



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile

A.a. 2020/2021

Settembre 2021

Metodologia e strumenti per la valutazione del consumo energetico di parchi edilizi

Relatore:

Prof. Vincenzo Corrado

Correlatrice:

Prof.ssa Ilaria Ballarini

Candidata:

Bianca Ruggiero

ABSTRACT

Nonostante le città occupino solamente il 3% circa della superficie terrestre, costituiscono i principali contribuenti alle sfide climatiche ed energetiche, causando il consumo del 70% circa dell'energia mondiale e contribuendo per il 75% alle emissioni globali di gas serra.

In quest'ottica, il settore edilizio occupa un ruolo fondamentale in quanto costituisce uno dei maggiori responsabili degli impatti climatici, essendo la causa del 40% del consumo energetico totale in Europa. In Italia nello specifico, il 60% del patrimonio edilizio risulta essere antecedente agli anni '70, periodo in cui le normative in materia energetica erano scarse, risultando quindi superato e non efficiente energeticamente.

Appare chiaro che per poter intervenire e favorire il miglioramento di tali condizioni sia necessario ricorrere all'utilizzo di strumenti specifici, focalizzati sul consumo energetico a scala urbana, detti UBEM (*Urban Building Energy Model*).

La modellazione energetica a scala urbana, infatti, è uno strumento di fondamentale importanza che si rivolge ai pianificatori urbani, ai progettisti e alle pubbliche amministrazioni per fornire i dati necessari per favorire una valutazione del consumo energetico e degli impatti ambientali conseguenti, dovuti ad uno specifico parco edilizio.

Il seguente lavoro presenta -in una prima fase- un quadro dei differenti approcci metodologici utilizzabili per la stima del fabbisogno energetico edilizio, ovvero l'approccio *top-down* e quello *bottom-up*. Inoltre, è stato prodotto un confronto fra gli strumenti UBEM e gli strumenti BEM (*Building Energy Model*), indirizzati alla valutazione del singolo manufatto, per fornire ai pianificatori futuri una panoramica completa riguardo le semplificazioni adottate dai diversi strumenti.

Nella seconda parte del lavoro invece, sono stati selezionati due *software* UBEM, ovvero CitySim Pro e City Energy Analyst, per eseguire un'analisi energetica su un isolato di edilizia residenziale popolare situato in Corso Racconigi a Torino. Inoltre, in questa parte del lavoro è stato possibile giungere ad un confronto specifico fra i due *software* per mettere in evidenza le principali diversità e guidare i futuri sviluppatori nella scelta del programma più adeguato ai propri scopi. Infine, una volta definito il modello virtuale, sono stati estratti e confrontati gli indici di prestazione energetica relativi al riscaldamento e alla produzione di acqua calda sanitaria, successivamente confrontati con i dati *standard*, al fine di assicurare la validità dei due modelli.

ABSTRACT

Although cities occupy only about 3% of the earth's surface, they are the main contributors to climate and energy challenges, consuming about 70% of the world's energy and contributing 75% to global greenhouse gas emissions.

In this context, the construction sector plays a fundamental role as it is one of the major causes of climate impacts, being the cause of 40% of total energy consumption in Europe. In Italy specifically, 60% of the building stock appears to be prior to the 1970s, a period in which energy regulations were scarce, thus being outdated and not energy efficient.

It is clear that in order to intervene and encourage the improvement of these conditions it is necessary to resort to the use of specific tools, focused on energy consumption on an urban scale, called UBEM (Urban Building Energy Model).

Energy modeling on an urban scale, in fact, is a tool of fundamental importance that is aimed at urban planners, designers and public administrations to provide the data necessary to facilitate an assessment of energy consumption and consequent environmental impacts, due to a specific building stock.

The following work presents - in a first phase - a picture of the different methodological approaches that can be used for the estimation of building energy needs, namely the *top-down* and *bottom-up* approaches. Furthermore, a comparison was made between the UBEM tools and the BEM (Building Energy Model) tools, aimed at evaluating the individual artifact, to provide future planners with a complete overview of the simplifications adopted by the various tools.

