di flessibilità energetica nell'unità immobiliare n. 13 all'interno di un edificio plurifamiliare. Gli ambienti sono stati riscaldati fino a 23-24 °C e mantenuti in temperatura per 4 giorni. MILANO

Decadimento della curva dell'aria Riqualificazione energetica - MILANO

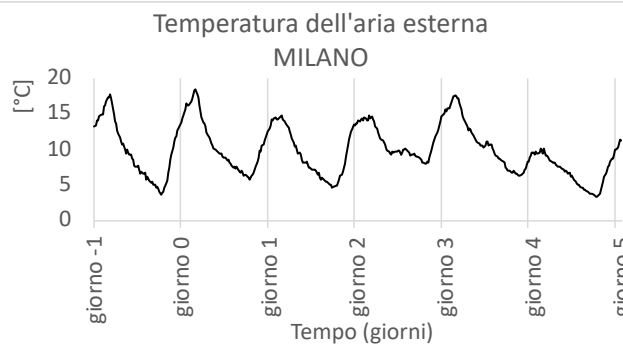
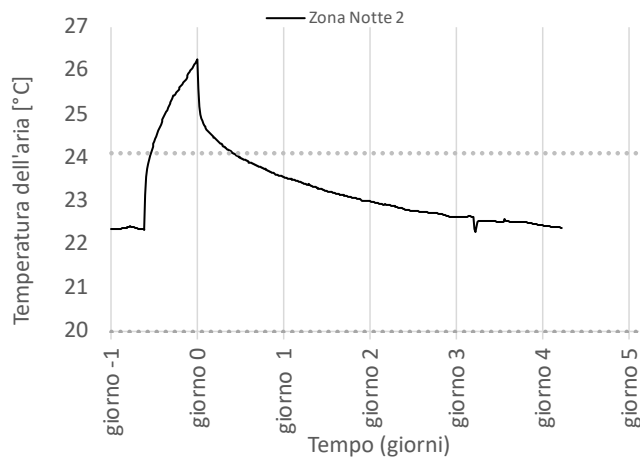


Figura 7

Applicazione del test di flessibilità energetica nell'unità immobiliare n. 13 all'interno di un edificio plurifamiliare. Gli ambienti sono stati riscaldati fino a 26 °C con spegnimento dell'impianto a temperatura raggiunta, senza realizzare un periodo di mantenimento. MILANO

Decadimento della temperatura dell'aria Riqualificazione energetica - MILANO

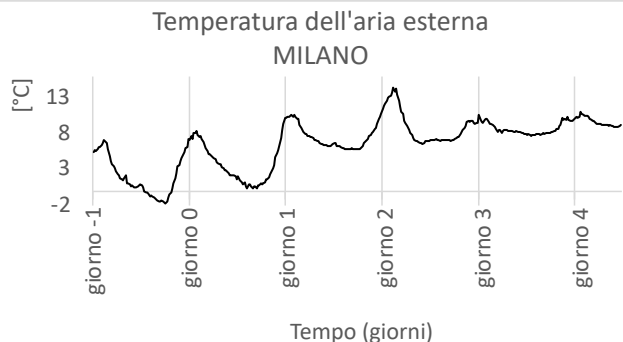
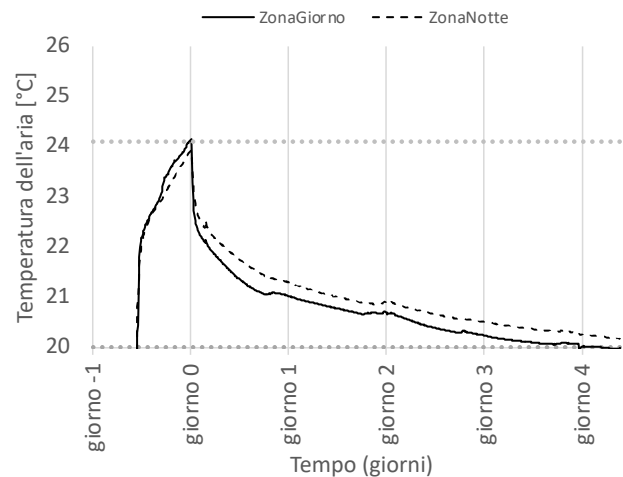


Figura 8

Applicazione del test di flessibilità energetica nell'unità immobiliare n. 8 all'interno di un edificio plurifamiliare. Gli ambienti sono stati riscaldati fino a 24 °C con spegnimento dell'impianto a temperatura raggiunta, senza prevedere un periodo di mantenimento. MILANO

Parallelamente alla precedente campagna di misurazione è stata condotta un'altra campagna di monitoraggio su un edificio residenziale di taglia e tipologia differente.

Abbiamo volutamente evitato di replicare i test di flessibilità su edifici particolarmente energivori, dove dai risultati delle simulazioni numeriche è risultato evidente che l'applicazione di una strategia di flessibilità energetica risulta inappropriata.

Per questi motivi abbiamo ricercato e selezionato un edificio mono familiare (della tipologia appartamento in villa), costruito nel 2010 con caratteristiche di prestazioni dell'involucro edilizio conformi alla legislazione vigente al momento della costruzione (Classe energetica C) e situato a Crema. Si rimanda alle Tabella 3 e Tabella 4 per una più precisa descrizione del caso studio.

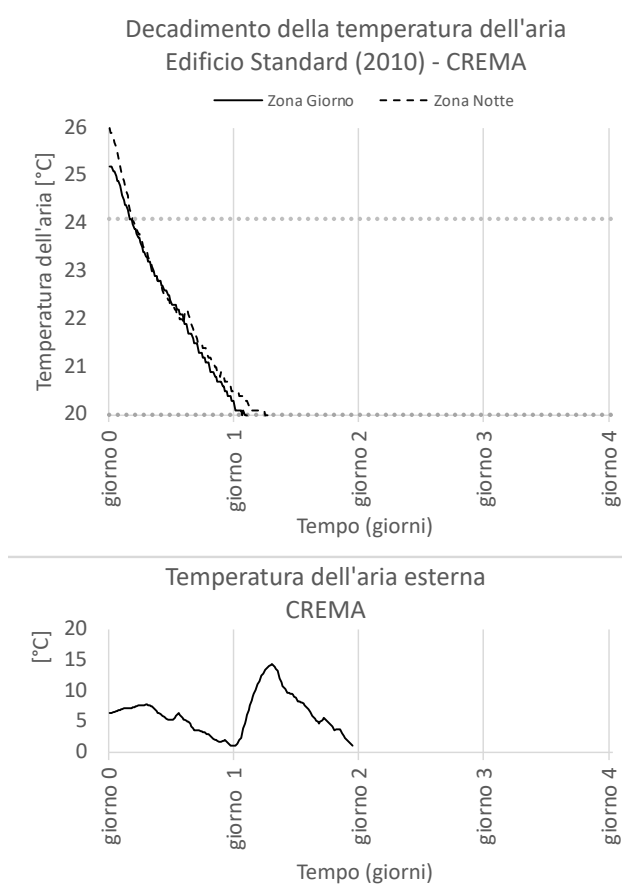


Figura 9

Applicazione del test di flessibilità energetica su edificio reale monofamiliare.

