

Chiara Tonelli¹, <https://orcid.org/0000-0002-1200-7993>
Barbara Cardone², <https://orcid.org/0000-0002-5924-5673>
Giuliana Nardi¹, <https://orcid.org/0000-0002-6502-958X>

chiara.tonelli@uniroma3.it
barbara.cardone@uniroma3.it
giuliana.nardi@uniroma3.it

¹ Dipartimento di Architettura, Università degli studi Roma Tre, Italia

² Dipartimento di Scienze della Formazione, Università degli Studi Roma Tre, Italia

Abstract. La transizione ecologica impone un netto cambiamento nell'edilizia, responsabile del 40% dei consumi finali di energia. In Italia gli edifici residenziali, 12 milioni su 14, incidono più del 27% sugli usi energetici. La loro riqualificazione è quindi obiettivo chiave per il raggiungimento di un ambiente costruito sostenibile. Nelle case è però necessaria anche una drastica riduzione della domanda energetica, poiché la diffusa proprietà immobiliare non consente il controllo capillare del suo uso domestico. È quindi fondamentale che gli abitanti comprendano la diretta relazione tra le loro azioni e il cambiamento climatico, affinché gli sforzi di efficientamento non risultino inutili. Il saggio individua nell'IA lo strumento che può favorire la formazione di una cittadinanza energetica.

Parole chiave: Edilizia residenziale; Consapevolezza ambientale; Efficienza Energetica; Cittadinanza Energetica; Intelligenza Artificiale (AI).

Cambiare il modello energetico: il contesto culturale e lo stato della ricerca

In Europa, la transizione energetica e la decarbonizzazione dell'economia richiedono un cambiamento decisivo nel settore delle costruzioni, respon-

sabile di più del 40% dei consumi finali di energia. L'edilizia residenziale, in particolare, rappresenta la fetta più grande del patrimonio immobiliare con 240 milioni di edifici su 265, e incide con una quota pari circa al 27% sui consumi (Eurostat, 2021). Inoltre, per raggiungere gli obiettivi climatici imposti dall'Europa per il 2030, il settore immobiliare deve ridurre le proprie emissioni del 60% (CE, 2020), ma dati recenti mostrano che siamo ancora molto lontani dal raggiungerlo (Camera dei Deputati, 2023) (Fig. 1).

L'UE ha introdotto il Green Deal e orientato le sue politiche verso l'accelerazione della decarbonizzazione (CE, 2019), tra le quali anche il raddoppio delle ristrutturazioni edilizie nei pros-

simi 10 anni, dato che attualmente solo l'1% degli edifici europei viene sottoposto a riqualificazione energetica ogni anno (Camera dei Deputati, 2023). La Comunità Europea (CE) sta inoltre promuovendo iniziative di Partenariato Pubblico-Privato per dare impulso al settore della ristrutturazione edilizia. Nell'ambito di questa strategia di rinnovamento, nel 2023 la CE introdurrà gli "standard minimi di prestazione energetica" obbligatori, come indicato nell'EPBD 2021.

In Italia sono 7,4 milioni sui 12 totali, gli edifici residenziali costruiti tra il 1946 e il 1990 (Istat, 2011). In quegli anni diverse ragioni, tra cui l'urgenza della ricostruzione postbellica, la sperimentazione di nuove tecnologie edilizie e l'assenza di normative in materia di efficienza energetica, hanno portato alla realizzazione di un patrimonio immobiliare che richiede un pressante intervento di riqualificazione. La ricerca in questo settore ha già permesso di raggiungere un notevole livello di competenza con un impatto positivo sul settore immobiliare e su vari settori della produzione industriale (impianti di trattamento aria, materiali *low-carbon*, sistemi di produzione di energia rinnovabile). Permangono tuttavia due questioni irrisolte: la lentezza con cui si sta procedendo all'adeguamento energetico del patrimonio edilizio e la mancanza di un approccio sistematico per affrontare l'efficienza energetica negli edifici in modo integrato.

Mentre la soluzione alla prima è legata ai vincoli normativi e alla disponibilità di risorse finanziarie, la seconda questione richiede un passo avanti nell'attività di ricerca, che deve esse-

Digital tools for informed living

Abstract. Ecological transition requires a significant change in the construction industry, which is responsible for 40% of final energy consumption. In Italy, residential buildings account for more than 27% of energy consumption, 12 out of 14 million. Their renovation is, therefore, an important objective to achieve a sustainable built environment. However, a drastic reduction in energy demand is also needed in residential buildings, as widespread ownership does not allow comprehensive control of domestic consumption. Hence the importance that dwellers understand the direct link between their actions and climate change so that efficiency efforts are not in vain. The paper identifies in artificial intelligence an educational tool on energy citizenship.

