

15th CIRIAF National Congress
Environmental Footprint and Sustainable Development

Effetti dei cambiamenti climatici sulle prestazioni termo-energetiche degli edifici in clima Mediterraneo

Cristina Carletti¹, Gianfranco Cellai¹, Fabio Sciarpi¹, Leone Pierangioli^{1,*}

¹Gruppo di lavoro LAB-ZEB - Unità di ricerca “Cambiamenti cLimAtici SiStemi ed Ecosistemi (CLASSE)” - Università degli Studi di Firenze

* Autore da contattare. E-Mail: leone.pierangioli@unifi.it

Abstract: I cambiamenti climatici rappresentano un'emergenza globale affrontata con strategie che prevedono una combinazione di azioni di adattamento e mitigazione, tra le quali quella oggetto di studio volta al contenimento dei consumi energetici nel settore della climatizzazione civile che rappresenta una quota rilevante dei cambiamenti in atto. La prospettiva di intervento, in Italia e nei Paesi dell'area mediterranea, ma anche nel resto di Europa, si è progressivamente allargata dal miglioramento delle prestazioni in regime invernale a quelle in regime estivo ed, infine, a valutare come e quali interventi siano più o meno soddisfacenti se rapportati con il previsto cambiamento climatico. Sulla base di questa premessa, la memoria presenta la metodologia, le fasi di lavoro e alcuni risultati preliminari di un programma di ricerca finalizzato al contenimento dei consumi energetici e delle emissioni di gas climalteranti [1].

Keywords: Cambiamenti climatici; clima Mediterraneo; simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici; riqualificazione energetica; edifici residenziali condominiali.

1. Introduzione alla problematica

Gli obiettivi della ricerca in corso sono l'analisi delle interazioni fra i cambiamenti climatici di origine antropica e il comportamento termo-energetico del patrimonio edilizio esistente, nonché l'individuazione di strategie progettuali, applicabili sia alla ristrutturazione che alla nuova edificazione, in grado di assicurare migliori livelli di benessere e di ridurre le emissioni di gas serra. Tra i maggiori fattori che contribuiscono all'aumento dei gas climalteranti si annovera infatti la climatizzazione del settore civile, da cui la necessità della individuazione di soluzioni progettuali, per interventi di riqualificazione ma anche di nuova edificazione, congruenti con gli obiettivi suddetti.

L'attenzione sarà prioritariamente rivolta alla riqualificazione degli edifici esistenti (in particolare gli edifici residenziali realizzati nel settore del *social housing* dagli anni '50 agli anni '80), che sono maggiormente interessati dal problema dei cambiamenti climatici per vulnerabilità e quantità di emissioni. L'orizzonte temporale sarà compreso fra il 2036 e il 2075 in relazione alla presunta vita utile del parco edilizio considerato.

Il quadro di riferimento della ricerca è quindi costituito dalla doppia esigenza strategica, oggetto di numerosi interventi normativi a livello nazionale e internazionale, di ridurre da un lato la dipendenza dello sviluppo economico e sociale da fonti di energia non rinnovabili e dall'altro di mitigare l'impatto antropico sui cambiamenti climatici attribuibile all'immissione in atmosfera di gas climalteranti.

La tendenza già in atto porterà progressivamente ad un cambiamento nella composizione del fabbisogno energetico con uno spostamento dei consumi dal riscaldamento al raffrescamento e ad un probabile aumento del fabbisogno energetico annuale non sempre compensato dalla possibile riduzione dei consumi energetici invernali. Un contributo a tale situazione potrebbe essere involontariamente dato dall'adozione su vasta scala di tecniche costruttive non idonee ai cambiamenti climatici attesi, in quanto ancora sbilanciate a favore del controllo dei consumi energetici invernali. Si assiste, infatti, troppo spesso all'importazione acritica di tecnologie costruttive edilizie ed impiantistiche dal nord-europa caratterizzato da climi del tutto differenti da quello mediterraneo (vedasi ad esempio l'uso di serre, case *adiabatiche*), che potrebbero persino aggravare le esigenze attese quantomeno sul piano del benessere.

In particolare, partendo dal principio che le persone richiedono allo spazio abitato di assicurare condizioni di comfort invernale ed estivo, comprensive di una qualità accettabile dell'aria interna, e che i conseguenti consumi di energia sono da addebitare alle risposte più o meno insufficienti dell'involucro, la prospettiva dell'analisi di problemi e soluzioni può cambiare abbastanza radicalmente.

A tal fine, fatti salvi i consumi energetici per assicurare una corretta ventilazione ai fini igienici, se si decide di affidare interamente all'involucro degli edifici la risposta alle richieste di comfort è possibile ottenere i seguenti vantaggi:

- evidenziare il contributo in termini energetici che deve essere soddisfatto dal sottosistema impianti per ottenere le condizioni di benessere desiderate;
- l'entità di tale contributo può inoltre indirizzare nella selezione delle soluzioni d'intervento più opportune (sull'involucro e/o sugli impianti);
- tra le soluzioni individuate si può ulteriormente affinare la selezione confrontando il livello di coerenza delle stesse con i cambiamenti climatici attesi nonché con la loro fattibilità tecnico economica e la facilità d'uso dell'utente;
- infine, in fase preliminare dello studio, è possibile svincolarsi dal comportamento dell'utenza, notoriamente assai complesso da standardizzare e simulare, ma che ha una notevole influenza sui consumi energetici [2-5].

Per sviluppare la ricerca, gli aspetti che richiedono una prioritaria definizione sono i seguenti:

- individuazione della zona climatica dove condurre le analisi, per la quale siano disponibili dati sufficientemente attendibili con serie storiche consolidate;
- costruzione dei file climatici attuali e futuri espressi in forma di anno tipo, rappresentativi dei cambiamenti climatici attesi;

- individuazione di casi di studio costituenti un campione sufficientemente rappresentativo del patrimonio edilizio esistente sotto il profilo tipologico e tecnologico.

In merito agli aspetti suddetti si è deciso inizialmente di sviluppare e testare la metodologia per l'area climatica di Firenze e dintorni; la costruzione dei file climatici futuri, per la necessità di affrontare difficoltà ed incertezze rilevanti, ha richiesto l'assunzione di ipotesi semplificative con il supporto di esperti del settore [6]. Infine, per l'ultimo aspetto, la ricerca per ora si è limitata all'esame di un edificio tipo per il quale erano disponibili sufficienti informazioni in merito ai consumi energetici, alla tipologia costruttiva ed impiantistica, e sul quale validare il software di simulazione dinamica usato per gli obiettivi della ricerca.

2. Metodologia e fasi della ricerca

Al fine di individuare le relazioni tra consumi energetici e patrimonio edilizio realizzato nel periodo oggetto di studio, la ricerca è articolata nelle seguenti fasi conoscitive e propositive:

Fase conoscitiva

- o individuazione dell'area oggetto di studio ed acquisizione dei dati climatici base di partenza per la costruzione di anni climatici rappresentativi di possibili scenari futuri;
- o correlazioni tra dati climatici e consumi energetici storici del parco edilizio nel periodo di studio; desumibili su basi statistiche ISTAT;
- o generazione dei dati climatici futuri in diversi scenari per la simulazione termo-energetica degli edifici campione; laddove possibile, sarà sviluppato un approfondimento relativo alla stima degli effetti delle isole di calore urbane;
- o analisi del parco edilizio mediante individuazione delle tipologie edilizie, delle tecnologie costruttive e dei periodi di costruzione più ricorrenti e conseguente individuazione dei casi di studio, su cui eseguire simulazioni dinamiche dei cambiamenti climatici;
- o calibrazione del modello di calcolo, valutazione della sensibilità alle variazioni climatiche e valutazione dell'incertezza della stima.

Fase propositiva

- o simulazione termo-energetica, con i profili climatici futuri, dei casi di studio nella configurazione tecnologica attuale e calcolo dei valori assunti dai principali parametri e indicatori relativi al benessere termo-igrometrico e al fabbisogno energetico;
- o definizione di possibili strategie di riqualificazione energetica, selezionate in rapporto ai sottosistemi tecnologici coinvolti (edificio e impianto) e al livello prestazionale, per raggiungere le condizioni di benessere attese;
- o individuazione delle strategie di riqualificazione più promettenti, se possibile anche in relazione al rapporto costo-prestazioni e alle incentivazioni fiscali applicabili, ferma restando la difficoltà rilevante di previsioni future su fattori di costo estremamente aleatori quali quelli dei combustibili.

2.1. Generazione di un file climatico orario per la simulazione termo-energetica degli edifici con profili climatici futuri

Il software di simulazione Energy Plus impiega file climatici EPW che consistono nella descrizione di un anno tipo rappresentativo della climatologia di lungo periodo [7].

I file EPW presentano i valori orari di diversi parametri climatici utili ai fini delle simulazioni dinamiche fra cui:

- Temperatura a Bulbo Secco (°C);
- Temperatura di Rugiada (°C);
- Umidità Relativa (%);
- Irradiazione diretta normale (Wh/m²);
- Irradiazione diffusa sul piano orizzontale (Wh/m²);
- Velocità del vento (m/s).