TEST 1

Gli ambienti sono stati riscaldati fino a 25-26 °C e mantenuti in temperatura per 24 ore.

I risultati dei test di flessibilità energetica eseguiti sul fabbricato (Figura 9 e Figura 10) confermano che non è sufficiente un involucro edilizio discretamente isolato (come da legge del 2010) per ottenere risultati analoghi a quelli ottenuti nelle campagne di monitoraggio sull'edificio plurifamiliare di Milano discusso sopra. In particolare, si nota come sia necessario raggiungere temperature dell'aria interna pari a 25 °C - 26 °C per ottenere un ritardo nell'accensione dell'impianto termico (al momento del passaggio della temperatura dell'aria al di sotto dei 20 °C) di almeno 24 ore, nonostante le condizioni ambientali esterne non particolarmente rigide.

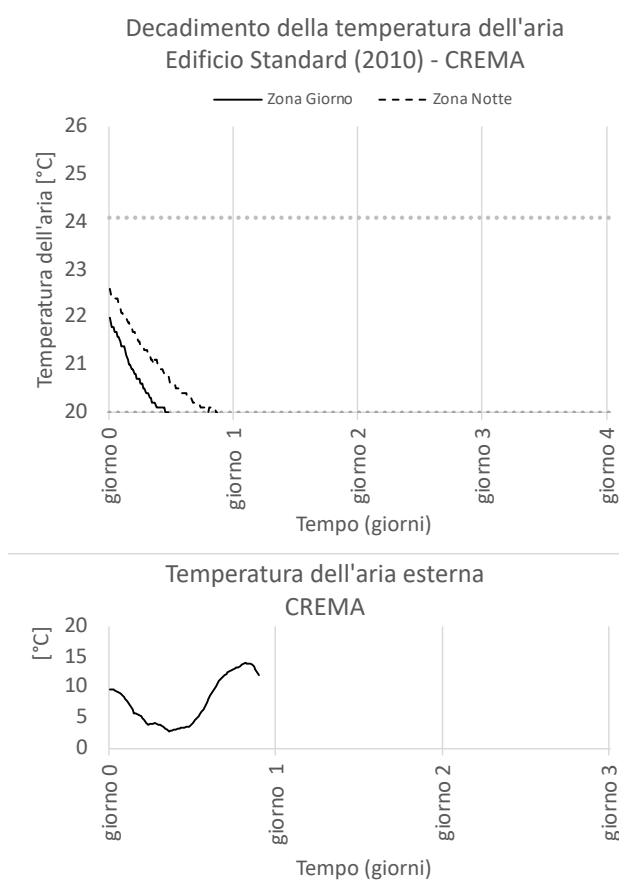


Figura 10

Applicazione del test di flessibilità energetica su edificio reale monofamiliare.

TEST 2

gli ambienti sono stati riscaldati fino a 22-23 °C e mantenuti in temperatura per 24 ore.

QUAL È L'INFLUENZA DEL SISTEMA IMPIANTISTICO DI EMISSIONE PRESENTE NEI LOCALI?

All'interno degli edifici esistenti possono essere presenti diverse tipologie di terminali di sistemi impiantistici. La tipologia, oltre che dipendere dall'epoca in cui l'edificio è stato costruito o quando l'impianto è stato realizzato o ristrutturato, è funzione anche della taglia di potenza che tali sistemi devono garantire per mantenere riscaldati gli ambienti.

Gli edifici che normalmente hanno un elevato *fabbisogno di energia per riscaldamento* (kWh/m²anno) hanno bisogno, nella maggior parte dei casi, di sistemi di emissione in grado di garantire elevate potenze termiche (kW). Questo aspetto preclude la fattibilità tecnico-economica di sistemi di emissione che lavorano con basse temperature di mandata dei fluidi termovettori, a discapito dell'efficienza dell'impianto di generazione dell'energia termica.

Interventi di ristrutturazione profonda degli edifici, nei quali è prevista la realizzazione di involucri edilizi sempre più efficienti, rappresentano un'opportunità non solo per ridurre il *fabbisogno di energia termica* (kWh/m²anno) ma anche per limitare le potenze (kW) che il sistema impiantistico deve garantire per il riscaldamento degli ambienti. In questo modo è possibile ridurre la temperatura di mandata dei fluidi termovettori, privilegiando sistemi cosiddetti "a bassa temperatura".

La domanda alla quale si vuole rispondere in questa sezione è se la tipologia di terminale di emissione dell'impianto di riscaldamento possa o meno influenzare, e nel caso in che modo, la curva di decadimento della temperatura operativa interna agli ambienti confinati a valle di un periodo di pre-carica delle masse dell'edificio.

Nello studio sono state messe a confronto tre tipologie di terminali di emissione che si distinguono per tipologia, capacità termica del terminale e sua interazione con la capacità termica delle masse dell'edificio.

Più precisamente:

- Un sistema ad aria in cui il riscaldamento dell'edificio avviene mediante l'immissione di aria calda all'interno degli ambienti. Queste tecnologie impiantistiche sono caratterizzate da risposte molto rapide nella modifica della temperatura dell'aria all'interno degli ambienti da riscaldare in quanto trasferiscono energia direttamente all'aria interna senza la mediazione di altre masse di fluido o solide da portare in temperatura.
- Un sistema idronico con radiatori. Tali sistemi sono classificati come sistemi a "bassa inerzia" caratterizzati da una risposta veloce del terminale nel portare in temperatura gli ambienti. Per gli scopi della ricerca che stiamo sviluppando ci interessa sottolineare che nei radiatori, al termine della fase di carica delle masse, rimane dell'acqua calda all'interno di ogni singolo terminale che potrebbe influenzare la curva di decadimento della temperatura operativa quando l'impianto viene spento.
- Un sistema radiante a pavimento. Differentemente dai precedenti, tali sistemi prevedono l'attivazione di una massa termica (solitamente dai 5 a 7 cm di massetto in sabbia cemento) per il riscaldamento degli ambienti. I sistemi radianti vengono comunemente identificati come sistemi a bassa temperatura ed "alta inerzia". A bassa temperatura perché la temperatura del fluido termovettore che alimenta le serpentine del pavimento radiante normalmente risulta inferiore ai 35 °C ÷ 37 °C (in funzionamento invernale, per riscaldamento). Ad alta inerzia perché prevedono l'attivazione di una massa termica ad una certa profondità che necessita di tempo superiore rispetto ai sistemi precedenti (radiatori ad acqua e sistemi ad aria), prima che il sistema impiantistico, nel suo complesso, riesca a trasferire all'aria interna (e alle superfici interne) l'energia necessaria per raggiungere la temperatura operativa prefissata.

I risultati dell'analisi sono stati prodotti considerando un appartamento di riferimento all'interno dell'edificio plurifamiliare di cui è stato creato il modello energetico di simulazione. A parità di giorni di carica (un giorno) i risultati sul lungo periodo mostrano una sostanziale indipendenza dalla tipologia di terminale di emissione. Il sistema radiante a pavimento, per via di limitazioni di trasferimento di potenza legati a vincoli tecnici e tecnologici nella realizzazione di questa tipologia di impianti, dopo un giorno di carica fatica a raggiungere la temperatura operativa target di 24,1 °C. Nonostante questo gap iniziale, la curva di decadimento della temperatura operativa non sembra risentirne, al contrario l'attivazione diretta di una massa termica (massetto di pavimento), rispetto agli altri sistemi simulati, consente di mitigare ulteriormente la caduta di temperatura operativa iniziale dopo lo spegnimento dell'impianto.