Keywords: Housing; Environmental Awareness; Energy Efficiency; Energy Citizenship; Artificial Intelligence (AI).

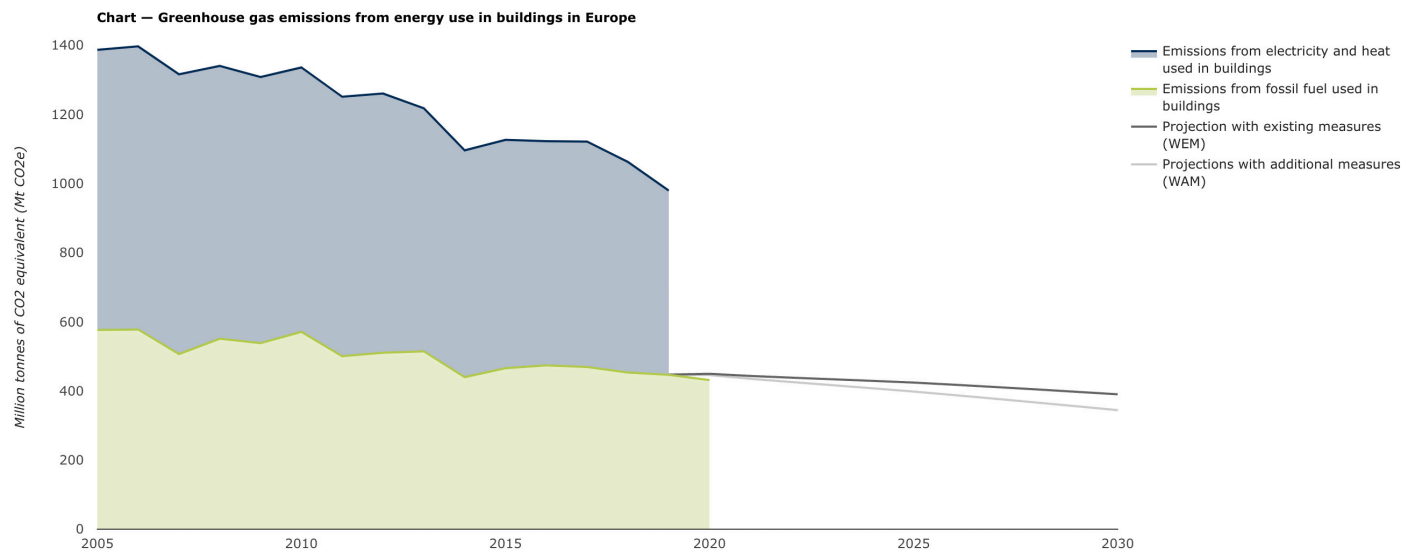
Changing the energy model: the cultural context and the state of research

In Europe, energy transition and decarbonisation of the economy require a decisive change in the building sector, which is responsible for more than 40% of final energy consumption. Residential buildings, in particular, account for the largest share at 240 million out of 265 buildings, and are responsible for about 27% of consumption (Eurostat, 2021). To meet the European climate targets for 2030, the real estate sector needs to reduce its emissions by 60% (EC, 2020), but the latest data show that we are still far from this target (Chamber of Deputies, 2023) (Fig. 1).

The EU has introduced the Green Deal and focused its policies on accelerating decarbonisation (EC, 2019), including doubling building retrofits in the next 10 years, as currently only 1% of

European buildings are energy retrofitted annually (Chamber of Deputies, 2023). The European Commission (EC) is also promoting public-private partnership initiatives to boost the building renovation sector. As part of this renewal strategy, in 2023 EC will introduce mandatory "minimum energy performance standards", as stated in EPBD 2021.

In Italy, there are 7.4 million, of the total 12 million, residential buildings built between 1946 and 1990 (Istat, 2011). During these years, several reasons, including the urgency of post-war reconstruction, the experimentation of new construction technologies, and the absence of regulations on energy efficiency have led to the emergence of a real estate stock in urgent need of rehabilitation. Research in this area has already reached a considerable level of knowledge, which has a positive im-



re indirizzata allo studio di sistemi complessi, interagenti tra loro, con un approccio transdisciplinare in grado di trovare soluzioni adeguate che ottimizzino contemporaneamente una varietà di fattori (Manfren *et al.*, 2020). Gestire l'efficienza energetica nell'edilizia residenziale, in relazione ai diversi usi finali, richiede infatti sia la conoscenza del comportamento effettivo dell'edificio e un'interazione in tempo reale con i suoi occupanti (Butera *et al.*, 2019), sia strumenti in grado di supportare efficacemente le decisioni anche su scala più ampia (Aste *et al.*, 2015).