Le simulazioni dinamiche dell'edificio campione sono state eseguite sulla base di tre anni climatici tipo: uno rappresentativo del clima attuale e due desunti da quest'ultimo, con apposite elaborazioni, rappresentativi di possibili scenari climatici futuri incentrati sui periodi 2036-55 e 2056-75, caratterizzati da emissioni climalteranti che determinano una concentrazione di gas serra in crescita anche oltre il 2100 (Representative Concentration Pathway, RCP 8,5) [8]. La scelta degli anni tipo rappresentativi dei cambiamenti climatici con modalità *estreme* è determinata dalla necessità di *forzare* i risultati dell'analisi al fine di evidenziare eventuali criticità delle azioni progettuali o delle risposte a interventi di riqualificazione energetica ed impiantistica.

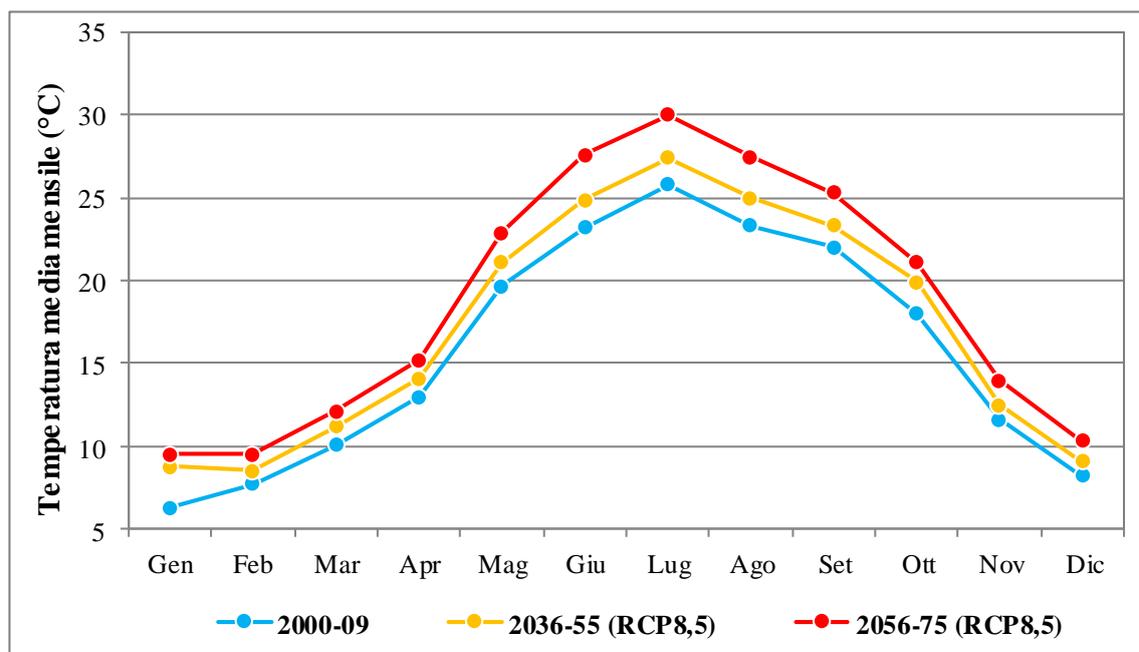
L'anno tipo attuale è stato elaborato dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) [9] sulla base dei dati climatici rilevati fra il 2000 e il 2009 presso la stazione meteorologica "Firenze Centro" del Servizio Agrometeorologico della Regione Toscana. Le elaborazioni degli anni tipo futuri, comprensive dei valori orari di irradiazione diretta normale e irradiazione diffusa sul piano orizzontale, sono state fatte in via sperimentale mediante appositi algoritmi, sulla base delle differenze medie mensili presente-futuro previste da modelli regionali di simulazione climatica [10] [11]. Sono in corso approfondimenti sia sulla costruzione di altri scenari di cambiamento climatico, sia sulla possibilità di ottenere dati più accurati sia a livello temporale che spaziale.

Viceversa, i valori orari futuri dei parametri climatici per i quali non sono disponibili previsioni, come ad esempio l'umidità relativa o la velocità del vento, sono stati lasciati invariati rispetto ai valori attuali [12].

Nella Figura 1 sono riportati i valori medi mensili della temperatura a bulbo secco per i tre anni tipo utilizzati in questa fase preliminare dello studio: si evidenzia come le differenze di temperatura media mensile fra l'anno tipo attuale e l'anno tipo del periodo 2036-55 oscillino da un minimo di 0,8°C per il mese di Febbraio ad un massimo di 2,5°C per Gennaio; per quanto riguarda il periodo 2056-75 si possono rilevare differenze che variano da un minimo di 1,8°C in Febbraio ad un massimo di 4,4°C in Giugno.

Ai fini dell'utilizzo dei dati climatici, è necessario anche considerare possibili effetti *isola di calore* che sono insiti nelle rilevazioni eseguite in stazioni metereologiche poste in aree urbane densamente abitate piuttosto che in aree periferiche: ad esempio, i dati della stazione Firenze Centro [13] presentano valori maggiori di 1,5°C nel periodo invernale e valori maggiori di 0,6°C nel periodo estivo rispetto a quelli rilevati nella stazione metereologica dell'Aeronautica Militare presso l'aeroporto Firenze Peretola (cod. WMO 161700) [14] collocato all'estrema periferia Nord-Est della città.

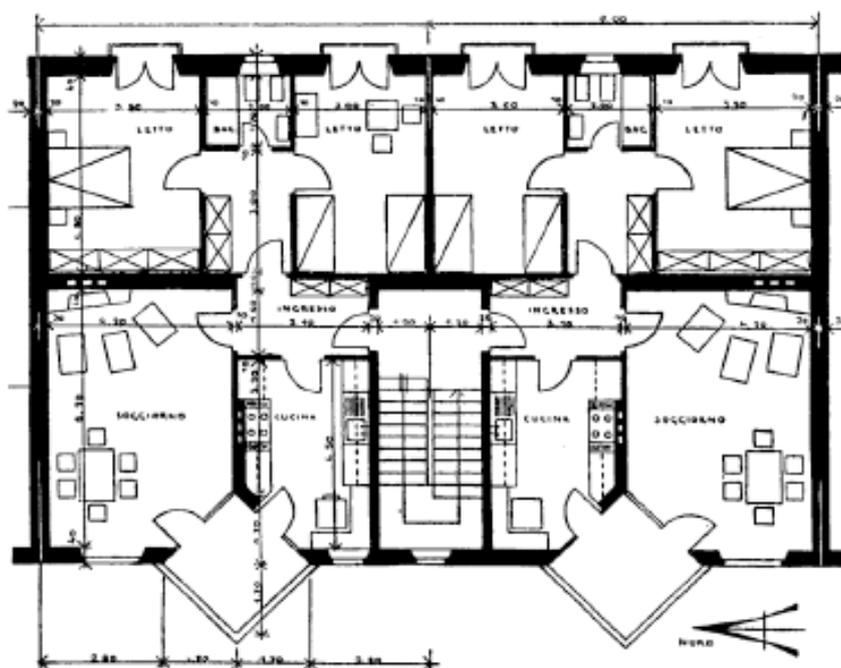
Figura 1. Valori medi mensili della temperatura per l'anno climatico tipo attuale e per i due anni climatici tipo futuri [6].



2.2. Il parco residenziale pubblico della città di Firenze: indicazioni per l'individuazione dei casi di studio

In via preliminare lo studio per l'individuazione di tipologie tipo che possano nel proseguo della ricerca diventare casi di studio si è avvalso della collaborazione dell'Ente CASA SpA, che ha in gestione il patrimonio pubblico dell'ex Istituto Autonomo per Case Popolari - IACP, di 33 Comuni della Provincia di Firenze [15], con un parco edilizio costituito da 12259 alloggi abitati da circa 29000 inquilini (superficie netta media ad alloggio di 67 m² ed una composizione media dei nuclei familiari di 2,49 persone). Il parco edilizio è costituito da interventi che datano dalla costituzione dell'Istituto avvenuta nel 1909, fino ai giorni nostri. In particolare è interessante rilevare come dal punto di vista tipologico si sia andata affermando una sostanziale uniformità, riscontrabile anche negli interventi più recenti [16], retaggio delle normative sugli standard residenziali, dimensionali ed igienico-sanitari, emanate in attuazione delle disposizioni di legge finalizzate alla edificazioni di case economiche e popolari.

Una certa uniformità tipologica era poi insita nel piano INA-Casa, nel quale una guida e un coordinamento della progettazione avveniva anche attraverso i 'manualetti tecnici' pubblicati dall'istituto (in tutto 4 nel periodo del piano); fascicoli che raccoglievano raccomandazioni, orientamenti, schemi, esempi, nel tentativo di attribuire a tutti gli interventi una minima qualità tecnologica, architettonica e urbana piuttosto che per codificare la progettazione di alloggi, edifici, nuclei e quartieri. In Figura 2 è riportato un esempio di alloggio tipo INA-Casa in cui si possono notare gli affacci contrapposti per la ventilazione trasversale, la presenza di corridoi per la separazione netta della zona giorno dalla zona notte e le logge.