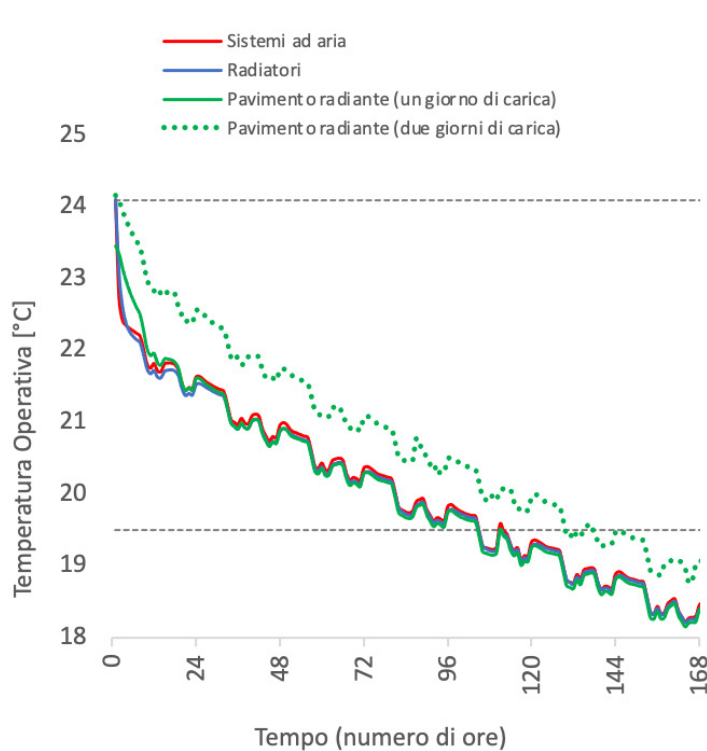


Figura 11

Curva di decadimento della temperatura operativa simulata, all'interno di un appartamento di riferimento, al variare della tipologia di terminale di emissione per riscaldamento

Riferendosi sempre ai primi istanti del decadimento, non emergono sostanziali differenze tra sistemi ad aria ed i radiatori. Per quanto riguarda quest'ultimi, seppure in tali sistemi, dopo lo spegnimento dell'impianto che fornisce potenza, l'acqua contenuta si mantenga calda ancora per un certo intervallo di tempo, il loro effetto sulla temperatura operativa risulta trascurabile. Questo perché la capacità termica dell'acqua contenuta nei radiatori è piuttosto piccola rispetto alla capacità termica attivata da un sistema radiante.

Nel caso di sistema radiante con attivazione della massa termica, risulta apprezzabile il fatto che si possono ottenere vari giorni di "autonomia" anche senza portare la temperatura operativa al limite superiore di comfort (24,1 °C). In generale, poiché il sistema radiante accumula energia nella massa relativamente in profondità, rispetto ai sistemi ad aria e radiatori che comunicano ed accumulano energia agli strati più superficiali, le temperature superficiali medie sono inferiori a parità di energia accumulata.

Per permettere agli ambienti interni di raggiungere la temperatura operativa di 24,1° C con l'utilizzo dei sistemi radianti a pavimento, è possibile prolungare il loro tempo di funzionamento (ad esempio due giorni). Sotto questa ipotesi si osserva una ulteriore attenuazione della pendenza iniziale della curva di decadimento della temperatura. Questa attenuazione è dovuta al fatto che le masse dell'edificio si sono caricate maggiormente di energia, in particolare quelle "profonde" attivate direttamente dal sistema radiante. Questa energia viene trasferita agli strati superficiali dopo lo spegnimento dell'impianto, mantenendone elevata la temperatura superficiale (e quindi la temperatura operativa, che è quella importante per il comfort).

Questi risultati confermano che potrebbe non essere necessario, anche se evidentemente utile, intervenire anche sui sistemi di emissione. Un ottimo intervento che aumenti le prestazioni dell'involucro edilizio è sufficiente per applicare con successo logiche di flessibilità energetica dei fabbricati che si basano sull'accumulo termico delle masse dell'edificio. Questo agevolerebbe anche la fattibilità degli interventi in quanto in alcuni casi, interventi di sostituzione degli impianti termici all'interno delle unità immobiliari non risulterebbero compatibili con l'abitabilità delle residenze durante lo svolgimento dei lavori. Tale aspetto potrebbe configurarsi come una barriera alla diffusione della ristrutturazione degli edifici, che potrebbe rallentare il processo di rigenerazione del parco edilizio esistente, su cui invece c'è la necessità di intervenire anche tramite un cambio di passo, al fine di raggiungere gli obiettivi di limitazione delle emissioni di CO2 che, come società, ci siamo posti al 2030 e 2050.

IN ESTATE SI POSSONO OTTENERE GLI STESSI BENEFICI DI FLESSIBILITA' DELLA DOMANDA?

È ovviamente rilevante ed importante la domanda:

come si comporta in estate un edificio ristrutturato con un involucro edilizio molto efficiente, che permetta di sfruttare logiche di flessibilità energetica durante la stagione di riscaldamento?

È noto che la dinamica termica dell'edificio durante la stagione calda è ben diversa da quella che si avrebbe durante l'inverno.

Durante la stagione invernale un buon involucro edilizio deve costantemente porsi come barriera alle dispersioni termiche attraverso gli elementi opachi e trasparenti in quanto, mediamente, la temperatura dell'aria esterna è sempre più bassa dei 20°C di temperatura dell'aria degli ambienti riscaldati. Un involucro edilizio ben isolato e con serramenti caratterizzati da basse trasmittanze termiche è in grado di porre un'ottima resistenza alle dispersioni termiche riducendo dunque il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento.

In estate invece la temperatura dell'aria esterna ha un andamento con un'ampia oscillazione rispetto alla temperatura media degli ambienti interni, che oscilla anch'essa ma in modo molto minore, poniamo attorno ai 26° C.³

Infatti, ci sono momenti della giornata estiva, ad esempio durante le ore più calde, in cui la temperatura dell'aria e delle superfici esterne è considerevolmente superiore alla temperatura di 26° C degli ambienti interni. Negli stessi momenti vi può essere forte irraggiamento solare per cui è opportuno che siano a disposizione dell'edificio delle schermature solari esterne a protezione delle superfici trasparenti al fine di ridurre gli apporti solari all'interno del fabbricato, che spingerebbero la temperatura interna fuori dall'intervallo di comfort e/o costituirebbero un carico termico da smaltire da parte degli eventuali sistemi di climatizzazione attiva.

Durante le ore notturne invece, la temperatura dell'aria e delle superfici esterne può essere di diversi gradi centigradi inferiore alla temperatura degli ambienti interni al fabbricato.