In Italia, inoltre, la diffusa proprietà immobiliare delle abitazioni, pari al 79,5% del totale (Istat, 2021), incrementata negli ultimi 30 anni anche dalla parcellizzazione dei grandi *asset* di proprietà pubblica e privata, non consente di effettuare il controllo capillare dell'uso dell'energia all'interno delle abitazioni. Questo comporta una forte differenza con altri settori di consu-

mo, quali ad esempio l'industria, ed è quindi fondamentale che i cittadini comprendano la diretta relazione tra le loro azioni e il cambiamento climatico. In assenza di questa consapevolezza si rischia che gli sforzi di efficientamento del patrimonio immobiliare possano risultare inutili. Nelle case, quindi, per vivere di "energia pulita" servono, oltre all'implementazione di soluzioni in grado di utilizzare in modo efficiente le fonti rinnovabili, anche iniziative orientate alla drastica riduzione della domanda energetica. Ciò non si traduce solo nel passaggio a classi energetiche che corrispondono a consumi quasi nulli, ma anche a una transizione culturale degli abitanti.

Cambiare il modello energetico, pertanto, richiede la costruzione di una cittadinanza energetica ovvero la definizione di un nuovo ruolo per individui e comunità, orientati a un atteggiamento più informato, consapevole e critico, sia come *smart user* sia come *prosumer*.

pact on the real estate sector and on various areas of industrial production (HVAC, low carbon materials, renewable energy production systems). However, there are still two unsolved problems: the slow energy adaptation of the building stock and the lack of a systematic approach to address the energy efficiency of buildings in an integrated way.

While the solution to the first question is essentially related to legal constraints and the availability of financial resources, the second question requires a step forward in research that needs to be focused on the study of complex interacting systems, with a transdisciplinary approach capable of finding appropriate solutions that simultaneously optimise a variety of factors (Manfren *et al.*, 2020). Managing energy efficiency in housing in relation to different end uses requires

both knowledge of the actual behaviour of the building, real-time interaction with its occupants (Butera *et al.*, 2019), and tools capable of effectively supporting decisions even at larger scales (Aste *et al.*, 2015).

In Italy, the widespread ownership of housing, which represents 79.5% of the total population (Istat, 2021) and has increased in the last 30 years also due to the fragmentation of large public and private assets, does not allow capillary control of energy consumption in homes. This makes a huge difference to other consumption sectors, such as industry. Hence it is crucial for citizens to understand the direct link between their actions and climate change. In the absence of this awareness, there is a risk that efforts to improve the efficiency of real estate will prove useless. Therefore, in order to dwell in homes with "clean energy", initiatives to dras-

tically reduce energy demand are required, in addition to implementing solutions to efficiently use renewable energy sources. This means not only moving to energy classes that correspond to near-zero consumption, but also a cultural change among residents. Changing the energy model thus requires shaping energy citizenship, or defining a new role for individuals and communities focused on becoming more informed, aware and critical, both as smart users and prosumers.

The role of the user in the energy transition process

Indeed, many scientific studies focus on evaluating model buildings for energy efficiency after they have been built, with occupants often behaving and consuming exactly as they would in inefficient homes, as if they were unaware of the direct link between

their behaviour and the home's performance. Then, if the management were too complex, as often happens, and the occupants were not properly prepared, it would generate the same consumption as in inefficient buildings, leading to a significant failure of the initiative (Tonelli, 2022).

Recent research suggests that consumers need to both adopt new technologies and adapt their behaviours to reduce household energy consumption (Aydin *et al.*, 2017; Aydin *et al.*, 2018, Galassi and Madlener, 2018; Sorrell *et al.*, 2018). In fact, there is evidence of an increase in energy consumption after retrofit that has partially cancelled the gains made (Druckman *et al.*, 2011). For example, better insulation has resulted in dwellers adapting to higher comfort parameters rather than maintaining pre-renovation parameters, and achieving energy savings (Psomas *et al.*, 2016).

Il ruolo dell'utente nel processo di transizione energetica

in cui spesso gli utenti si comportano e consumano esattamente come farebbero in abitazioni non efficienti, come se non fosse loro chiaro il rapporto diretto tra il loro comportamento e le prestazioni della casa. Se poi la gestione fosse troppo complessa, come spesso accade, per abitanti non adeguatamente preparati, si andrebbero a generare gli stessi consumi di edifici colabrodo, comportando quindi un sostanziale fallimento dell'iniziativa (Tonelli, 2022). Ricerche recenti suggeriscono, infatti, che i consumatori dovranno sia adottare nuove tecnologie sia adattare i propri comportamenti per ridurre il consumo energetico delle abitazioni (Aydin *et al.*, 2017; Aydin *et al.*, 2018, Galassi and Madlener, 2018; Sorrell *et al.*, 2018). Esistono, infatti, prove di aumenti del consumo di energia dopo il retrofit, che - in parte - hanno annullato i guadagni ottenuti (Druckman *et al.*, 2011). Ad esempio, a fronte di un migliore isolamento termico si è registrato un adattamento degli utenti a parametri di comfort maggiorati, anziché il mantenimento dei parametri precedenti alla ristrutturazione e il conseguimento di risparmi energetici (Psomas *et al.*, 2016).