In the second part of the work, however, two UBEM software were selected, namely CitySim Pro and City Energy Analyst, to perform an energy analysis on a block of social housing located in Corso Racconigi in Turin. Furthermore, in this part of the work it was possible to reach a specific comparison between the two software programs, highlighting the main differences and guiding future developers in choosing the most suitable software for their purposes. Finally, once the virtual model was defined, the energy performance indices relating to heating and domestic hot water production were extracted and compared, subsequently compared with standard data, in order to ensure the validity of the two models.

INDICE

0. INTRODUZIONE.....	13
0.1.CONTESTODELLARICERCA.....	15
0.1.1. CONTESTO INTERNAZIONALE.....	15
0.1.2.CONTESTOEUROPEO.....	15
0.1.3. CONTESTO ITALIANO.....	17
0.2.SETTOREEDILIZIO.....	17
0.2.1. SETTORE EDILIZIO ITALIANO.....	19
0.3.RIFERIMENTI.....	21
0.3.1. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI.....	21
0.3.2.RIFERIMENTILEGISLATIVI.....	21
1. MODELLAZIONE ENERGETICA.....	25
1.1.BUILDINGENERGYMODEL.....	25
1.1.1. APPROCCIO WHITE-BOX.....	26
1.1.2.APPROCCIOBLACK-BOX.....	26
1.1.3. APPROCCIO GREY-BOX.....	27
1.2.URBANBUILDINGSENERGYMODEL.....	27
1.2.1. STRUTTURA DI UN UBEM.....	28
1.2.1.1. Organizzazione dati di input.....	28
1.2.1.2.Modellazionetermica.....	29
1.2.1.3.Validazione.....	29
1.2.2.APPROCCIALLAMODELLAZIONEENERGETICA.....	31
1.2.2.1. Modelli top-down.....	31
1.2.2.1.1. <i>Modello econometrico</i>	32
1.2.2.2. Modelli bottom-up.....	33
1.2.2.2.1. <i>Metodo statistico</i>	34

1.2.2.2.2. Metodo ingegneristico.....	36
1.2.2.2.3. Modelli ibridi.....	38
1.3. CONFRONTO STRUMENTI BEM E UBEM.....	39
1.3.1. SVILUPPO DEL MODELLO TRIDIMENSIONALE.....	39
1.3.2. SIMULAZIONE DEL MODELLO	40
1.3.3. DEFINIZIONE DELLE PROPRIETÀ TERMOFISICHE	40
1.3.4. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO.....	42
1.3.5. DEFINIZIONE DELLE ZONE TERMICHE.....	42
1.3.6. PROFILI OCCUPAZIONALI.....	43
1.3.7. VALIDAZIONE DEL MODELLO.....	43
1.4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI.....	46
2. SOFTWARE BOTTOM-UP.....	49
2.1. CITYSIM PRO.....	49
2.1.1. MODELLO DI CALCOLO.....	52
2.1.1.1. Modello termico.....	52
2.1.1.2. Modello radiativo.....	54
2.1.1.3. Modello comportamentale.....	54
2.1.1.4. Modello di impianti e attrezzature.....	54
2.1.2. DATI DI OUTPUT.....	55
2.2. CITYENERGYANALYST.....	55
2.2.1. DATABASE.....	57
2.2.1.1. Database meteo - WDB.....	57
2.2.1.2. Database urbano GIS - UGDB.....	57
2.2.1.3. Database degli archetipi - ADB.....	57
2.2.1.4. Database delle distribuzioni - DDB.....	57
2.2.1.5. Database delle misure - MDB.....	57
2.2.2. MODELLO DI CALCOLO.....	60