In queste ore notturne più vantaggiose, l'involucro edilizio deve essere in grado di "aprirsi" con l'ambiente esterno (ad esempio attraverso l'apertura dei serramenti) in modo da sfruttare le condizioni favorevoli dell'aria esterna più fresca per effettuare il raffrescamento degli ambienti interni e per asportare il calore accumulato dalle masse dell'edificio durante le ore diurne [Figura 12, Figura 13]. Come vedremo più avanti, l'ottimizzazione dello sfruttamento delle condizioni ambientali esterne può essere ulteriormente massimizzato in entrambe le stagioni grazie anche all'ausilio di un impianto di ventilazione meccanica dotato di un recuperatore di calore con possibilità di bypass.

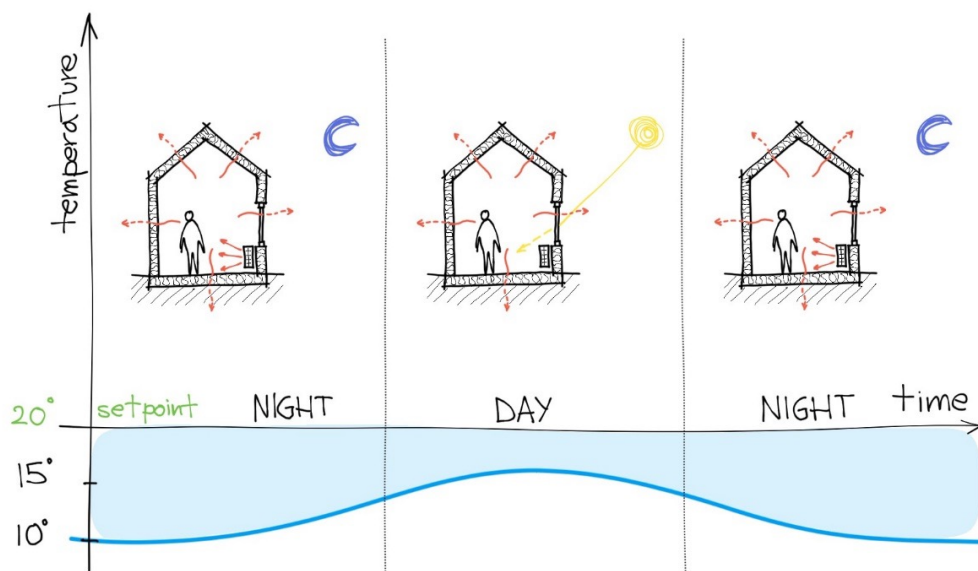


Figura 12

Schema concettuale invernale dell'interazione tra involucro edilizio e clima esterno. In inverno la temperatura dell'aria esterna è sempre minore della temperatura di setpoint (20°C) sia di giorno che di notte. L'involucro deve ridurre il più possibile le dispersioni termiche e le superfici trasparenti devono essere utilizzate per sfruttare al meglio gli apporti solari gratuiti.

3. Per semplicità ci riferiamo qui a un valore di temperatura fisso. Va ricordato però che gli standard di comfort raccomandano degli intervalli di comfort, e che questi intervalli, in caso di ventilazione naturale, si spostano verso temperature più elevate quando la temperatura esterna sale (adaptive comfort, secondo EN 16798) o se si utilizzano ventilatori, ad esempio ventilatori a soffitto (elevated air speed method, secondo ASHRAE 55:2020)

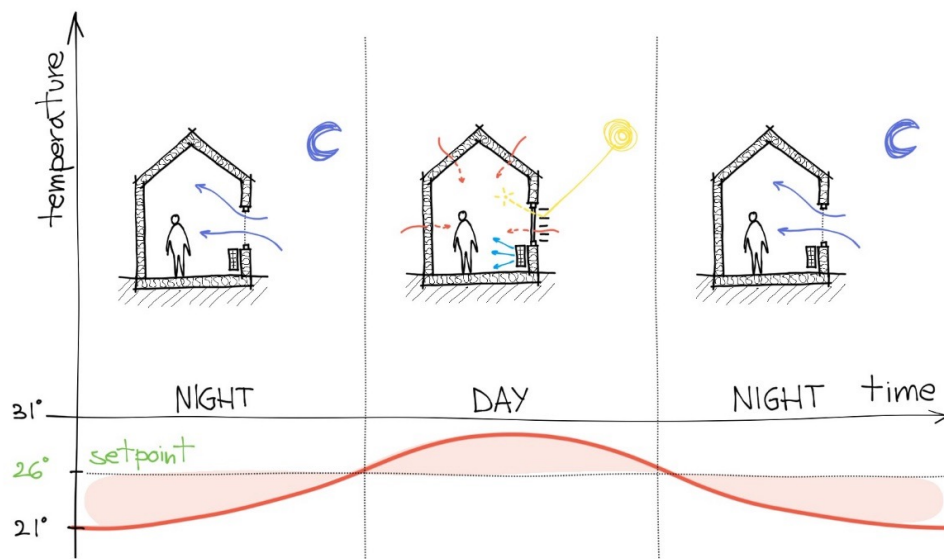


Figura 13

Schema concettuale estivo dell'interazione tra involucro edilizio e clima esterno. In estate la temperatura dell'aria esterna oscilla intorno alla temperatura di setpoint (26° C). Normalmente è più alta durante le ore giornaliere e più bassa durante le ore notturne. L'involucro deve ridurre il più possibile gli apporti termici e solari (con un uso razionale delle schermature solari delle superfici vetrate) durante le ore di luce, mentre durante le ore notturne è opportuno sfruttare logiche di raffrescamento passivo attraverso la ventilazione naturale.

Non potendo disporre di edifici dotati di un sistema di climatizzazione attiva per poter testare strategie di flessibilità energetica durante la stagione estiva, come invece è accaduto per la stagione invernale, sono stati costruiti dei modelli di simulazione dinamica che ci hanno permesso di valutare numericamente le potenzialità di gestione nel tempo dei picchi energetici richiesti per il raffrescamento degli edifici. Lo strumento di modellazione utilizzato per effettuare le simulazioni energetiche in regime dinamico è EnergyPlus.

Parimenti a quanto fatto per le simulazioni numeriche invernali, al fine di determinare l'intervallo di comfort target, si è fatto riferimento alla norma EN 16798 (che ha sostituito la EN 15251) scegliendo la categoria II (edifici nuovi) e si è adottato il modello di comfort di Fanger (ipotizzando che l'edificio sia dotato di un impianto di climatizzazione attiva). Si è assunto un abbigliamento tipico estivo in interni (0,5 clo), una attività metabolica corrispondente ad una situazione di persona in quiete (1 met), assenza di sistemi per aumentare la velocità dell'aria (posta quindi a 0,1 m/s), umidità relativa 60%.