Figura 2. Esempio di alloggio tipo mutuato dai manuali tecnici INA-Casa – Fascicolo 3 (1957-1963).

Gli esempi forniti, infatti, venivano proposti non come norma da applicare, ma come modelli da interpretare e rielaborare, seguendo le esigenze e le condizioni dei diversi contesti locali.

Dopo quattordici anni di attività, con l'approvazione della L. 14 febbraio 1963 n. 60 "Liquidazione del patrimonio edilizio della Gestione INA-Casa e istituzione di un programma decennale di costruzione di alloggi per lavoratori", l'esperienza suddetta si chiuse definitivamente sostituita dalla nascita della GESCAL – Gestione Case per i Lavoratori, e da altre norme e altri strumenti per la programmazione, il finanziamento e la costruzione di edilizia sociale (quali la legge n. 167 dell'aprile 1962, che promosse piani comunali per l'edilizia economica e popolare).

Tuttavia sia la Circolare del Min. LL.PP. 29 Gennaio 1967, n.425 che le leggi 166/1975 e 513/1978, non hanno mutato il quadro tecnico-normativo circa gli standard idonei per l'applicazione della legge 167/1962. Tali standard sono stati fissati dalla legge 14.02.1963, n.60, che istituiva la GESCAL, ma che a sua volta recepiva e integrava le norme tecniche emanate anteriormente in applicazione del testo unico 28.04.1938, n.1165 e della legge 02.07.1949, n.408 e successive integrazioni e modificazioni.

Gli standard iniziali INA-Casa (1949-56) fissavano la dotazione superficiale minima degli alloggi a 30-40 m² con 1-2 vani utili fino a 90 m² con 4-5 vani utili, portati nel secondo periodo (1956-63) a valori superiori di superficie ed infine definiti dalle norme GESCAL a superfici maggiori variabili da 64 a 112 m² per alloggi costituiti da due a cinque vani utili oltre i servizi; sono altresì indicate le altezze, la ventilazione trasversale e l'illuminazione e le modalità di aggregazione, con distinzione tra zona notte e zona giorno, e distribuzione in altezza da due a quattro piani, disimpegnati da scale con pianerottoli su cui si affacciano da due a quattro ingressi a seconda anche della tipologia (in linea con o senza soluzioni d'angolo e a torre).

I fabbricati in condominio prevalgono poi nettamente sulle costruzioni a schiera soprattutto per motivi economici, dato che i destinatari degli alloggi rappresentavano gli strati sociali meno abbienti.

Occorre anche ricordare che per gli aspetti igienico sanitari si deve attendere il Decreto del Ministero della Sanità 05.07.1975 (Gazzetta Ufficiale 18 luglio 1975, n. 190) per avere le

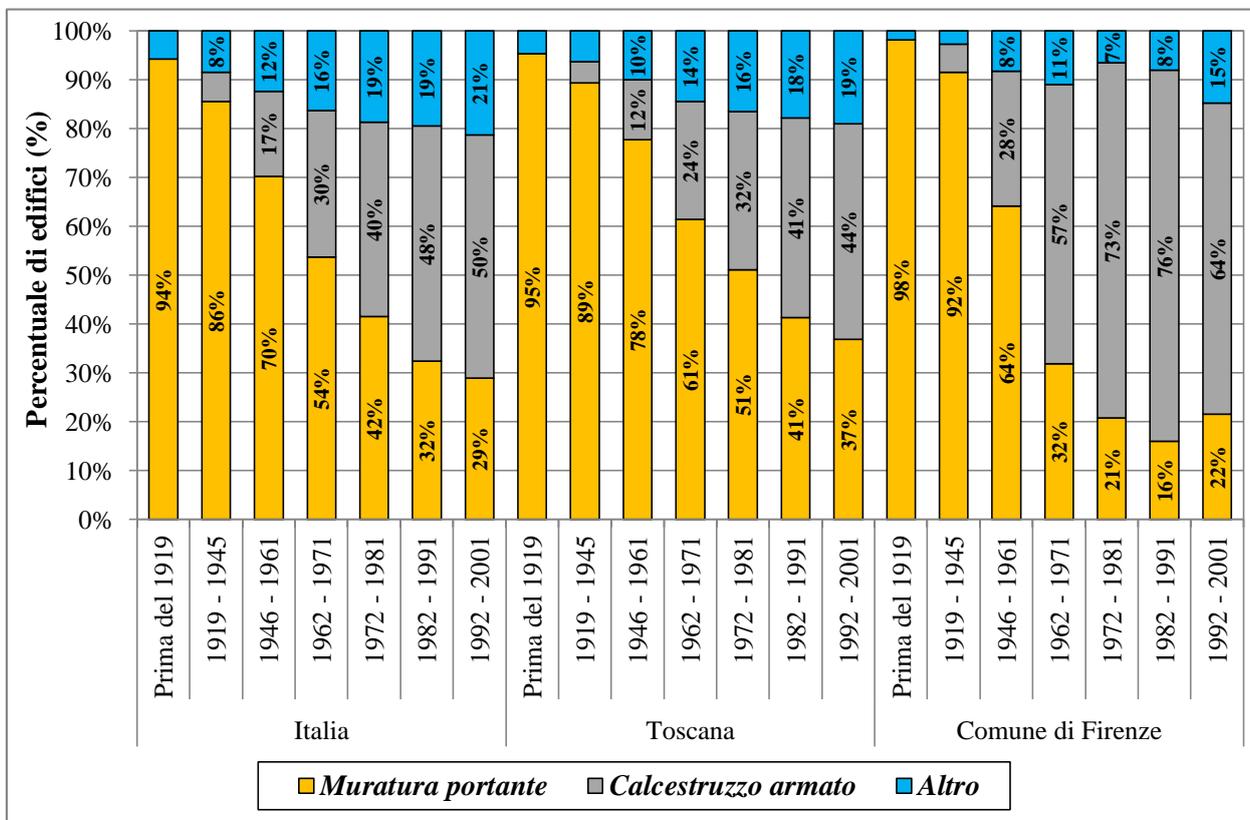
Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali d'abitazione.

Dal punto di vista tecnologico, fatta eccezione per limitati ed episodici interventi con soluzioni prefabbricate pesanti utilizzando pannelli in calcestruzzo armato, si possono individuare sei modalità costruttive rappresentative delle costruzioni dagli anni '20 agli anni '80 [15]: rispettivamente muratura mista in pietrame e mattoni, strutture intelaiate in calcestruzzo armato con tamponamenti in muratura a cassetta intonacate e a faccia vista, in muratura a cassetta con isolante interposto nell'intercapedine, con pannelli in calcestruzzo armato isolati internamente e con doppio isolamento a cappotto.

In pratica le soluzioni costruttive suddette hanno segnato fino ad oggi e, in assenza di riqualificazione, anche il futuro andamento dei consumi energetici, tenuto conto che l'entrata in vigore della prima legge nazionale mirante a ridurre i consumi invernali risale al 1976.

La Figura 3 mostra che le costruzioni con struttura portante in calcestruzzo armato cominciano ad affacciarsi nel dopoguerra (per Firenze percentuale del 28% dal 1946 al 1961) per divenire preponderanti nei decenni successivi (per Firenze con quote intorno al 70%).

Figura 3. Distribuzione di frequenza percentuale degli edifici residenziali per tipologia costruttiva, suddivisi per epoca di costruzione. Ripartizione territoriale: Italia, Toscana, Provincia e Comune di Firenze. (Fonte dei dati: Istat – Censimento della popolazione e delle abitazioni 2001).



Tuttavia, se analizziamo i dati ISTAT relativi agli edifici residenziali del Comune di Firenze suddivisi per epoca di costruzione (Figura 4) vediamo anche che l'incidenza complessiva delle costruzioni in calcestruzzo armato, è marginale rispetto al patrimonio edilizio esistente.

In merito ai dati dimensionali tipologici, le informazioni di CASA SpA confermano i dati ISTAT (Figura 5) dove il maggior numero di unità immobiliari in assoluto è rappresentato da alloggi con superfici comprese tra 60 e 99 m².

Figura 4. Numero di edifici residenziali per epoca di costruzione. Ripartizione territoriale: Comune di Firenze. (Fonte dei dati: Istat – Censimenti della popolazione e delle abitazioni 2001 e 2011).