2.2.2.1. Modulo di calcolo.....	60
2.2.1.2. Modulo del potenziale di risorsa.....	60
2.2.1.3. Modulo dei sistemi tecnologici.....	61
2.2.1.4. Modulo di ottimizzazione dei sistemi di alimentazione.....	61
2.2.1.5. Modulo decisionale.....	62
2.2.1.6. Modulo di analisi spazio-temporale.....	63
2.3. UMI.....	63
2.4. SIMSTADT.....	65
2.5. CITYBES.....	66
2.6. OPENIDEAS.....	67
2.7. URBANOPT.....	68
2.8. TEASER.....	69
2.9. SOFTWARE IN VIA DI SVILUPPO.....	70
2.10. CONFRONTO DEI SOFTWARE CITYSIM PRO E CEA.....	71
2.11. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI.....	76
3. PRESENTAZIONE DELL'AREA DI STUDIO.....	81
3.1. CONTESTUALIZZAZIONE STORICA E URBANISTICA DELLA CITTÀ DI TORINO.....	81
3.1.1. ETÀ ANTICA.....	81
3.1.2. ETÀ MEDIEVALE.....	83
3.1.3. ETÀ MODERNA.....	85
3.1.4. ETÀ CONTEMPORANEA.....	86
3.2. CONTESTUALIZZAZIONE STORICA DEL QUARTIERE CENISIA.....	89
3.3. CONTESTUALIZZAZIONE STORICA DELL'ENTE ATC.....	91
3.3.1. PRIMO PERIODO DI COSTRUZIONE: 1907-1918.....	92
3.4. PRESENTAZIONE DEL CASO STUDIO.....	93
3.4.1. SOPRALLUOGO.....	100

3.5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI.....	107
4. COSTRUZIONE DEL MODELLO.....	109
4.1. MODELLO TRIDIMENSIONALE.....	110
4.1.1. RAPPRESENTAZIONE TRIDIMENSIONALE.....	112
4.1.2. SUPERFICI CLIMATIZZATE.....	114
4.2. DATI CLIMATICI.....	116
4.3. DEFINIZIONE DELL'INVOLUCRO.....	119
4.3.1. INVOLUCRO OPACO.....	121
4.3.1.1. Componenti verticali.....	123
4.3.1.2. Componenti orizzontali - Chiusure inferiori.....	124
4.3.1.3. Componenti orizzontali - Chiusure superiori.....	125
4.3.2. INVOLUCRO TRASPARENTE.....	126
4.4. INDIVIDUAZIONE DELLE ZONE TERMICHE.....	128
4.5. DEFINIZIONE DEI CARICHI TERMICI ENDOGENI.....	129
4.5.1. PROFILI ORARI.....	133
4.5.2. INTENSITÀ DEI CARICHI TERMICI ENDOGENI.....	138
4.5.2.1. Apporti termici dovuti agli occupanti.....	138
4.5.2.2. Apporti termici dovuti ai sistemi di illuminazione.....	140
4.5.2.3. Apporti termici dovuti agli apparecchi elettrici.....	140
4.6. DEFINIZIONE DELL'IMPIANTO TERMICO.....	140
4.6.1. RISCALDAMENTO.....	142
4.6.2. PRODUZIONE DI ACQUA CALDA SANITARIA.....	147
4.7. CONFRONTO CITYSIM PRO E CEA.....	152
4.7.1. PROPRIETÀ GEOMETRICHE.....	154
4.7.2. INVOLUCRO.....	156
4.7.3. ZONE TERMICHE.....	161
4.7.4. CARICHI TERMICI ENDOGENI.....	163