Utilizzando il tool online dell'università di Berkeley⁴ in cui sono incorporati gli algoritmi per il modello di Fanger e il modello Adattivo nelle versioni EN 16798 e ASHRAE 55, si ottiene un intervallo di comfort che si estende da 24,5 °C a 27,1 °C di temperatura operativa (ovvero media pesata della temperatura dell'aria e delle superfici dell'ambiente). Entro questo intervallo l'ambiente risulta in condizioni di indice di PMV (voto medio di comfort previsto) compreso tra -0,5 e +0,5. Ricordiamo che in caso di impianti non presenti (o non attivi, secondo lo Standard ASHRAE 55:2020⁵) è previsto l'utilizzo del modello di comfort Adattivo, in cui l'intervallo di comfort non è fissato una volta per tutte, ma evolve verso temperature più alte col crescere della temperatura media esterna (approssimativamente una media pesata sugli ultimi 7 giorni). Vi sono anche proposte di utilizzare, in presenza di impianti attivi, il modello Adattivo per modificare dinamicamente il set point al variare della temperatura esterna. Per semplicità e aderenza alle norme attuali in questo studio abbiamo considerato il caso di set point fisso (a 26 °C) e utilizzato il modello di Fanger per determinare l'intervallo di comfort. Un ampliamento considerevole dell'intervallo di comfort è possibile (secondo EN 16798 e ASHRAE 55) con entrambi i modelli nel caso di utilizzo di ventilatori che portino la velocità dell'aria a 1 m/s e oltre⁶. Conservativamente in questa analisi non abbiamo considerato neanche questa possibile estensione dell'intervallo di comfort, che aggiungerebbe ulteriore flessibilità a quella fondamentale ottenuta con gli interventi sull'involucro edilizio. Per quanto riguarda il clima, come illustrato in Figura 14 e Figura 15, si è considerato un clima tipico della pianura padana, scegliendo una "giornata estiva media" che viene ripetuta ciclicamente, per depurare il calcolo dalla variabilità delle condizioni climatiche esterne. Un secondo calcolo viene effettuato utilizzando una ripetizione ciclica di una "giornata estiva sfavorevole" con temperatura dell'aria esterna che si mantiene sempre sopra i 26 °C e temperatura massima oltre 38 °C. L'irraggiamento solare è assunto essere lo stesso in entrambi gli scenari.

4. <http://comfort.cbe.berkeley.edu>

5. ANSI/ASHRAE Standard 55-2020. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy [Internet]. 2020 p. 80. Available from: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>

6. Raftery P, Fizer J, Chen W, He Y, Zhang H, Arens E, et al. Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. Building and Environment. 2019 May;155:210-23.

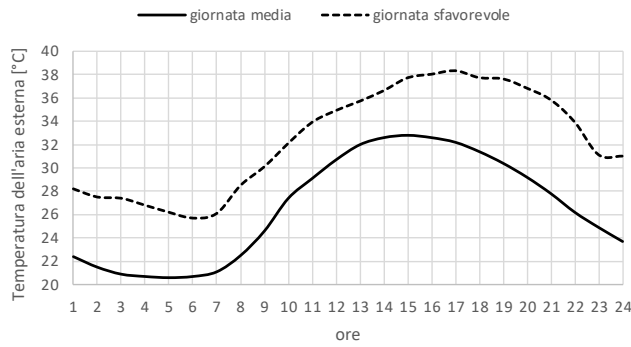


Figura 14

Temperatura dell'aria a bulbo secco in una giornata estiva media e una giornata estiva sfavorevole.

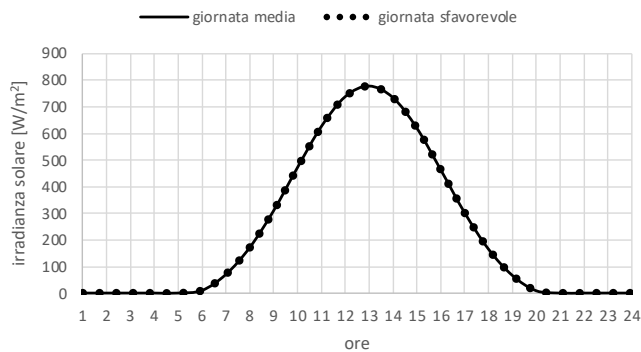


Figura 15

Irradianza solare globale [W/m²] su superficie orizzontale in una giornata estiva media e una giornata estiva sfavorevole (assunzioni: entrambe le giornate senza copertura nuvolosa durante le ore di luce).

Il modello energetico costruito per le simulazioni numeriche in regime estivo è stato realizzato sullo stesso edificio utilizzato per le analisi invernali. Trattandosi di una effettiva ristrutturazione in via di conclusione, si precisa che da progetto non è stata prevista l'installazione di un sistema di climatizzazione estiva negli appartamenti, il cui grado di comfort estivo è aumentato in modo considerevole grazie alle misure passive adottate nel retrofit (isolamento e protezioni solari esterne a lamelle). Per questo motivo non è stato possibile effettuare dei test di flessibilità energetica in regime estivo durante l'ultima stagione calda che seguano lo schema sopra enunciato.

Per diretta confrontabilità dei risultati viene proposta la stessa modalità di rappresentazione e discussione dei risultati ottenuti attuata nello studio precedente. Per lo stesso motivo, quando coerente, vengono ripresi i risultati ottenuti durante le simulazioni energetiche effettuate in regime invernale.

In tutte le simulazioni è stato ipotizzato un funzionamento dell'impianto di ventilazione meccanica con portata di 0,5 vol/h durante le ore diurne e 0,25 vol/h durante le ore notturne. Il recuperatore di calore rimane attivo con possibilità di bypass quando la temperatura dell'aria esterna è inferiore a 26 °C fino al limite inferiore di 13°C.

Per quanto riguarda l'attivazione dei sistemi di schermatura solare mobile installati nell'edificio si è ipotizzato il comportamento di un utente mediamente attento, che attiva le schermature solari quando la radiazione solare incidente sulla superficie trasparente è superiore a 400 W/m². In questo modo si tiene in considerazione, vista la destinazione d'uso residenziale dell'edificio, la possibilità che l'inquilino non si attivi subito nel proteggersi dagli apporti solari quando il sistema trasparente viene colpito dalla radiazione solare diretta, garantendo al contempo una maggiore disponibilità di luce naturale all'interno dei locali. Settare l'irradianza a cui corrisponde l'attivazione delle protezioni solari al livello di 200 W/m² ridurrebbe ancora i carichi solari indesiderati, ma rappresenterebbe un utente particolarmente preciso o un sistema di controllo automatizzato cui gli utenti diano pieno controllo.

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

Dopo una ristrutturazione profonda come quella descritta e con l'ipotesi aggiuntiva di installazione di un sistema attivo di climatizzazione estiva, nelle nostre simulazioni abbiamo imposto il raffrescamento degli alloggi fino a scendere ad una temperatura operativa di 24,5 °C e il mantenimento di questo valore rispettivamente per 1, 2, 3, 4 e 5 giorni prima di spegnere l'impianto di raffrescamento. Con clima costituito dalla giornata media ripetuta, il periodo di tempo in cui la zona termica considerata rimane in comfort è diverso nei cinque casi, ma la differenza è limitata.

Le simulazioni effettuate in regime estivo producono risultati analoghi a quelli ottenuti per la stagione invernale. Raffrescare preventivamente gli ambienti a temperature più basse della temperatura dell'aria target di 26°C, fino al limite inferiore di temperatura operativa di 24,5°C, con un ottimo involucro edilizio ed una gestione mediamente attenta degli apporti solari da parte degli occupanti, consentirebbe di rimanere all'interno dell'intervallo di comfort per diversi giorni.