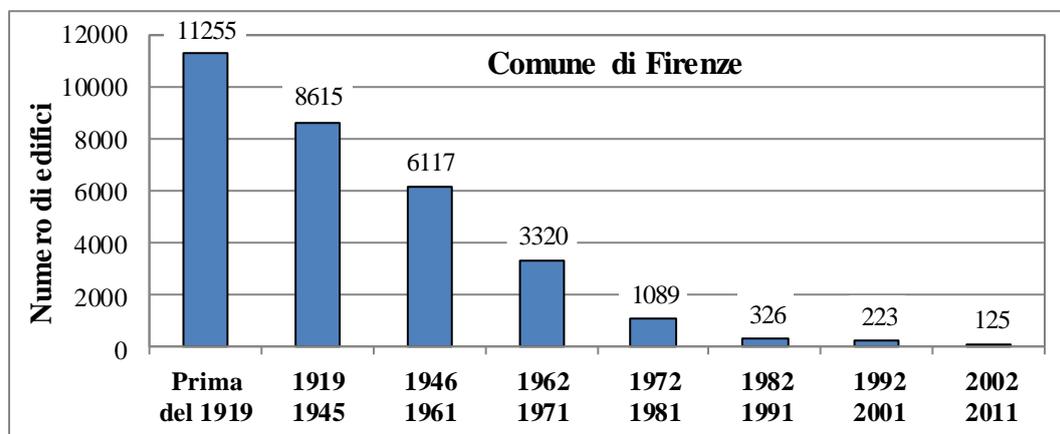
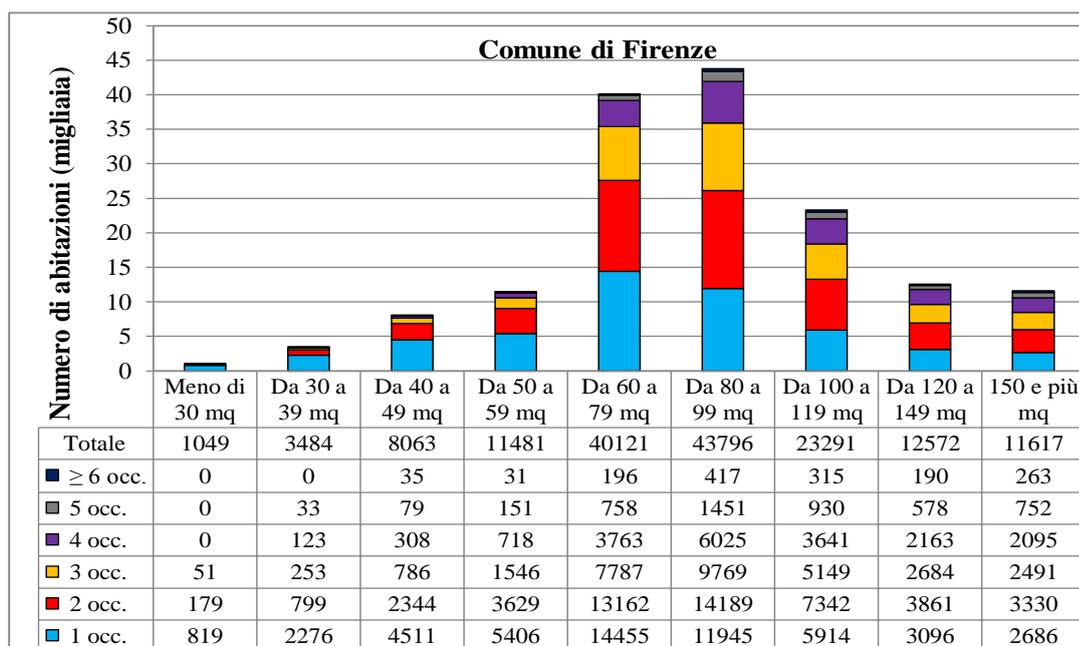


Figure 5. Abitazioni occupate da persone residenti per classe di superficie e numero di occupanti. Ripartizione territoriale: Comune di Firenze. (Fonte dei dati: Istat – Censimento della popolazione e delle abitazioni 2001).



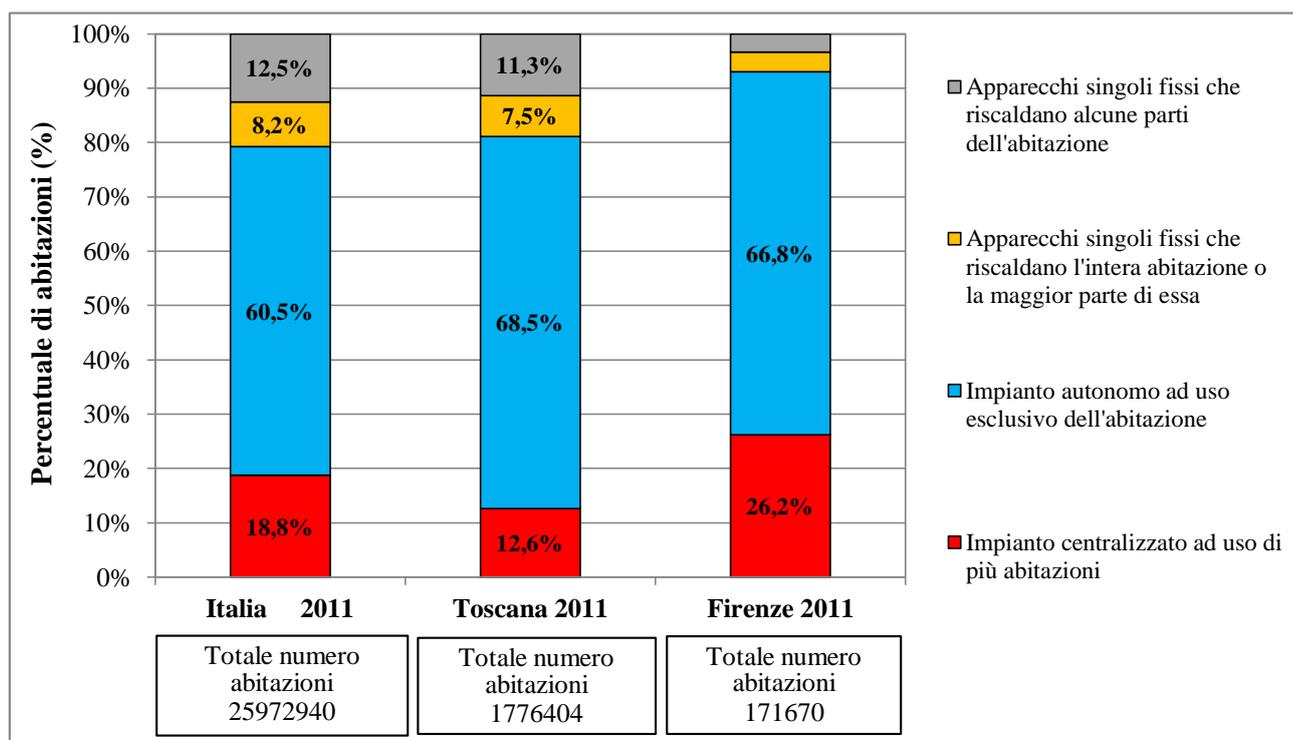
Nell'ultimo ventennio le abitazioni realizzate si sono adattate ai mutamenti sociali che hanno visto una costante contrazione dei nuclei familiari più numerosi, fino ad avere sul mercato l'offerta, divenuta pressoché standard, di abitazioni formate da un unico vano costituente l'ingresso cucina-soggiorno, con camera e cameretta oltre servizi riconducibili grosso modo alla superficie minima delle norme

GESCAL. Il parco edilizio di CASA SpA vede nettamente al primo posto nuclei familiari con 2 persone, seguiti da quelli con una sola persona e tre persone, coerentemente ai dati ISTAT per Firenze di Figura 5.

Nella Figura 6 è rappresentata la situazione al 2011 a livello nazionale, regionale e comunale delle dotazioni impiantistiche suddivise per tipologia di utilizzazione, dalla quale si evince che l'impianto autonomo domina la scena in tutti e tre gli scenari. A Firenze inoltre si nota una notevole presenza di impianti centralizzati, superiore alla media nazionale (26,2% contro il 18,8%). Gli apparecchi singoli fissi (ad esempio, i caminetti, i radiatori individuali a gas, le pompe di calore, le piastre elettriche, le stufe a carbone, a legna, a kerosene, a GPL) sono presenti in una piccola percentuale di abitazioni. Stesse considerazioni valgono per il tipo di combustibile utilizzato, dove il gas metano domina su tutte le altre fonti energetiche con oltre il 90% degli impianti serviti (Figura 7).

In merito alle dotazioni impiantistiche, preme ricordare che il piano INA-CASA, , ha visto la realizzazione di circa 355000 alloggi, inizialmente dotati di stufe a legna per riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria, poi prodotta mediante boiler elettrici. Molti di questi alloggi furono poi dotati negli anni della metanizzazione del territorio da impianti di riscaldamento a gas metano autonomi con terminali a radiatori.