Le limitazioni del risparmio energetico possono riguardare variazioni osservabili a breve e lungo termine nel consumo di energia delle famiglie, attribuibili in particolare alle dinamiche della vita quotidiana, e non più ai fattori socio economici comunemente presi in esame, quali la dimensione e la composizione della famiglia, il reddito familiare e il tipo di proprietà (Gill *et al.*, 2010; Gram-Hanssen, 2010). Infatti, una ricerca post-occu-

Molti studi scientifici si concentrano nel valutare edifici modello per efficienza energetica dopo che sono stati realizza-

The limits to energy savings may involve observable short and long-term changes in household energy use, particularly due to the dynamics of daily life rather than to the socioeconomic factors commonly considered, such as family size and composition, family income, and property type (Gill *et al.*, 2010; Gram-Hanssen, 2010). In fact, a post-occupancy study of 11 new low energy homes in the United Kingdom found that 51%, 37% and 11% of the change in heat, electricity and water consumption between dwellings, respectively, was due to changes in occupants' daily activities and habits (Gill *et al.*, 2010).

Similarly, a systematic comparison of the heating energy demand of 5 identical residential buildings in Denmark showed large differences due to the different use of these buildings by the occupants (Gram-Hanssen, 2010).

These effects could explain why energy conservation measures in residential buildings often do not produce the desired results. Therefore, implementing decarbonisation requires a revision of individual behaviours to align them with more informed, conscious, and critical courses of action.

The concept of energy citizenship has been studied primarily in the social sciences and humanities, which have emphasised the reciprocal influence between individual lifestyles and social practices. The author's systematic review of the literature has shown that measuring energy citizenship means assessing the degree to which and the ways in which the goals of transition become part of the daily actions of individuals and the community to which they belong.

Energy Culture Framework (ECF) was identified to study domestic energy

consumption at different scales and in different social groups, combining social and cultural norms, actual energy consumption and prevailing material conditions. Developed by Stephenson *et al.* (2010, 2015), it was adapted by Rau *et al.* (2020), who studied the dynamics of energy consumption at different scales (Fig.2).

Using the concept of energy culture as a useful heuristic to structure the analysis of household-level energy demand, the research examined data from 20 households in a social housing complex in Ireland, collected before and after energy adaptation. The analysis was conducted using the three key elements of the ECF that relate to how users use energy at home, specifically: 1) material conditions, 2) host behaviours, perceptions, and norms, and 3) observable daily practices.

Overall, the results highlight the urgent need for an integrated approach to energy retrofits that combines technological changes with a parallel transformation of household behaviours and practices to achieve real and lasting reductions in energy consumption. It thus appears that the post-intervention analysis of energy retrofit initiatives should take into account not only the changes that have occurred at the technical-material level, but also changes at the level of expectations, aspirations and energy behaviours of those who occupy and use buildings. The latter aspect seems particularly urgent, both because of the persistence of many domestic activities with high energy intensity and because of the possible occurrence of rebound effects that could cancel out at least part of the savings achieved with modernisation (Rau *et al.*, 2020).

Utilizzando il concetto di *energy culture* come un'utile euristica per strutturare l'analisi della domanda di energia a livello domestico, la ricerca ha esaminato i dati di 20 famiglie in un complesso residenziale sociale in Irlanda, raccolti prima e dopo l'adeguamento energetico. L'analisi è stata condotta attraverso i tre elementi chiave dell'ECF, posti in relazione a come gli utenti usano l'energia a livello domestico, e nello specifico: 1) le condizioni materiali, 2) i comportamenti, le percezioni e le norme dei padroni di casa e 3) le pratiche quotidiane osservabili. Nel complesso, i risultati hanno evidenziato l'urgente necessità di un approccio integrato al retrofit energetico che combini i cambiamenti tecnologici con una riorganizzazione parallela dei comportamenti e delle pratiche dei nuclei familiari per ottenere riduzioni reali e durature del consumo energetico. Si dimostra così che le iniziative di retrofit energetico dovrebbero considerare nelle loro analisi post intervento non solo i cambiamenti avvenuti a livello tecnico-materiale, ma anche i cambiamenti occorsi a livello di aspettative, aspirazioni e comportamenti energetici di coloro che abitano e utilizzano gli edifici. Quest'ultimo aspetto sembra particolarmente pressante, sia per la persistenza di molte attività domestiche ad alta intensità energetica, sia per la possibile comparsa di *rebound effect* che potrebbero annullare almeno una parte dei risparmi realizzati con l'ammodernamento (Rau et al., 2020).