Rispetto alle simulazioni invernali si osserva una maggiore oscillazione della temperatura operativa all'interno dell'alloggio di riferimento nell'arco delle 24 ore. Questo risulta essere la naturale conseguenza, come anticipato in premessa ed a differenza della condizione invernale, dell'influenza delle condizioni della temperatura dell'aria esterna, che in estate in alcuni momenti della giornata (tipicamente di notte), contribuiscono maggiormente a favorire la dispersione di calore accumulato durante le ore calde della giornata all'interno dei locali e nelle masse delle strutture edilizie che compongono il fabbricato.

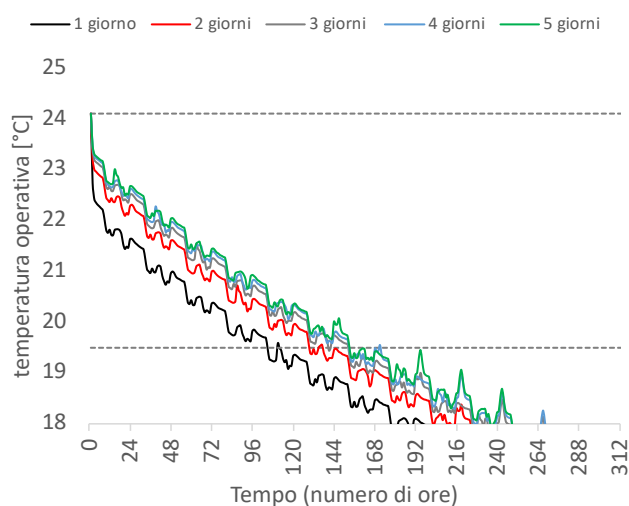


Figura 16

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 **IN INVERNO**

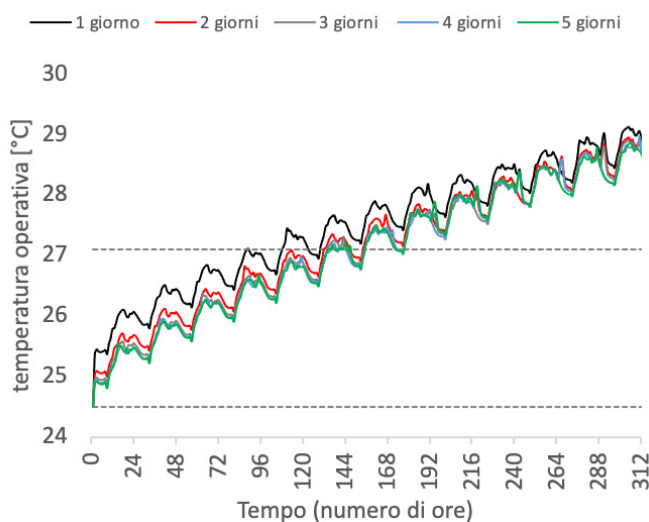


Figura 17

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 **IN ESTATE**

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

La Figura 18 e la Figura 19 mostrano come sia durante la stagione invernale che durante quella estiva la semplice sostituzione dei serramenti non sia una misura sufficiente per attuare strategie di flessibilità energetica. È necessario fare di più. È indispensabile realizzare un cappotto termico di elevato spessore utilizzando materiali con conducibilità termica ridotta (ad esempio come nel caso oggetto di studio conduttività dell'ordine di $0,035 \div 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, spessore 25 cm) e preferibilmente in grado di garantire elevata inerzia termica.

È possibile migliorare ulteriormente la prestazione mediante l'installazione ed il corretto utilizzo delle schermature solari esterne. Se si realizza anche l'applicazione di strategie di raffrescamento passivo, attraverso lo sfruttamento della ventilazione naturale nei momenti in cui la temperatura dell'aria esterna risulta favorevole per ridurre la temperatura operativa all'interno degli alloggi e rimuovere con più efficacia il calore accumulato nelle strutture edilizie durante le ore calde della giornata, è possibile controllare e mantenere le condizioni di comfort all'interno degli ambienti per diversi giorni. La strategia di ventilazione naturale simulata prevede un ricambio d'aria costante di 0,5 vol/h dalle 06:00 alle 24:00 e di 3 vol/h dalle 00:00 alle 06:00. Abbiamo quindi assunto un numero di ricambi notturni non particolarmente elevato rispetto a ciò che è possibile ottenere in ventilazione naturale. La ventilazione naturale notturna produce durante queste ore una significativa riduzione della temperatura operativa, che rimane nell'intervallo di comfort, oltre a una riduzione della temperatura operativa durante il giorno. Grazie all'estrazione di energia dalle masse prodotta dalla ventilazione notturna, la temperatura operativa massima si mantiene all'interno dell'intervallo di comfort per un tempo significativamente più lungo.

Per quanto attiene al confronto dei risultati in cui le strategie di efficientamento sono state simulate con e senza l'ausilio della ventilazione meccanica controllata con recupero di calore e possibilità di bypass, diverse dalla strategia di ventilazione naturale come precedentemente descritta, per il presente studio, abbiamo assunto pari portate di ventilazione nei diversi scenari: 0,5 vol/h durante le ore diurne e 0,25 vol/h durante le ore notturne.

Tutte queste analisi sono delle stime di potenzialità in quanto, soprattutto durante la stagione estiva, il comportamento dell'occupante nella gestione del proprio immobile riveste un ruolo molto importante nel raggiungimento della flessibilità energetica. Un occupante poco attento o disinteressato potrebbe ridurre l'efficacia delle strategie discusse in questo studio. Come per qualsiasi oggetto tecnologico, la sua consegna agli utilizzatori va accompagnata da un "libretto di istruzioni" che illustri chiaramente le caratteristiche e le modalità d'uso dell'oggetto.

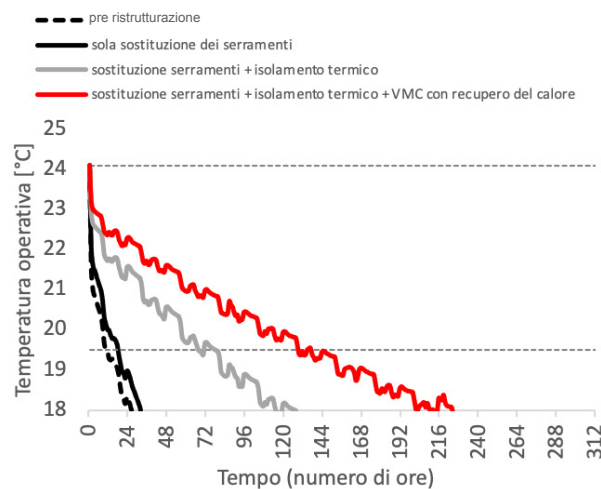


Figura 18

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, **IN INVERNO**

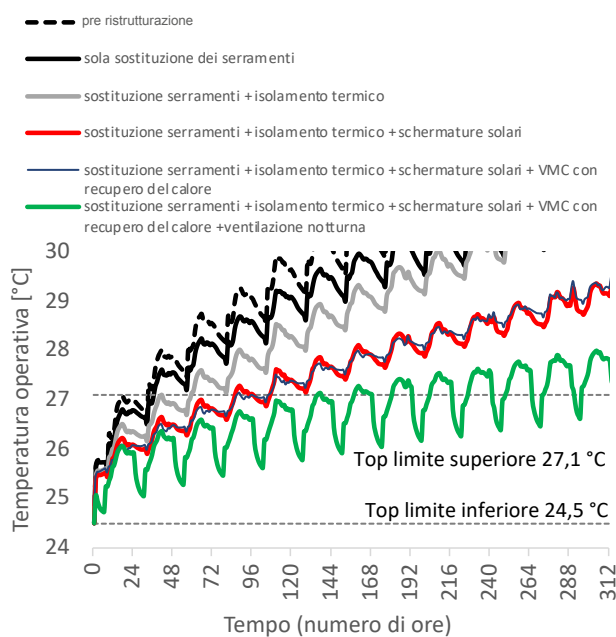


Figura 19

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

CHE VARIABILITÀ SI HA ALL'INTERNO DELL'EDIFICIO?