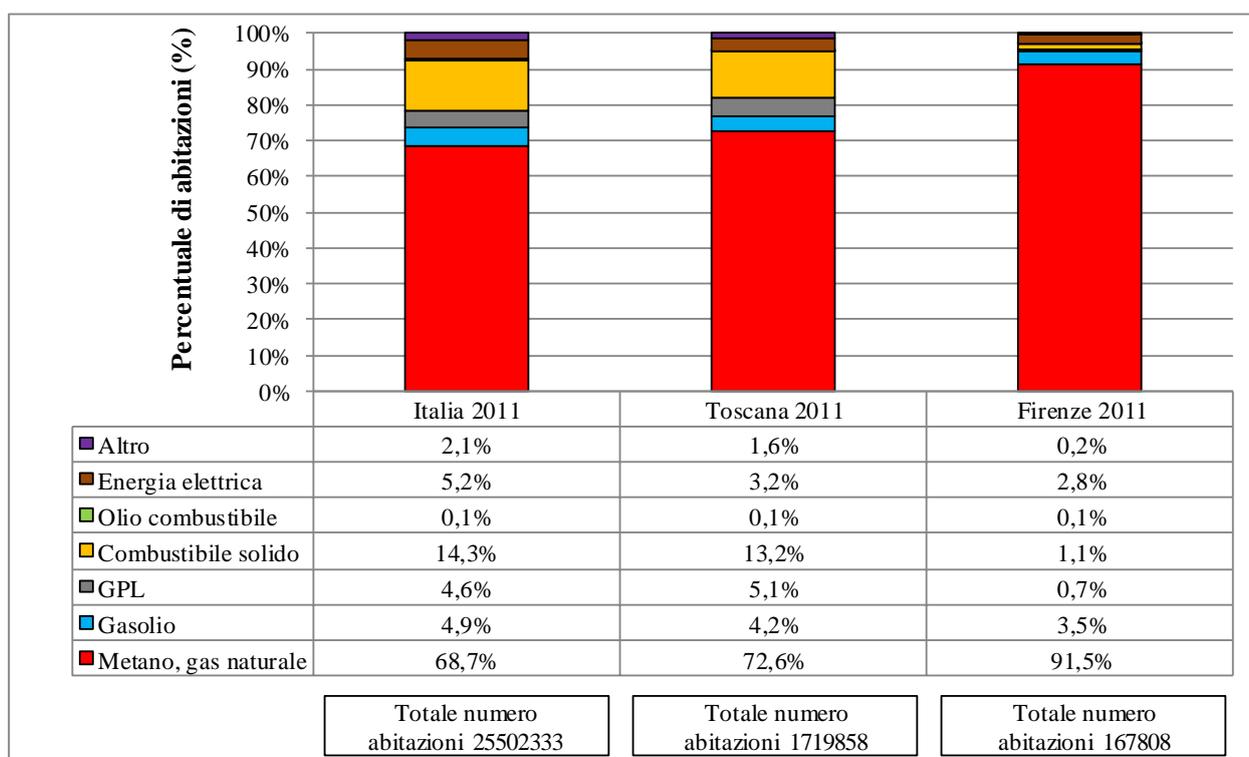
Figura 6. Distribuzione di frequenza delle abitazioni occupate da persone residenti per tipologia di impianto di riscaldamento. Ripartizione territoriale: Italia, Toscana, Comune di Firenze. (Fonte dei dati: Istat – Censimenti della popolazione e delle abitazioni 2001 e 2011).



Dal punto di vista dell'involucro le maggiori modificazioni furono nel tempo la sostituzione dei serramenti con doppi vetri e telaio in alluminio (a partire dalla seconda metà degli anni '70) e la chiusura delle logge con serramenti, di fatto realizzando per quelle esposte verso sud le prime serre solari vernacolari.

Per quanto precede è possibile indirizzare la ricerca dei casi studio agli edifici condominiali, costruiti nel dopoguerra con tecniche costruttive dalla muratura portante al calcestruzzo armato con diverse soluzioni di tamponamento, con dimensioni degli alloggi variabili da due a tre stanze oltre i servizi, e con impianti di climatizzazione alimentati a gas metano, dei quali si conoscono i consumi energetici. Nel paragrafo successivo si illustra il caso di studio sperimentale, coerente con le indicazioni tipologiche ed impiantistiche suddette, selezionato per la messa a punto della metodologia.

Figura 7. Distribuzione di frequenza delle abitazioni occupate da persone residenti per tipo di combustibile che alimenta l'impianto di riscaldamento. Ripartizione territoriale: Italia, Toscana, Comune di Firenze. (Fonte dei dati: Istat - Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011).



2.3. Descrizione e diagnosi energetica del caso di studio e taratura del modello di calcolo

Il caso di studio presenta caratteristiche tipologiche, costruttive ed impiantistiche che lo rendono omogeneo e facilmente inquadrabile all'interno delle varietà edilizie presenti nel patrimonio di edilizia residenziale pubblica a cui la presente ricerca fa riferimento.

Tabella 1. Principali parametri geometrici dell'edificio.

Superficie calpestabile riscaldata (Af)	2236,4 m ²
Volume netto riscaldato (Vn)	6707,3 m ³
Superficie disperdente verso l'esterno o verso ambienti non riscaldati (S)	2886,5 m ²
Volume lordo riscaldato (V)	8529,3 m ³
Rapporto di forma (S/V)	0,34

Esso è costituito da un condominio di 8 piani fuori terra costruito nel 1959, che nel corso degli anni non ha subito interventi di riqualificazione energetica significativi. Il piano terra è occupato da attività commerciali mentre il piano interrato è destinato ad autorimessa. Nella Tabella 1 sono riportati i valori dei principali parametri geometrici dell'edificio e nella Figura 8 le immagini relative all'edificio reale e al modello geometrico utilizzato per la simulazione dinamica. Dal punto di vista tipologico e distributivo il vano scala è collocato in posizione centrale e dà accesso a 3 alloggi per piano (Figura 9) con l'eccezione degli ultimi due piani caratterizzati dalla presenza di 2 alloggi per ciascun piano. Gli appartamenti hanno dimensione variabile fra 103 m² e 117 m² e sono generalmente composti da 3 vani (soggiorno e 2 camere) più servizi.

Figura 8. Immagine della facciata sud dell'edificio (A) e immagine del modello di simulazione (B).

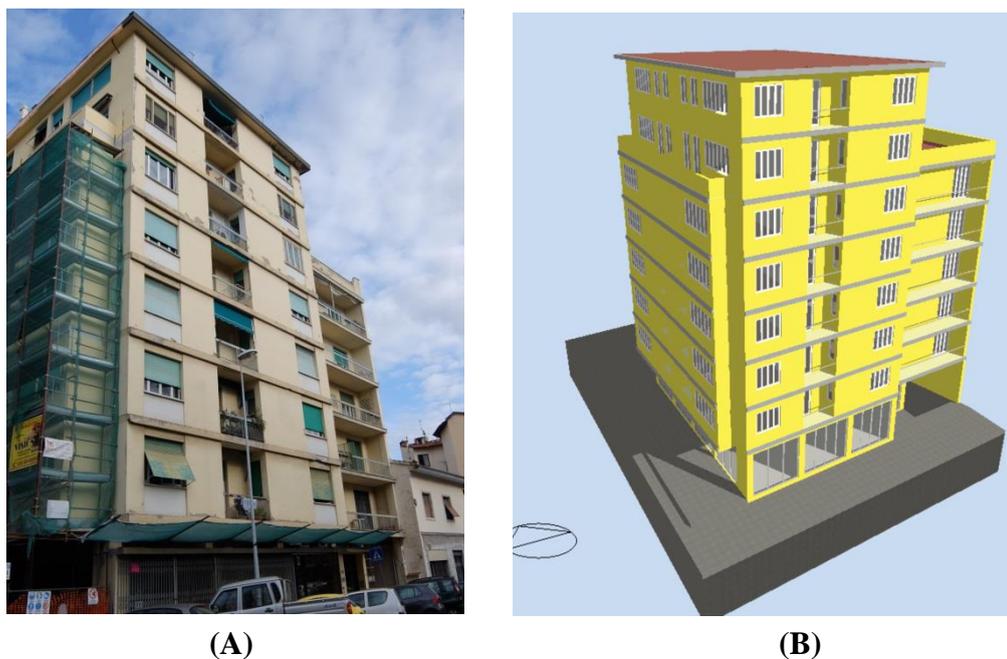
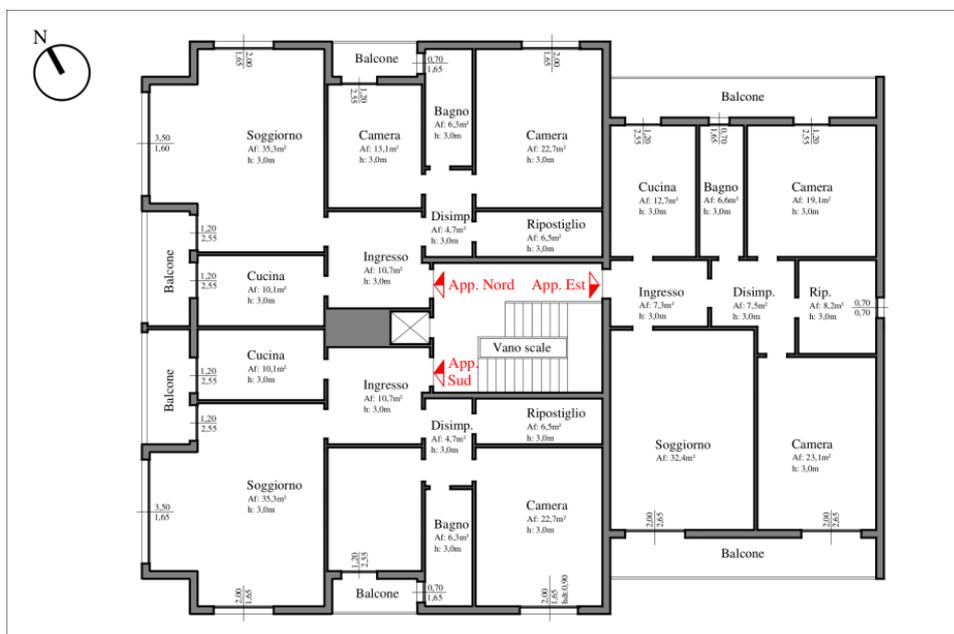


Figura 9. Planimetria del piano tipo.