4.7.5. IMPIANTO TERMICO.....	166
4.7.6. COMFORT INTERNO.....	172
4.8. RIFERIMENTI.....	174
4.8.1. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI.....	174
4.8.2. RIFERIMENTI NORMATIVI.....	174
5. VALIDAZIONE DEL MODELLO.....	177
5.1. FABBISOGNO TERMICO UTILE PER IL RISCALDAMENTO.....	178
5.1.1. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI.....	178
5.2. ENERGIA AEROGATA PER IL RISCALDAMENTO.....	186
5.2.1. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI.....	186
5.3. FABBISOGNO TERMICO UTILE PER L'ACS.....	194
5.4. APPROFONDIMENTO SUI RISULTATI.....	194
5.5. RIFERIMENTI.....	197
5.5.1. RIFERIMENTI LEGISLATIVI.....	197
5.5.2. RIFERIMENTI NORMATIVI.....	197
6. CONCLUSIONI.....	199

0. INTRODUZIONE

La popolazione globale è di circa 7.8 miliardi di persone (dato aggiornato al 2021) e più della metà risiede in aree urbane; secondo le previsioni delle Nazioni Unite, la popolazione globale che risiede nelle città dovrebbe passare da 3.5 miliardi (dato del 2017) a 5 miliardi entro il 2030, altre proiezioni ancora mostrano che l'aumento della popolazione combinato al graduale passaggio dalle residenze rurali a quelle urbane porteranno ad un aumento della popolazione all'interno delle aree urbane -ovvero il 68% della popolazione mondiale- pari al 54% in più rispetto al 2016, entro il 2050. [1] Le città occupano una superficie pari circa al 3% della superficie terrestre ma, nonostante ciò, costituiscono i principali contribuenti alle sfide climatiche ed energetiche consumando circa il 70% dell'energia mondiale e contribuendo per circa il 75% alle emissioni globali di gas serra e tali valori con l'espandersi delle città sono destinati ad aumentare. [2]

Pertanto, l'urbanizzazione costituisce una delle sfide di questo secolo ed è connessa ai cambiamenti climatici e di conseguenza alla necessità di sviluppare un utilizzo sostenibile dell'energia e delle risorse naturali.

Alla luce dei dati relativi al consumo energetico e alle emissioni, appare chiaro come il settore edilizio costituisca una grande opportunità da sfruttare per trasformare le città in ambienti sostenibili. Migliorare l'efficienza energetica degli edifici implica non solo una riduzione degli impatti sull'ambiente ma anche benefici economici e un miglioramento delle condizioni di comfort per gli utenti.

Dal momento che le tematiche energetiche a livello urbano costituiscono un argomento complesso che coinvolge più settori, è necessario che le città siano in grado di poter valutare il loro consumo energetico attuale per poter intervenire indagando, stimando e confrontando le diverse strategie possibili volte alla riduzione di tali consumi e degli impatti ambientali che ne conseguono.

Inoltre, è necessario che le città possano essere in grado di valutare le possibilità di

retrofit per lo *stock* dei propri edifici in funzione del loro consumo energetico, dell'epoca di costruzione, delle dimensioni, della tipologia, e delle diverse proprietà di ciascun quartiere. A ciò si aggiunge il fatto che combinando i diversi carichi e il consumo energetico di interi gruppi di edifici i valori risulteranno inferiori rispetto alla somma degli edifici trattati singolarmente, pertanto le infrastrutture energetiche condivise possono raggiungere un'efficienza energetica più elevata. [3]

A tal proposito i modelli energetici urbani nascono con lo scopo di indagare le diverse opportunità volte ad affrontare le problematiche sopra illustrate combinando i dati provenienti dalle città con strumenti di valutazione energetica innovativi; gli strumenti di calcolo rivolti ad una scala urbana, infatti, combinano la gestione dei dati con il rilevamento urbano e l'analisi dei valori finalizzati alla valutazione dei sistemi energetici ambientali su scala urbana. [3]

Il lavoro presentato in questa tesi, quindi, nasce dalle riflessioni e dalle consapevolezza maturate alla luce di quanto sopra riportato. L'obiettivo che ci si pone con tale ricerca è quello di fornire un supporto nella scelta, nonché una guida per gli strumenti disponibili, che si rivolge agli sviluppatori che intendono intraprendere un lavoro di modellazione e simulazione energetica riferita ad una scala urbana.