L'Intelligenza Artificiale per migliorare la consapevolezza dell'utenza

La digitalizzazione sta trasformando l'efficienza energetica, introducendo tecnologie e creando nuove fonti di dati dettagliati che supportano modelli di business e flussi energetici

Artificial intelligence to improve user awareness

Digitisation is transforming energy efficiency by introducing technologies and creating new sources of detailed data that support business models and energy flows (Zubi et al., 2017). It also provides information and a clear overview of distributed energy resources. In addition, it is critical to expand the scope and scale of energy efficiency through electrification, energy source switching, and behaviour change. To support energy management in and for the building, the most current European legislation addresses digital tools for energy efficiency measures to create safer, cleaner, and more flexible systems (EC, 2021). However, digitisation and access to ICT are influenced by numerous factors that lead to various forms of the digital divide, which increases inequal-

ities within a community and limits citizens' social and economic capital and their ability to take part in society (Ragnedda, 2017). Among the factors that most influence the digital divide are education and data inequality (Lythreath et al., 2021). Therefore, we need to work primarily on providing information about new technologies and on training users to make use of digital resources to initiate the transition process to new energy sources and new forms of supply and transformation. The scope is decarbonisation to transform urban environments and building systems. Based on what has been highlighted about the difficulty of managing energy efficiency for individual residents, it is believed that digital tools can contribute to providing useful information to optimise energy management, leaving it up to the user to pursue this goal or not.

(Zubi et al., 2017). Fornisce anche informazioni e una visione chiara sulle risorse energetiche distribuite.

È, inoltre, fondamentale per espandere la portata e la scala dell'efficienza energetica attraverso l'elettrificazione, la commutazione del vettore energetico e il cambiamento comportamentale. A sostegno della gestione energetica nell'edificio e per l'edificio, anche le disposizioni normative europee più attuali puntano sugli strumenti digitali per le politiche di efficienza energetica al fine di fornire sistemi più sicuri, puliti e flessibili (CE, 2021).

Tuttavia, sulla digitalizzazione e l'accesso all'uso di tecnologie ICT influiscono molteplici fattori che determinano diverse forme di divario digitale, *gap* che intensificano le disuguaglianze all'interno di una comunità, limitando il capitale sociale ed economico dei cittadini e la loro capacità di partecipare alla società (Ragnedda, 2017). Tra i fattori che maggiormente influenzano il divario digitale troviamo l'istruzione e la disuguaglianza dei dati (Lythreath et al., 2021). È pertanto proprio sull'informazione sulle nuove tecnologie e sulla formazione all'uso del digitale dell'utente, prima di altro, che bisogna operare per avviare il processo di transizione verso nuove fonti energetiche e nuove forme di approvvigionamento e conversione finalizzate alla decarbonizzazione, al fine di riorganizzare gli assetti urbani e i sistemi edilizi.

Partendo da quanto evidenziato circa la difficoltà di gestire l'efficientamento energetico per il singolo abitante, si ritiene che gli



strumenti digitali possano costituire un supporto a fornire informazioni utili per ottimizzare la gestione energetica, lasciando l'utente libero di perseguire o meno questo fine. La libertà di scelta, infatti, è essenziale per costruire la consapevolezza. Non, quindi, strumenti digitali che con automatismi gestiscono l'abitazione, ma strumenti informativi che, con la possibilità di confrontare scelte e loro conseguenze, orientano l'abitante a una gestione sempre più performante (Tonelli and Converso, 2014). Attraverso l'uso di una tecnologia responsiva e regolativa, quindi, si potrebbe indurre la consapevolezza sulla *governance* domestica, in persone che scelgono di agire in modi specifici, secondo il concetto di "architettura delle scelte", sapendo che ciascuna opzione ha un determinato impatto ambientale.

Gli interventi dell'architettura delle scelte basati sul fornire informazioni decisionali, mirano a facilitare l'accesso alle informazioni rilevanti per la decisione aumentando la disponibilità, la comprensibilità e la rilevanza personale per il decisore. Mirano, cioè, a guidare le persone verso comportamenti desiderabili sia sul piano personale sia su quello sociale, per supportare la valutazione e il confronto delle alternative di scelta disponibili e rinforzare intenzioni comportamentali precedentemente formate (Mertens *et al.*, 2022).