L'edificio presenta una struttura portante in pilastri e travi in calcestruzzo armato con tamponamenti esterni in muratura non isolata e solai interpiano e di copertura di tipo latero-cementizio. In Tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche termofisiche delle strutture disperdenti. La definizione di tali caratteristiche si è basata sui documenti di progetto e sul rilievo visivo e si è avvalsa, per quanto riguarda l'individuazione delle tipologie costruttive più diffuse nel periodo di costruzione, del supporto dell'abaco delle tipologie costruttive dal Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana del Progetto TABULA [17]. Le norme UNI/TR 11552:2014 [18] e UNI/TS 11300-1:2014 [19] sono state impiegate per la caratterizzazione stratigrafica e termofisica dei componenti opachi e trasparenti.

Tabella 2. Principali caratteristiche termofisiche delle strutture disperdenti.

Elemento opaco	Descrizione	Spessore s (m)		Trasmittanza U (W/m²K)
Parte esterna	Muratura a cassa vuota in laterizio forato intonacata	0,26		1,10
Copertura	Solaio in latero-cemento, strato di pendenza, guaina bituminosa e finitura calpestabile	0,28		1,73
Chiusura inferiore	Solaio in latero-cemento, massetto e pavimentazione in ricomposti lapidei	0,28		1,73
Cassonetti	Cassonetti non isolati	-		6,0
Elemento trasparente	Descrizione	Fattore solare g(-)	Fattore di trasmissione luminosa τ_v (-)	Trasmittanza U_w (W/m²K)
Finestre e portefinestre	Telaio in legno tenero spessore 50 mm e vetro chiaro singolo	0,85	0,85	5,0

L'impianto di riscaldamento presenta caratteristiche tipiche dei sistemi centralizzati costruiti nel secondo dopoguerra: il sistema di generazione è costituito da una caldaia standard con bruciatore ad aria soffiata alimentato a gas metano; il sistema di distribuzione è caratterizzato da una rete a colonne montanti verticali con anello di collegamento posizionato nei locali non riscaldati posti al piano interrato; il sistema di regolazione non prevede dispositivi nei singoli appartamenti ma è costituito esclusivamente da un sistema centralizzato di regolazione climatica mediante compensazione con sonda esterna. I terminali di emissione sono radiatori in ghisa perlopiù installati su pareti esterne. L'acqua calda sanitaria viene prodotta individualmente mediante bollitori elettrici ad accumulo.

L'edificio non è provvisto di un impianto centralizzato per la climatizzazione estiva che è affidata a impianti autonomi ad espansione diretta, tipo split o multi-split, installati nel corso degli anni in tutti gli appartamenti. Le potenze dei terminali degli impianti di climatizzazione invernali ed estiva sono stati determinati mediante rilievo sull'edificio.

La metodologia della ricerca prevede una prima fase con l'obiettivo della taratura del modello di calcolo e della valutazione dei fabbisogni energetici attuali dell'edificio e del livello di comfort termico. Mediante il codice di calcolo in regime dinamico Energy Plus è stata effettuata una valutazione termo-energetica "adattata all'utenza" (*tailored rating*) in cui i profili di occupazione, i tassi di ventilazione, i periodi di accensione degli impianti di climatizzazione e le relative temperature di regolazione sono stati desunti sulla base dei dati forniti dal terzo responsabile della centrale termica e dei risultati dei sondaggi svolti fra i condomini.

In via preliminare, le metodologie di calcolo adottate per la stima delle perdite di energia riferibili ai sub-sistemi impiantistici sono quelle semplificate individuate dalle norme UNI/TS 11300-2:2014 [20] e UNI/TS 11300-3:2013[21]; a tal fine i valori dei rendimenti sono stati desunti dal Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana del Progetto TABULA in relazione alla tipologia impiantistica realmente presente nell'edificio e alla sua epoca di costruzione.

Nella Tabella 3 sono riportati i risultati della valutazione energetica dell'edificio campione, in termini di fabbisogni di combustibile e di energia primaria suddivisi per servizio e vettore energetico.

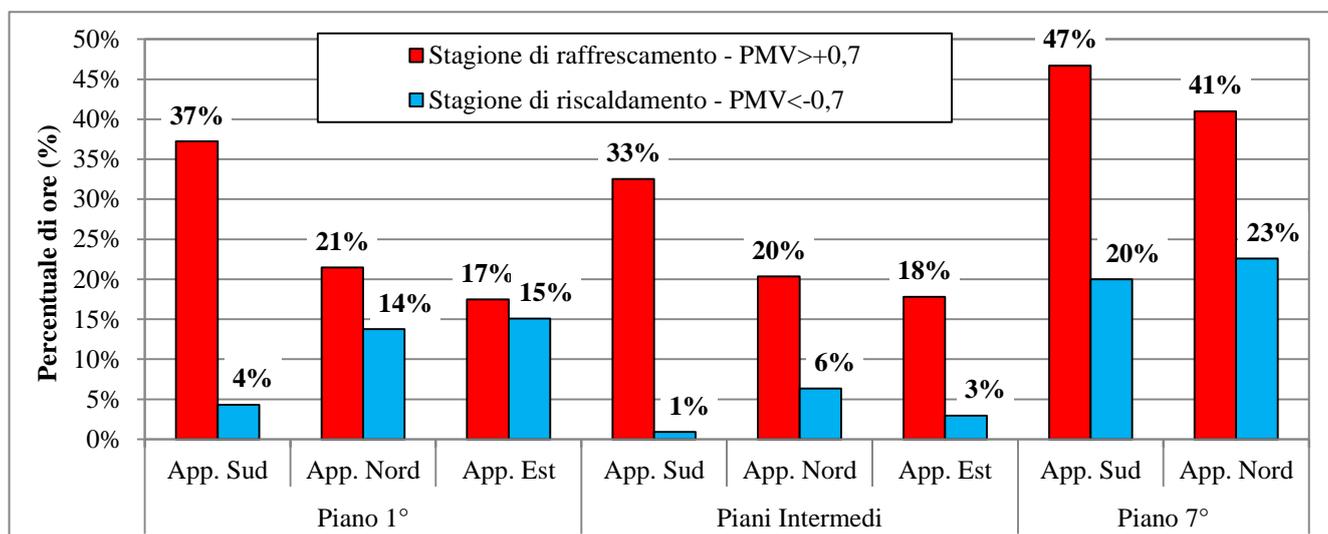
Tabella 3. Principali risultati della valutazione energetica “adattata all’utenza”.

Servizio	Fabbisogno di combustibile		Fabbisogno di energia primaria (E_p)	
Riscaldamento	Gas metano	75,4 kWh/(m ² a)	81,1 kWh/(m²a)	51%
	Energia elettrica	2,6 kWh/(m ² a)		
Raffrescamento	Energia elettrica	14,9 kWh/(m ² a)	32,4 kWh/(m²a)	20%
Acqua calda sanitaria	Energia elettrica	21,2 kWh/(m ² a)	46,1 kWh/(m²a)	29%

Il confronto tra consumi reali rilevati nel periodo 2010 – 2014, pari a 186112 kWh/a¹ corrispondenti ad un consumo medio specifico per unità di superficie netta calpestabile di 83,3 kWh/(m²a), e consumi calcolati determina uno scostamento pari a circa il 9%. Tale valore permette di ritenere il modello elaborato adeguatamente preciso limitatamente al caso di studio ed incoraggiante rispetto all’obiettivo di fornire risultati preliminari utili per lo sviluppo metodologico della ricerca.

L’analisi è stata accompagnata anche dalla valutazione delle condizioni di sensazione termica globale degli alloggi, effettuata mediante la simulazione stagionale dei valori orari dell’indice PMV (Predicted Mean Vote) e la valutazione della percentuale di ore, rispetto alla stagione di riscaldamento e di raffrescamento, in cui l’indice assume valori esterni all’intervallo +0,7/-0,7; tale intervallo di accettabilità della sensazione termica è stato riferito ad un livello di aspettativa moderato (cat. III) e pertanto applicabile agli edifici esistenti [22].

Figura 10. Percentuale di ore della stagione di riscaldamento con PMV<-0,7e percentuale di ore della stagione di raffrescamento con PMV>+0,7, per alcuni appartamenti significativi.



¹ Potere calorifico inferiore del combustibile pari a 9,94 kWh/Nm³ (Fonte: UNI/TS 11300-2:2014)

Da questa analisi, sintetizzata nella Figura 10, emerge come in regime invernale solo alcuni appartamenti, caratterizzati da una migliore collocazione (piani intermedi) ed un orientamento più favorevole (Sud) registrino condizioni di sensazione termica globale accettabile (minore del 5%) [22]. In regime estivo, al contrario, nessuno degli appartamenti dell'edificio presenta condizioni di accettabilità, ed in particolare gli appartamenti dell'ultimo piano e/o esposti a Sud.