La tesi qui presentata si articola in tre sezioni.

La prima, di natura più teorica, riguarda l'individuazione dei diversi approcci metodologici esistenti -in accordo con quanto riportato in letteratura- che hanno come fine ultimo la stima del fabbisogno energetico di un parco edilizio e che può avvenire o meno attraverso un calcolo diretto. Inoltre, sempre all'interno di questa sezione, a seguito delle riflessioni sviluppate durante la fase di ricerca, è stato possibile presentare un *focus* volto ad evidenziare le differenze che intercorrono fra uno strumento rivolto alla modellazione di un singolo edificio, BEM, e uno strumento rivolto invece ad una scala urbana, UBEM, in cui vengono evidenziate le semplificazioni adottate dall'uno o dall'altro modello.

La seconda sezione invece, mira a restituire un quadro dei principali *software* disponibili -al momento della stesura di tale lavoro- con accenni a quelli in via di sviluppo, volti alla modellazione energetica riferita alla scala urbana. In particolare, due tra questi, ovvero CitySim Pro e City Energy Analyst, sono stati analizzati maggiormente nel dettaglio e testati direttamente, aspetto che ha permesso un confronto più dettagliato e specifico fra i due, e che ha permesso di valutare i differenti parametri di input e i modelli di calcolo che li caratterizzano.

Infine, l'ultima sezione ha come oggetto la modellazione energetica di un isolato reale. Questa operazione è stata eseguita con i *software* citati precedentemente, CitySim

Pro e CEA, in riferimento ad un isolato di edilizia residenziale popolare situato nella città di Torino, in Corso Racconigi 25. Il modello è stato generato a partire dalle informazioni fornite dall'Agenzia Territoriale per la Casa (ATC), integrando tali informazioni -quando necessario- con dati accessibili alla collettività.

0.1. CONTESTO DELLA RICERCA

0.1.1. CONTESTO INTERNAZIONALE

Nel 1997 durante la Conferenza delle Parti (COP), è stato redatto il protocollo di Kyoto entrato poi in vigore nel 2005. L'obiettivo di tale trattato internazionale era quello di ridurre le emissioni di GHGs dei paesi partecipanti del 5,2% entro il 2012 rispetto ai propri livelli di emissioni riferiti al 1990, pertanto con un'incidenza diversa per ciascuno stato.

Negli anni successivi, durante la COP21 tenutasi nel 2015 ed entrata poi in vigore nel 2016, con l'Accordo di Parigi, si è avuto il primo accordo vincolante sul clima a livello internazionale con lo scopo di combattere i cambiamenti climatici, ratificato da 175 paesi a partire dall'aprile del 2018. Secondo questo accordo i paesi firmatari si impegnano a mantenere l'incremento medio della temperatura globale al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali e si mira a limitare l'aumento a 1,5°C. Oltre a ciò pone come ulteriore obiettivo il contenimento delle emissioni di CO₂, uno dei GHGs ritenuto più pericoloso.

Nell'agosto 2015, con l'Agenda 2030, vengono posti 17 obiettivi di sviluppo sostenibile definiti Dall'Organizzazione delle Nazioni Unite e sottoscritti dai Capi di Stato e di Governo, fra questi uno riguarda il settore energetico, mentre uno riguarda le città nello specifico.

All'interno di questo contesto internazionale, l'Unione europea ha ricoperto un ruolo fondamentale, infatti proprio a seguito della stesura del protocollo di Kyoto è stata promossa una politica basata su un'economia più sostenibile e a basso consumo energetico.