Con l'introduzione dell'Intelligenza Artificiale (IA), gli strumenti di controllo e gestione *indoor*, ormai diffusi e disponibili e tra l'altro inseribili senza particolari stravolgimenti impiantistici all'interno delle case, potrebbero incrementare le proprie possibilità. L'IA è un campo di ricerca e sviluppo su cui si fonda l'industria 5.0 che istruisce sistemi attraverso l'immissione di dati per ragionare con capacità simili a quelle umane, svolgendo in sostituzione alcune operazioni ripetitive. In particolare,

Freedom of choice is essential to raise awareness. Hence, these are not digital tools that manage the house with automatism, but informative tools that, with the possibility of comparing choices and their consequences, lead the occupant to increasingly efficient management (Tonelli and Converso, 2014). The use of responsive and regulatory technologies could, thus, create awareness of household management among people who, according to the concept of "architecture of choices", choose certain behaviours, knowing that each option has a certain impact on the environment. Choice architecture interventions, based on the provision of decision information, aim to facilitate access to decision-relevant information by increasing its availability, comprehensibility, and personal relevance to the decision maker. That is, such interventions aim to guide

people toward personally and socially desirable behaviours to support the evaluation and comparison of available choice alternatives and reinforce previously formed behavioural intentions (Mertens *et al.*, 2022). With the introduction of Artificial Intelligence (AI), the indoor control and management tools that are widely used and available today, and which can be used in homes without requiring any particular changes to the facilities, could expand their capabilities.

AI is a research and development area underlying Industry 5.0 that uses data input to guide systems to think with human-like capabilities. It performs some repetitive tasks as a substitute. Specifically, AI activates predictive modelling, which is categorised as Machine Learning (ML) and is concerned with developing algorithms that can learn and improve their performance

l'IA attiva una modellazione predittiva, inserita nella categoria *Machine Learning* (ML), che si occupa di elaborare algoritmi in grado di apprendere e migliorare le prestazioni a partire da dati di esempio, che ne determinano il metodo di apprendimento (Ngarambe *et al.*, 2020).

La capacità di apprendimento dell'IA permette di immaginare strumenti che, anziché generare azioni conseguenti ad algoritmi asettici, riescono a imparare dai comportamenti degli utenti per sviluppare azioni sempre più *ad hoc* rispetto a scelte puntuali e non generali. È, infatti, ben noto quanto i sistemi domotici siano fastidiosi, dal momento che lavorano su medie di benessere termico, luminoso e igrometrico e non sul loro adattamento alla persona.

La messa a punto di strumenti coadiuvati da modelli di IA è resa possibile grazie a *software* di modellazione parametrica, che calcolano l'impatto complessivo delle singole azioni e analizzano l'interazione tra diversi parametri. Il computer riceve i dati (già preparati o raccolti tramite sensori), li processa e risponde. L'IA, infatti, permette ai sistemi di capire il proprio ambiente, mettersi in relazione con quello che monitorano e risolverne i problemi. Tra i vari campi di applicazione troviamo la riduzione dei costi energetici e il miglioramento del comfort degli occupanti, attraverso: la valutazione del comfort termico degli edifici, quantificato in base a fattori come la temperatura, l'umidità e la velocità dell'aria - ad esempio attraverso l'indice *Predicted Mean Vote* (PMV) e sue varianti; la regolazione e l'ottimizzazione degli impianti, come quello *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC), in previsione dei livelli di occupazione (de Dear and Brager, 1998; Fanger and Toftum, 2002). Tuttavia, questi modelli non mettono a sistema tutti i fattori che

from sample data, which determine their learning method (Ngarambe *et al.*, 2020).

The learning ability of AI makes it possible to imagine tools, which, instead of generating actions ruled by aseptic algorithms, can learn from the behaviour of users to develop increasingly *ad hoc* actions for specific and not general decisions.

It is widely known that home automation systems are annoying, since they are based on averages of thermal, light and hygrometric comfort, rather than on their adaptation to the person.

The development of digital tools supported by artificial intelligence models is enabled by parametric modelling software, which calculates the overall impact of individual measures and analyses the interaction between different parameters. The computer receives the *data* (already prepared or

collected by sensors), processes it and responds to it. AI enables systems to understand their environment, relates to what they are monitoring, and solves problems. Applications include reducing energy costs and improving occupant comfort by: assessing the thermal comfort of buildings and quantifying it based on factors such as temperature, humidity, and air velocity - e.g., through the Predicted Mean Vote (PMV) index and its variants; adjusting and optimising systems such as the heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) one, to take the foreseen occupancy density into account (de Dear and Brager, 1998; Ole Fanger and Toftum, 2002).