L'edificio oggetto di analisi è composto da più unità immobiliari che si differenziano per dimensione, esposizione, rapporto superficie disperdente/volume riscaldato. Come per il caso invernale, questi fattori che caratterizzano i termini di dispersione e di apporto all'interno di ogni singolo alloggio, fanno sì che non si abbia una evoluzione della temperatura operativa identica in tutto l'edificio.

In Figura 20 (inverno) ed in Figura 21 (estate) è rappresentato (in grigio) lo scostamento atteso rispetto all'appartamento di riferimento (linea nera) nella valutazione del tempo in cui le condizioni ambientali interne rimangono nell'intervallo di comfort.

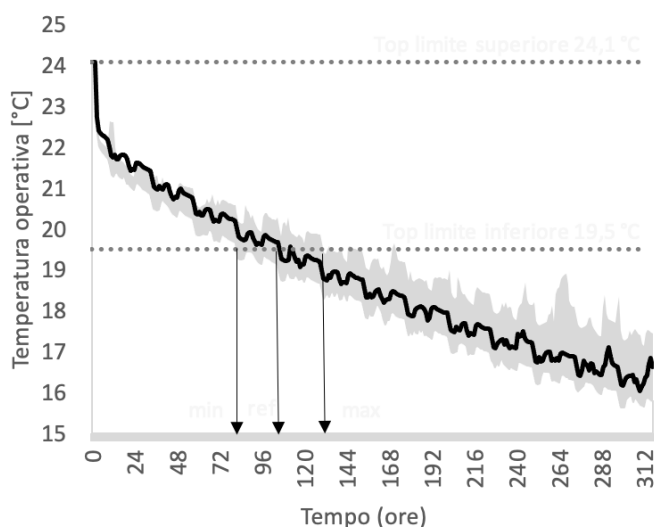


Figura 20

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, dopo l'intervento di ristrutturazione, **IN INVERNO**

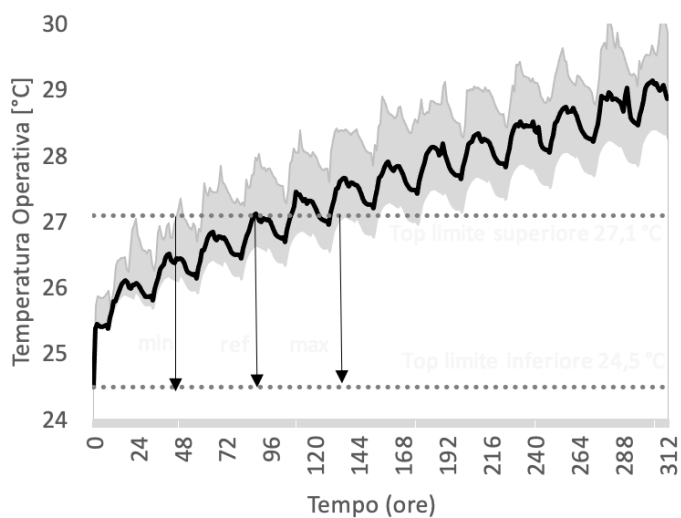


Figura 21

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, dopo l'intervento di ristrutturazione, **IN ESTATE**

Confrontando la risposta degli alloggi durante la stagione fredda con la risposta degli stessi durante la stagione calda si osserva come in inverno, dopo l'ammodernamento dell'edificio, gli appartamenti si comportano tutti in modo molto simile, mentre in estate il tempo di permanenza in comfort varia in modo più differenziato tra alloggio e alloggio. Anche questa differenza è dovuta alla differente interazione che l'edificio ha con il clima esterno nelle due stagioni estreme dell'anno (oscillazione della temperatura dell'aria esterna, apporti solari, ecc...), che rende l'esposizione dell'alloggio, in particolare alla radiazione solare, un fattore di maggior peso nel bilancio energetico della singola unità immobiliare in estate.

Questo effetto è ancora più evidente se osserviamo lo scostamento tra i diversi alloggi nel caso delle simulazioni dell'edificio prima dell'intervento di ristrutturazione, Figura 22 e Figura 23.

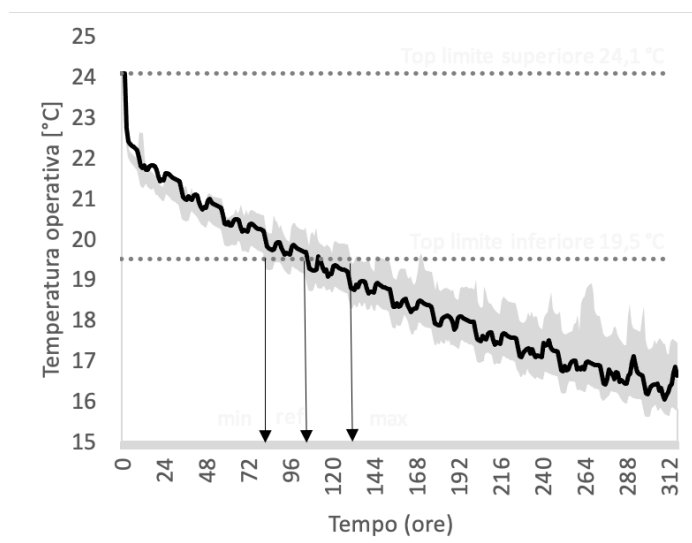


Figura 22

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, dopo l'intervento di ristrutturazione, **IN INVERNO**

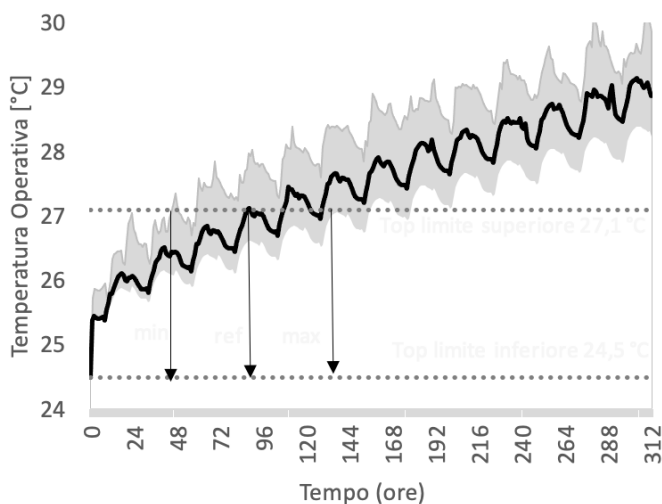


Figura 23

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, dopo l'intervento di ristrutturazione, **IN ESTATE**

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

È ragionevole pensare che edifici che siano energeticamente flessibili siano una risorsa strategica per gestire i carichi sulla rete durante i periodi particolarmente caldi, in quanto si stima che, se non verranno applicate politiche di ristrutturazione intensiva del patrimonio immobiliare esistente, la richiesta complessiva di energia per il raffrescamento o la climatizzazione estiva degli edifici continuerà a crescere negli anni.