0.1.2. CONTESTO EUROPEO

Uno degli obiettivi posti dall'Unione europea con il *Green Deal* è quello di raggiungere entro il 2050 la condizione di neutralità climatica e per raggiungere tale sfida uno dei punti fondamentali riguarda la trasformazione del sistema energetico, dal momento che il 75% delle emissioni di GHGs a livello europeo è dovuto proprio

all'energia. A tal proposito, l'obiettivo posto riguarda il dimezzamento del fabbisogno energetico rispetto a quello riferito all'anno 2005 e il metodo per perseguire tale obiettivo deve perciò riguardare l'efficienza energetica. Oltre che i processi industriali, tale efficientamento deve rivolgersi al parco edilizio che nelle condizioni attuali è responsabile del 40% dei consumi energetici totali. [5]

Pertanto, allo scopo del raggiungimento di tali obiettivi, è necessario che si instaurino sinergie fra le prestazioni energetiche dello stock edilizio, l'energia proveniente da fonti rinnovabili e le direttive europee.

In questo contesto, nel 2002 è stata emanata dal Parlamento europeo la Direttiva Europea 2002/91/CE [8], nota anche come Direttiva EPBD -*Energy Performance of Buildings Directive*- all'interno della quale vengono definite le prime misure volte alla promozione del rendimento energetico degli edifici e a stabilire i requisiti minimi a cui devono sottostare gli edifici di nuova costruzione, fornendo quindi le indicazioni per la metodologia di calcolo di tali requisiti.

Nel corso degli anni seguenti, le disposizioni della Direttiva 2002/91/CE sono state rafforzate con l'obiettivo di raggiungere entro il 2020 il 20% dell'efficientamento energetico. Questa, quindi, ha costituito il punto di partenza per le successive normative nel campo dell'efficientamento energetico.

La Direttiva è stata successivamente abrogata dalla Direttiva 2010/31/EU [9] che propone un quadro per le prestazioni energetiche degli edifici, utili come regolamento ai fini del calcolo energetico. Inoltre, con l'Articolo 2 vengono definiti gli edifici nZEB -*Near Zero Energy Building*- come edifici ad altissime prestazioni il cui fabbisogno energetico basso deve essere coperto da energia proveniente da fonti rinnovabili -prodotta in loco o nelle vicinanze- in modo significativo.

Nel 2018 invece, è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea la Direttiva UE 2018/844 che sostituisce le precedenti direttive riguardanti i temi della prestazione ed efficienza energetica. I nuovi obiettivi che vengono posti prevedono il sostegno dell'efficientamento energetico di edifici residenziali e non solo, favorendo strategie a lungo termine dal momento che -come si è detto sopra- il 40% dei consumi energetici totali è dovuto proprio al settore edilizio.

Infine, sempre secondo quanto riportato all'interno del pacchetto di Direttive europee *Clean Energy for all Europeans*, gli obiettivi relativi agli interventi nel settore dell'efficienza energetica a medio termine riferiti al 2030, pongono che questi dovranno essere pari al 32,5%, mentre la produzione di energie rinnovabili dovrà essere pari o maggiore al 32% del valore totale. Con riferimento agli obiettivi a lungo termine posti per il 2050 invece, il *focus* riguarda il raggiungimento della neutralità cli-

matica in europa, come accennato già in precedenza, ovvero la decarbonizzazione del sistema energetico, perseguibile attraverso una ulteriore riduzione della quantità di energia necessaria.

Si fa notare che, nonostante l'Europa si sia dimostrata estremamente virtuosa, risultando uno dei continenti più sostenibili, il suo fabbisogno di energia primaria rappresenta solo il 10% circa rispetto alla domanda mondiale. Gli Stati Uniti e la Cina, infatti, rappresentano i maggiori consumatori, la cui domanda energetica combinata si attesta intorno al 40% rispetto al totale. A seguire si trovano l'India, continente in via di sviluppo, e l'Africa il cui aumento della popolazione è previsto pari a mezzo miliardo circa entro il 2040, aspetto che ovviamente comporterà un aumento del consumo energetico. Alla luce di quanto riportato, appare chiaro che sia necessario, soprattutto per i continenti che più incidono a livello di consumi, la diffusione e il rispetto di politiche sostenibili che abbiano come obiettivo la riduzione dei propri impatti sull'ambiente, contribuendo in questo modo alla diminuzione dell'incremento della temperatura e delle emissioni correlate.