However, these models do not systematise all factors that contribute to overall occupant environmental exposure. In addition to linking perceived thermal comfort to energy demand

concorrono a un complessivo impatto ambientale dell'abitante. Oltre a incrociare il livello di comfort termico percepito con la domanda di energia – pianificandone e ottimizzandone la produzione e il consumo – e a gestire i dispositivi connessi, come elettrodomestici, termostati e sistemi di illuminazione, l'IA potrebbe arrivare a considerare l'impronta ecologica complessiva di ogni singolo abitante, calcolando non solo il contributo energetico, ma anche, ad esempio, quello idrico e dei rifiuti. Questa opportunità risponde alla impossibilità di poter individuare un modello gestionale unico per una società eterogenea come quella attuale, dove le esigenze e gli stili di vita dei singoli individui possono essere molto distanti tra loro, e consente di elaborare uno strumento in grado di mettere a sistema le variabili del problema, di per sé correlate ma con unità di misura diverse, e personalizzare le risposte nell'ottica della gestione sull'utente e sulle sue abitudini. Le reti convoluzionali (CNN), particolarmente utilizzate nel *Deep learning*, una tecnica di ML utilizzata per elaborare dati complessi, consentono di correlare le informazioni derivanti dalle diverse fonti prese in esame, generando risposte sempre più precise all'aumentare dei casi elaborati (Goodfellow *et al.*, 2017). Utilizzando la metodologia dell'ECF si potrebbe arrivare a: monitorare in tempo reale l'impronta ecologica della casa, in relazione al comportamento degli abitanti, e renderlo visibile in maniera facile e intuitiva; prevedere scenari ed effetti futuri basandosi sui dati raccolti nel tempo in merito ai comportamenti degli utenti e ai dati esterni (*big data*); stimare le conseguenze a lungo e a breve termine del comportamento degli abitanti per consumi e impatto ambientale; suggerire *best practice* per il miglioramento dell'impronta ecologica; permettere di pianificare le azioni per raggiungere personali obiettivi (meno consumi,

-scheduling and optimising energy production and consumption - and managing connected devices such as appliances, thermostats, and lighting systems, AI could go so far as to consider each occupant's total environmental footprint, calculating not only the energy contribution but also, for example, the contribution of water and waste. This possibility is a response to the impossibility of finding a single management model for such a heterogeneous society, where the needs and lifestyles of individuals can be far apart. It allows to develop a tool that can systematise the variables of the problem, which are related but have different units of measurement, and to adapt the answers to the user and his habits in terms of management. Convolutional networks (CNNs) – used especially in deep learning – a technique for processing complex

data, can be used to relate information from the various sources examined, with answers becoming more precise as the number of processed cases increases (Goodfellow *et al.*, 2017). The ECF method could be used to: monitor the ecological footprint of the home in relation to occupant behaviour in real time, and visualise it in a simple and intuitive way; predict future scenarios and impacts based on both occupant behaviour *data* collected over time and external *data* (Big Data); estimate the long-term and short-term consequences of occupants' behaviour on consumption and environmental impacts; propose best practices to improve the ecological footprint; and enable the planning of actions to achieve personal goals (less consumption, less waste). AI thus puts humans back in the centre, restoring their time and quality of life

meno rifiuti). L'IA quindi rimette l'uomo al centro, per restituirgli tempo e qualità della vita, sostituendosi alle azioni più routinarie che ne occupano le giornate aiutando, in questo senso, anche a superare il *digital divide* generazionale e/o sociale (Lythreathis *et al.*, 2022; Ragnedda, 2017), in quanto il sistema, se sviluppato adeguatamente, potrebbe risultare di maggiore facilità d'uso anche rispetto a un comune terminale di controllo dell'impianto di climatizzazione.

REFERENCES

- Aste, N., Del Pero, C., Adhikari, R. S. and Marenzi, G. (2015), "Effectiveness and weaknesses of supporting policies for solar thermal systems - A case-study", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 14, pp. 146-153.
- Aydin, E., Brounen, D. and Kok, N. (2018), "Information provision and energy consumption: evidence from a field experiment", *Energy Economics*, Vol. 71.
- Aydin, E., Kok, N. and Brounen, D. (2017), "Energy efficiency and household behavior: the rebound effect in the residential sector", *RAND Journal of Economics*, Vol. 48, n. 3.
- Butera F. M., Caputo P., Adhikari R. S. and Mele R. (2019), "Energy access in informal settlements. Results of a wide on site survey in Rio De Janeiro", *Energy Policy*, Vol. 134, pp. 1-10.
- Camera dei Deputati (2023), *La revisione della direttiva sulla prestazione energetica degli edifici*, Dossier n° 17. Available at: <https://documenti.camera.it/Leg19/Dossier/Pdf/AT017.Pdf> (Accessed on 28/02/2023).
- De Dear, R. and Brager, G.S. (1998), *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*.
- Druckman, A., Chitnis, M., Sorrell, S. and Jackson, T. (2011), "Missing carbon reductions? Exploring rebound and backfire effects in UK households", *Energy Policy*, Vol. 39, n. 6.

by performing the repetitive tasks that occupy their days. In this sense, it also helps to bridge the generational and social digital divide (Lythreathis *et al.*, 2022; Ragnedda, 2017), as the system, if properly developed, could be even more user-friendly than an average air conditioning system.