Una volta validato il modello, questo è stato utilizzato depurando dal calcolo le caratteristiche e le condizioni al contorno proprie dell'utenza e del sistema impiantistico reale, con la finalità di valutare, in diversi scenari climatici futuri, la capacità del solo involucro edilizio di fornire condizioni di benessere termico, fatte salve le condizioni di ventilazioni ritenute ottimali pari a 0,3 vol/h. A tal fine il sistema impiantistico reale è stato sostituito con un sistema impiantistico ideale² con rendimento unitario e i profili di utenza sono stati standardizzati. La Tabella 4 sintetizza le principali condizioni al contorno utilizzate per la simulazione.

Tabella 4. Dati relativi alle condizioni al contorno impiegate nella simulazione.

Apporti interni (valori medi giornalieri)	Zona giorno: 9,0 W/m ² ; Zona notte: 3,0 W/m ² (UNI/TS11300-1:2014)
Periodo riscaldamento/raffrescamento	Illimitato
Orario riscaldamento/raffrescamento	24 h
Temp. di regolazione risc./raff.	20°C/26°C (θ_o - Temperatura operativa,)
Tasso di ventilazione naturale	0,3 h ⁻¹ costante su 24 h sia estivo che invernale
Schermature estive	Tende interne bianche ($\tau_e=0,7$; $\rho_e=0,15$ da UNI/TS 11300-1:2014) chiuse quando l'irradianza totale incidente sulla finestra $I_{sol} > 300 \text{ W/m}^2$

3. Risultati e discussione

Nelle Figure 11, 12 e 13 sono mostrati i risultati delle simulazioni del caso di studio in regime invernale ed estivo con l'assunzione dell'ipotesi di mantenere condizioni di comfort sintetizzate dalla temperatura operativa mantenuta costante sull'intero arco delle 24h (20°C in inverno e 26°C in estate).

Le simulazioni, per l'edificio in esame, devono essere interpretate in termini di tendenza del comportamento e del ruolo giocato nel bilancio termico del sistema dai vari componenti opachi e trasparenti; per una maggiore affidabilità, considerata la limitatezza dell'indagine svolta, l'analisi sarà estesa ad altri casi di studio, e tuttavia si possono avanzare alcune osservazioni preliminari:

- il bilancio energetico a livello annuale vede il progressivo spostamento dei maggiori consumi in regime estivo in misura tale che potrebbe non essere compensato dalle condizioni invernali più favorevoli;
- in regime invernale, anche a fronte del previsto riscaldamento climatico, l'intervento di riduzione delle dispersioni dalle pareti ma soprattutto dai serramenti, risulta strategico, considerando anche l'importanza fondamentale di questi ultimi per il controllo degli apporti in regime estivo (Figura 13);
- risulta da approfondire il ruolo giocato dalla ventilazione e dalle pareti e serramenti che allo stato attuale contribuiscono al raffrescamento passivo dell'edificio, ma che invece nel periodo 2056-76 finiscono per avere solo effetti negativi;

² E' stato utilizzato l'oggetto *ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem* di Energy Plus [23]

- in regime estivo gli apporti solari dominano il bilancio energetico; da qui l'utilità di schermature fisse o mobili e/o l'uso di vetri a basso fattore solare.

Figura 11. Fabbisogno di energia termica utile annuale in funzione dei mutamenti climatici.

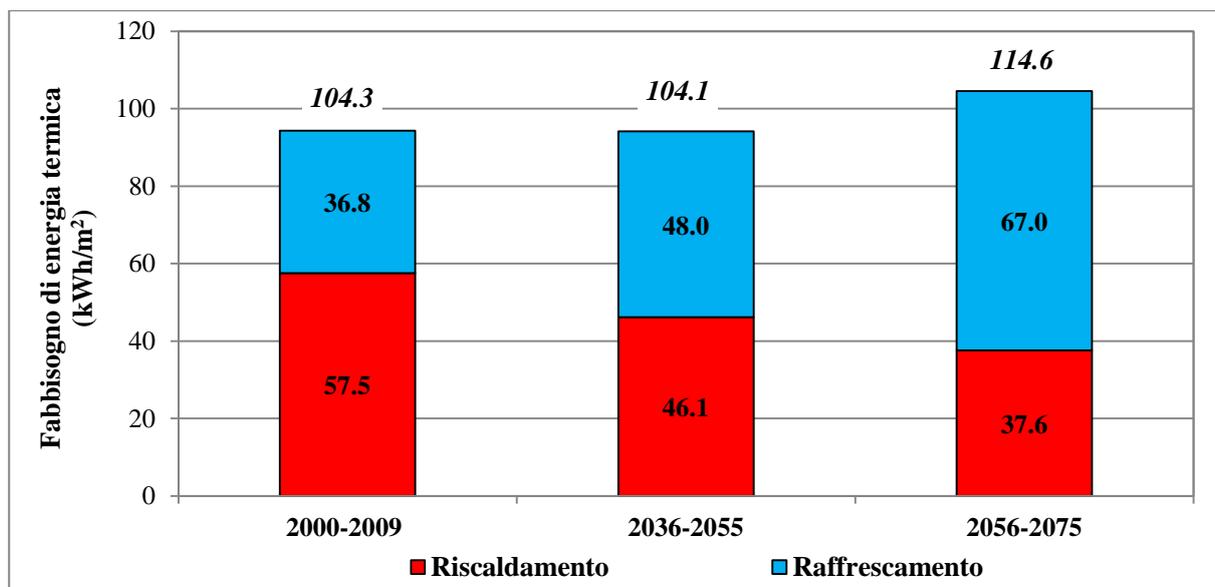
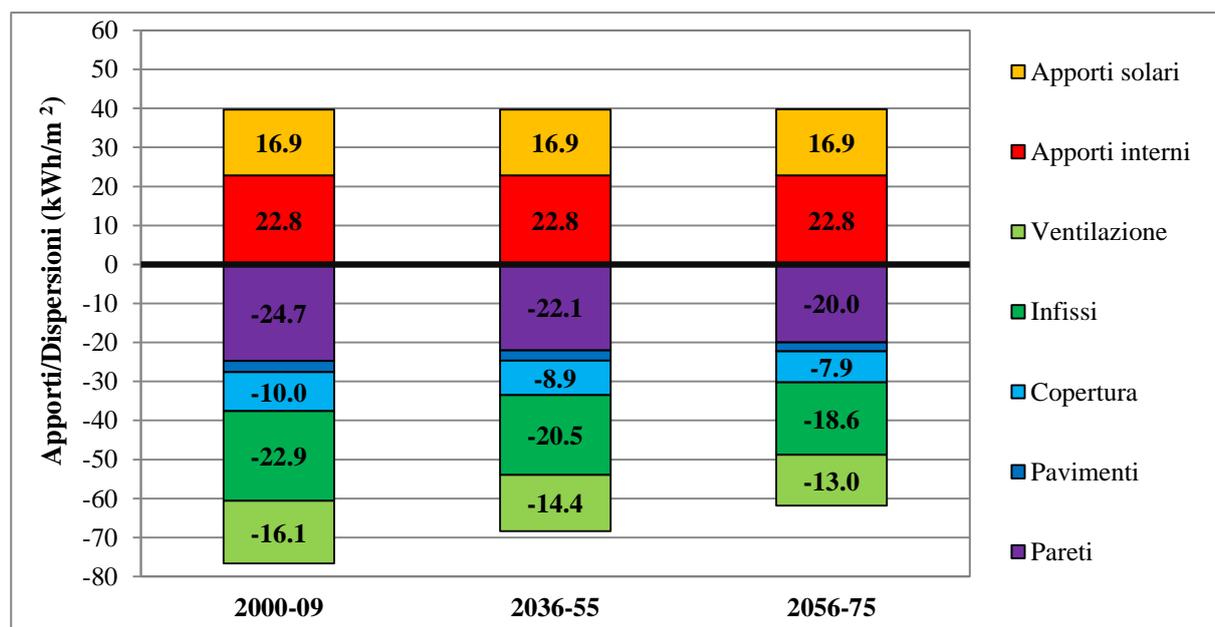


Figura 12. Bilancio energetico invernale dell'involucro edilizio in funzione dei mutamenti climatici.