0.1.3. CONTESTO ITALIANO

Anche l'Italia si è impegnata nel prendere le misure adeguate, per limitare il consumo energetico; a tal proposito con il D.L. 192 del 19 agosto 2005 [10], l'Italia ha recepito la direttiva europea 2002/91/CE, e modificato in seguito dal D.L. 311 del 29 dicembre 2006.

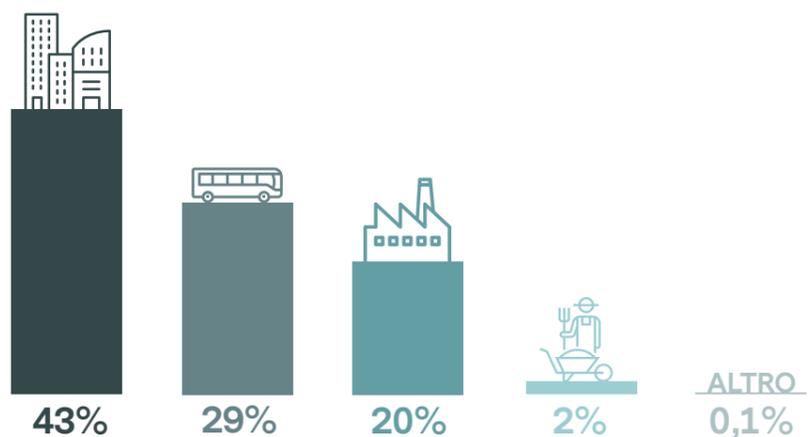
Il 26 giugno del 2009 con le linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, ciascuna regione ha dovuto recepire le Direttive europee dal momento che alcune regioni avevano già definito valori più restrittivi rispetto alla normativa nazionale. Alcune fra le regioni italiane infatti -tra cui il Piemonte- si erano già dotate di provvedimenti in materia energetica nel periodo antecedente al D.M. del 26 giugno 2009, contribuendo così a delineare un quadro frammentato all'interno del territorio.

0.2. SETTORE EDILIZIO

Come accennato più volte nelle sezioni precedenti, oltre al campo energetico, anche quello edilizio ricopre un ruolo fondamentale, infatti da solo è responsabile del 40% del consumo energetico europeo e del 36% delle emissioni di GHGs in europa. Se da un lato i paesi industrializzati sono caratterizzati dalla presenza di edifici esistenti, nei paesi in via di sviluppo la maggior parte degli edifici risultano ancora da costruire, quindi la crescita economica e l'urbanizzazione incrementeranno l'utilizzo energetico, pertanto si rende necessaria un'attenzione particolare verso i temi dell'efficienza-

mento.

Gli edifici occupano una posizione di rilievo nella vita delle persone ma le prestazioni energetiche che li caratterizzano sono scarse e ciò comporta che i consumi energetici ad esso associati siano la causa del posizionamento del settore edilizio al primo posto della classifica dei consumi di energia primaria (figura 1), al di sopra del settore dei trasporti e di quello dell'industria. A tal proposito basti pensare che una quota considerevole del patrimonio edilizio europeo possiede più di cinquant'anni e addirittura si avvicina verso il centinaio, inoltre, oltre il 40% risulta essere antecedente agli anni '60, anni in cui le regolamentazioni in materia energetica erano ancora limitate.



Si fa notare che gli edifici di nuova costruzione consumano circa la metà rispetto a edifici costruiti anche solo venti anni fa, inoltre, l'80% degli edifici presenti attualmente sarà ancora utilizzato nel 2050 ed il 75% di tale *stock* risulta essere inadeguato dal punto di vista energetico. Pertanto, il tasso di riqualificazione e ristrutturazione, che attualmente si attesta fra l'1,4% e l'1,2% [5] -fra i vari stati membri europei- dovrà essere incrementato nei prossimi anni e almeno raddoppiato per raggiungere gli obiettivi di neutralità delle emissioni di carbonio.