- European Commission (2019), *Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions - the European green deal*, Brussels, 11.12.2019 COM (2019) 640 final. Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_1&format=PDF (Accessed on 28/02/2023).
- European Commission (2020), *Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Un'onda di ristrutturazioni per l'Europa: investire gli edifici, creare posti di lavoro e migliorare la vita*, COM(2020) 662 final. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0662&from=IT> (Accessed on 28/02/2023).
- European Commission (2021), "Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione), COM(2021) 802 final". Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0802&qid=1645624555853&from=IT> (Accessed on 28/02/2023).
- Eurostat (2021), *Energy Balances*. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances> (Accessed on 28/02/2023).
- Fanger, P.O. and Toftum, J. (2002), "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates", *Energy and buildings*, Vol. 34, n. 6, pp. 533-536.
- Galassi, V. and Madlener, R. (2018), "Shall I open the window? Policy implications of thermal-comfort adjustment practices in residential buildings", *Energy Policy*, Vol. 119.
- Gill, Z.M., Tierney, M.J., Pegg, I. M. and Allan, N. (2010), "Low-energy dwellings: The contribution of behaviors to actual performance", *Building Research & Information*, Vol. 38, n. 5, pp. 491-508.
- Gill, Z.M., Tierney, M.J., Pegg, I.M. and Allan, N. (2010), "Low-energy dwellings: The contribution of behaviors to actual performance", *Building Research & Information*, Vol. 38, n. 5, pp. 491-508.
- Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A. (2017), *Deep Learning*, Boston: Mit Press.
- Gram-Hanssen, K. (2010), "Residential heat comfort practices: Understanding users", *Building Research & Information*, Vol. 38, n. 2, pp. 175-186.
- Istat (2011), *Censimento Popolazione e Abitazioni*. Edifici residenziali. Available at: <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx> (Accessed on 28/02/2023).
- Istat (2021), Titolo di godimento dell'abitazione (in affitto o di proprietà): Regioni e tipo di comune. Available at: <http://dati.istat.it/> (Accessed on 28/02/2023).
- Lythreitis, S., Singh, S., K. and El-Kassar, A., (2022), "The digital divide: A review and future research agenda", *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 175.
- Manfren M., Aste N., Leonforte F., Del Pero C., Buzzetti M., Adhikari R. S. and Zhixing L. (2020), "Parametric energy performance analysis and monitoring of buildings – HEART project platform case study", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 61, pp. 1-16.
- Mertens, S., Herberz, M., Hahnel, U.J. and Brosch, T. (2022), "The effectiveness of nudging: A meta-analysis of choice architecture interventions across behavioral domains", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 119, n. 1, e2107346118.
- Ngarambe, J., Yun, G.Y. and Santamouris, M. (2020), "The use of artificial intelligence (AI) methods in the prediction of thermal comfort in buildings: Energy implications of AI-based thermal comfort controls", *Energy and Buildings*, Vol. 211, 109807.
- Psomas, T., Heiselberg, P., Duer, K. and Bjørn, E. (2016), "Overheating risk barriers to energy renovations of single family houses: multicriteria analysis and assessment", *Energy Buildings*, Vol. 117.
- Ragnedda, M. (2017), *The third digital divide: A Weberian approach to digital inequalities*. Routledge.
- Rau, H., Moran, P., Manton, R. and Goggins, J. (2020), "Changing energy cultures? Household energy use before and after a building energy efficiency retrofit", *Sustainable Cities and Society*, 54, 101983.
- Sorrell, S., Gatersleben, B. and Druckman, A., (2018), "Energy sufficiency and rebound effects", *European Council for an Energy Efficient Economy*.
- Stephenson, J., Barton, B., Carrington, G., Doering, A., Ford, R., Hopkins, D. and Wooliscroft, B. (2015), "The energy cultures framework: Exploring the role of norms, practices and material culture in shaping energy behavior in New Zealand", *Energy Research & Social Science*, Vol. 7, pp. 117-123.
- Stephenson, J., Barton, B., Carrington, G., Gnoth, D., Lawson, R. and Thorsnes, P. (2010), "Energy cultures: A framework for understanding energy behaviors", *Energy Policy*, Vol. 38, n. 10, pp. 6120-6129.
- Tonelli, C. (2022), *La casa 4.0. Nuove frontiere dell'abitare*, Maggioli Editore.
- Tonelli, C., & Converso, S. (2014), "Digital mirror: A method to shape smart citizenship", *Energy and buildings*, Vol. 83, pp. 173-180.
- Zubi, G., Spertino, F., Carvalho, M., Adhikari, R.S. and Khatib, T. (2017), "Development and assessment of a solar home system to cover cooking and lighting needs in developing regions as a better alternative for existing practices", *Solar Energy*, Vol. 155, pp. 7-17.