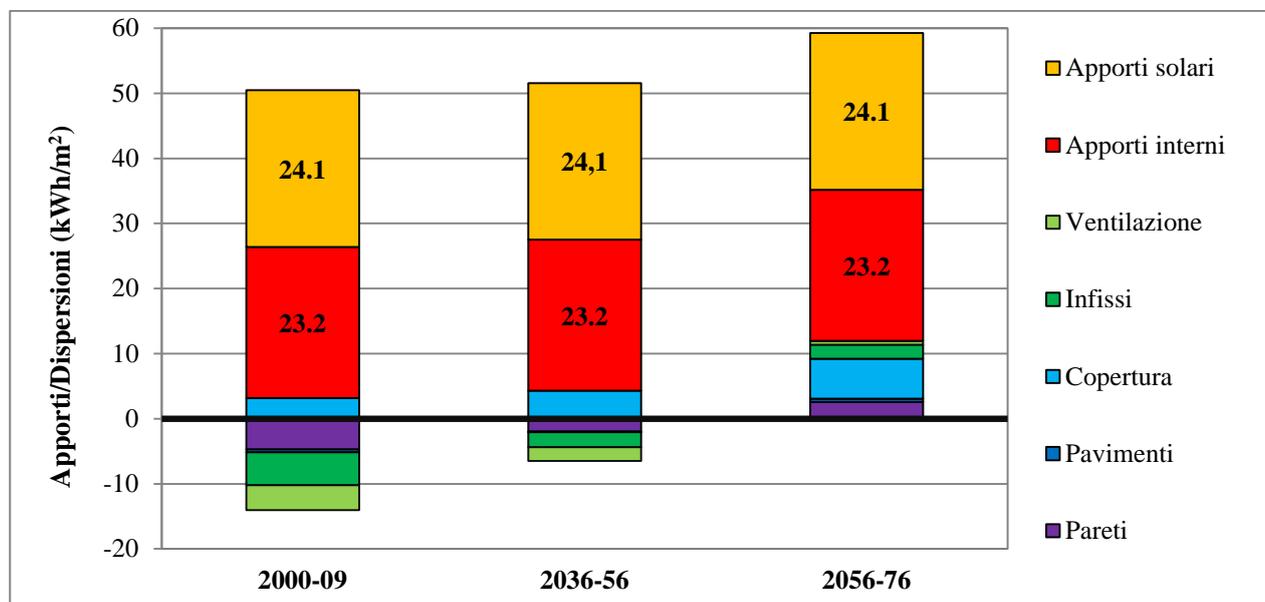


In breve, da questi primi risultati, emerge la necessità e l'utilità di investigare gli effetti dei mutamenti climatici sul bilancio energetico degli edifici al fine di individuare in maniera informata e consapevole interventi di riqualificazione e strategie di progettazione efficaci ai fini del contenimento delle emissioni e del comfort termico.

Altro aspetto fondamentale che emerge è la scelta di soluzioni, per la riqualificazione degli edifici esistenti e la progettazione di nuovi edifici, in grado di mantenere nel tempo le prestazioni attese a fronte delle tendenze climatiche illustrate: su questo aspetto ha una notevole influenza sia il

decadimento prestazionale dell'intervento stesso che il comportamento dell'utenza. Da questo punto di vista può essere strategico scegliere soluzioni, come ad esempio schermature mobili o meccanismi manuali di ventilazione, sui quali l'utente agisce adattandone le prestazioni alle specifiche condizioni climatiche.

Figura 13. Bilancio energetico estivo dell'involucro edilizio in funzione dei mutamenti climatici.



Quando si esaminano scenari di intervento su lunghi periodi emergono poi altre questioni, al momento di complessa e incerta valutazione, quali:

- evoluzione del costo dell'energia per la valutazione del tempo di ritorno o l'ammortamento di alternative progettuali; da qui l'importanza di affidarsi pressoché totalmente a fonti di energia rinnovabili;
- l'evoluzione tecnologica del sottosistema impianti anch'esso fortemente orientato/condizionato dall'uso di energie rinnovabili.

4. Conclusioni

Sono stati illustrati strumenti e metodi di una ricerca avente l'obiettivo di valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sui consumi energetici degli edifici in un arco temporale dal 2036 al 2075, per il quale sono disponibili dati sufficientemente consolidati, e riconducibili essenzialmente ad un progressivo innalzamento della temperatura.

L'area di ricerca climatica al momento è stata limitata alla provincia di Firenze, facendo riferimento ai dati 2000-2009 rilevati nella stazione meteorologica di Firenze Centro.

Al fine di forzare il modello di simulazione per ottenere risposte che evidenzino criticità progettuali e/o di riqualificazione energetica dell'involucro e degli impianti, lo scenario climatico è stato assunto particolarmente critico sulla base delle indicazioni fornite nell'ambito dell'unità di ricerca sui cambiamenti climatici "CLASSE". Depurando il modello dal comportamento dell'utenza e degli impianti ed affidando all'involucro il compito di fronteggiare i cambiamenti climatici, è poi emersa in tutta evidenza l'utilità di considerare quest'ultimi come ulteriore parametro per una corretta selezione

delle azioni più efficaci nel contenimento dei consumi energetici nell'ambito di condizioni di benessere, estive ed invernali, accettabili. Inoltre, appare opportuno investigare le implicazioni della ventilazione per il raffrescamento passivo che potrebbe contribuire a garantire al contempo livelli di consumo energetico ottimali associati a condizioni di comfort termico accettabile; tali considerazioni dovranno necessariamente essere valutate in maniera sinergica con la riqualificazione dell'involucro ed adattate al contesto climatico in evoluzione.

I risultati ottenuti, che hanno fornito la possibile tendenza delle variazioni e del contributo delle varie componenti del bilancio energetico, incoraggiano l'approfondimento metodologico e l'estensione ad altri casi di studio per la validazione più attendibile del modello di calcolo.

5. Ringraziamenti

Desideriamo ringraziare per la preziosa collaborazione prestata nella definizione dei files climatici il Prof. M. Bindi, coordinatore Unità di Ricerca "CLASSE", dei ricercatori Dott. R. Ferrise e Dott. G. Trombi del Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente - Università di Firenze.

Desideriamo altresì ringraziare l'Arch. Vincenzo Esposito ed i suoi collaboratori, Ing. Dimitri Celli e Ing. Annapaola Corrias dell'Ufficio tecnico Casa SpA, per il supporto fornito nell'analisi del patrimonio edilizio esistente dell'area Fiorentina.

Bibliografia

1. Unità di ricerca interdipartimentale "Cambiamenti cLimAtici SiStemi ed Ecosistemi (CLASSE)" - Gruppo di lavoro LAB-ZEB. Progetto di ricerca "Strumenti e metodi per la riqualificazione e la progettazione di edifici, finalizzate al contenimento dei consumi energetici e delle emissioni di gas climalteranti".
2. Dubrul, C. *Technical Note AIVC 23. Inhabitant Behaviour with Respect to Ventilation: A Summary Report of IEA Annex VIII.*, AIVC.; The Air Infiltration and Ventilation Centre: Bracknell, **1988**.
3. Seligman, C.; Darley, J. M.; Becker, L. J. Behavioral Approaches to Residential Energy Conservation. *Energy and Buildings* **1978**, *1*, 325–337.
4. Andersen, R. The influence of occupant's behavior on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments. In *10th International Conference on Healthy Buildings 2012*, Proceedings of Healthy buildings, Brisbane, Australia, 8-12 July 2012; International Society of Indoor Air Quality and Climate: Santa Cruz, California (USA).
5. Fabi, V. Influence of Occupant's Behaviour on Indoor Environmental Quality and Energy Consumptions. Ph.D. Thesis, Politecnico di Torino, **2013**.
6. Bindi, M.; Ferrise, R.; Trombi, G. - Unità di Ricerca "Cambiamenti cLimAtici SiStemi ed Ecosistemi (CLASSE) – Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente - Università di Firenze
7. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI EN ISO15927 - Prestazione termoigrometrica degli edifici. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 4: Dati orari per la valutazione del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, Milano, **2005**.

8. Introduction. In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*; Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.; Cambridge University Press: Cambridge, 2014; pp 119–158.
9. CTI - Comitato Termotecnico Italiano. *Metodologia per L'elaborazione Dei Dati Climatici Ai Fini Della Determinazione Degli "anni Tipo,"* Milano, **2009**.
10. Lawrence Berkeley National Laboratory. *Auxiliary EnergyPlus Programs*, **2013**.
11. Belcher, S. E.; Hacker, J. N.; Powell, D. S. Constructing Design Weather Data for Future Climates. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* **2005**, 26, 49–61.
12. Guan, L. Preparation of Future Weather Data to Study the Impact of Climate Change on Buildings. *Building and Environment* **2009**, 44, 793–800.
13. Servizio Agrometeorologico Regione Toscana. Consultazione archivi storici (1990 - 2010) <http://agrometeo.arsia.toscana.it> (accesso 19 Feb 2015).
14. ISPRA - Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale. SCIA - Sistema nazionale per la raccolta, l'elaborazione e la diffusione di dati Climatici di Interesse Ambientale http://www.scia.isprambiente.it/home_new.asp. (accesso 03 Feb 2015).
15. Celli, D. (Responsabile Impianti CASA S.p.A). Diagnosi energetica strumentale e certificazione energetica su un campione di alloggi di edilizia residenziale pubblica. Convegno "Quanto consuma la mia casa?". 19 aprile **2013**, Firenze.
16. Pappalettere, S. (a cura di). *Nzeb Progetto Sperimentale Nearly Zero Energy A Prato*; Alinea: Firenze, Italia, **2012**.
17. Corrado, V.; Ballarini, I.; Corgnati, S. P. *Building Typology Brochure – Italy*, **2014**.
18. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI/TR 11552 Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici. Parametri termofisici, Milano, **2014**.
19. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI/TS 11300 Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva, Milano, **2014**.
20. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI/TS 11300 Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali, Milano, **2014**.
21. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI/TS 11300 Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva, Milano, **2010**.
22. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI EN 15251 Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica, Milano, **2008**.
23. LBNL (US DOE), *EnergyPlus Engineering Reference*, LBNL: Berkeley (CA), USA, **2014**.