La Figura 24 illustra i risultati delle simulazioni dinamiche effettuate ipotizzando che a valle del periodo di applicazione della strategia di flessibilità si presentino giorni con temperature esterne mediamente elevate (sempre sopra i 26°C) e cielo sereno (simulati con una ripetizione ciclica della "giornata estiva sfavorevole" Figura 14 e Figura 15).

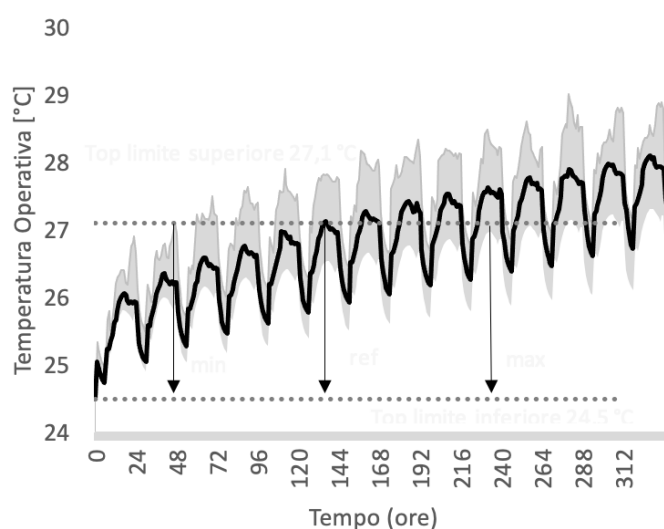


Figura 24

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, con applicazione della strategia di ventilazione notturna (come descritta in precedenza), dopo l'intervento di ristrutturazione, **IN ESTATE**

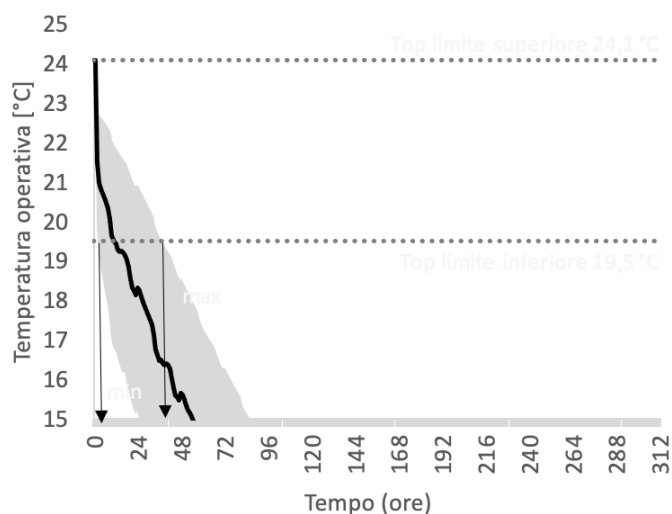


Figura 25

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, prima dell'intervento di ristrutturazione, **IN INVERNO**

Il periodo di tempo in cui la temperatura operativa rimane all'interno dell'intervallo di comfort si riduce rispetto al caso rappresentato in Figura 21, ma rimane comunque interessante (circa 60 ore, ossia quasi 2 giorni e mezzo). Grazie al contributo di un ottimo isolamento dell'involucro edilizio, unitamente alle altre strategie di efficientamento discusse sopra, questo edificio potrà risultare strategico all'interno di uno "smart district" o di una "smart city", permettendo di spostare preventivamente nel tempo la richiesta di energia per la climatizzazione estiva in momenti in cui c'è più disponibilità di rinnovabili, o al di fuori dei periodi in cui edifici meno efficienti richiederanno energia alla rete. Questo permetterà di appiattire la curva della potenza impegnata dalla rete e ridurre i picchi.

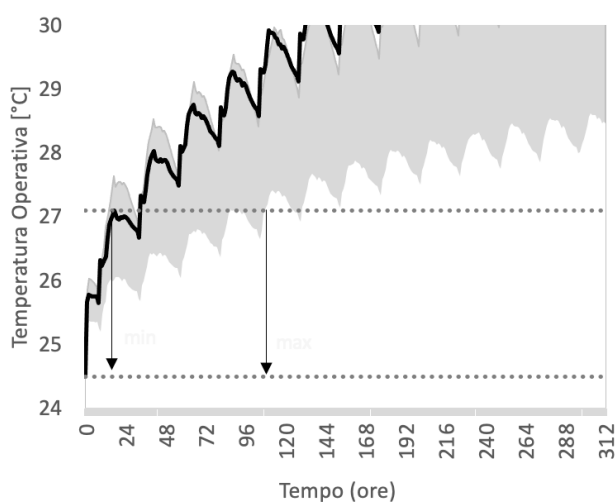


Figura 26

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, prima dell'intervento di ristrutturazione, **IN ESTATE**

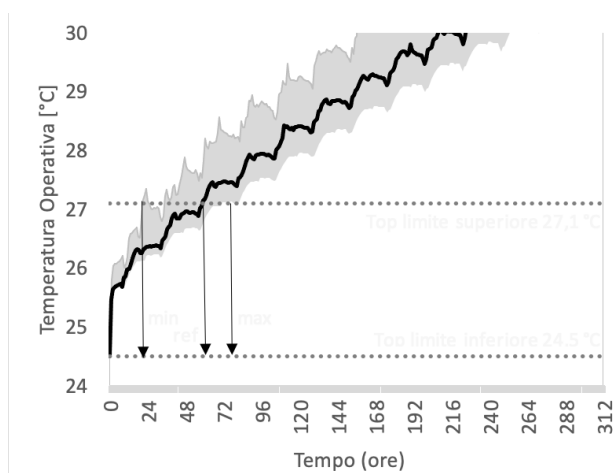


Figura 27

Evoluzione della temperatura operativa (Top) in diversi appartamenti (zona grigia) dopo 1 giorno di raffrescamento a 24,1°C e successivo spegnimento dell'impianto, in condizioni esterne di giornate particolarmente sfavorevoli con la temperatura dell'aria esterna sempre superiore ai 26°C.

CONCLUSIONI

Una delle maggiori barriere alla realizzazione delle smart cities e all'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 del fabbisogno 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 trasmissione termica stazionaria, che determina le perdite di energia invernali, sia della trasmissione 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 negli involucri 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'80-90% (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 rispetto a quanto reso possibile dall'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 il dirottamento di 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 comfort⁷, può consentire di:

- coordinare la domanda con l'offerta di energia locale ovvero "sciogliere" l'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, etc. si trascura il fatto che il rendere "fisicamente smart" o "flessibili" gli involucri degli edifici è il fattore abilitante, la conditio 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, 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.

7. 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)

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). (2020). 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).

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>

Raftery P, Fizer J, Chen W, He Y, Zhang H, Arens E, et al. Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. *Building and Environment*. 2019 May;155:210-23.

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