Pertanto, appare chiaro come le città costituiscano l'opportunità per raggiungere gli obiettivi prefissati e costituiscono il punto di partenza per ottenere risultati concreti. Le azioni da intraprendere dovranno muoversi in due direzioni: da un lato sarà necessario contenere i consumi attraverso l'efficientamento, dall'altro sarà necessario perseguire la decarbonizzazione del settore della produzione di energia.

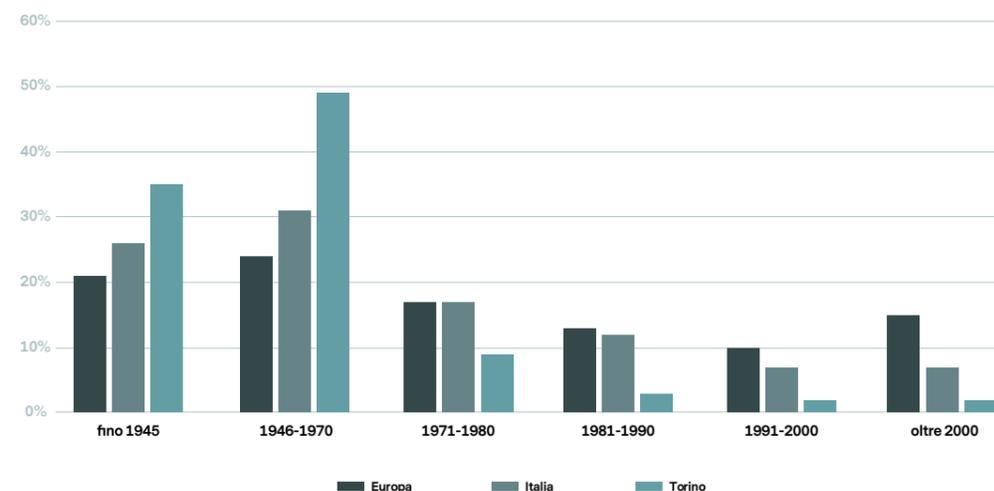


FIG.1-CONSUMI ENERGETICI FINALI IN ITALIA PER SETTORE, ANNO 2018.
FONTE: EUROSTAT

A tal riguardo, ai fini del raggiungimento di tali obiettivi, è previsto un target di riduzione dei consumi finali pari almeno allo 0,8% annuo per il periodo 2021-2030.

0.2.1. SETTORE EDILIZIO ITALIANO

In linea con il trend europeo, anche il patrimonio edilizio italiano risulta essere vetusto e necessita di interventi sia dal punto di vista energetico ma anche sismico e idrogeologico. Di 15 milioni di costruzioni attualmente presenti sul territorio italiano, 12 milioni hanno destinazione d'uso residenziale, appare dunque chiaro come per ridurre il consumo energetico totale e le emissioni di CO₂ dovute al settore edilizio, sia necessario che le misure prese debbano riguardare la riqualificazione energetica ed architettonica dell'edilizia residenziale in quanto maggiormente diffusa.



A tal proposito, la prima prescrizione in campo energetico e rivolta al settore edilizio si è avuta con la Legge 373 del 1976 [11], in seguito sostituita dalla L.10/91 [12] e riguardante gli impianti di produzione di calore e l'isolamento termico.

Con il Decreto Legislativo n.192 del 2005 invece, sono stati definiti i criteri per il miglioramento delle prestazioni energetiche e l'interazione delle fonti energetiche rinnovabili con riferimento sempre al settore edilizio.

Inoltre, il 26 giugno 2015 è stato emanato il Decreto Requisiti Minimi [13] mentre a partire dal 31 dicembre 2018 il sistema legislativo ha imposto norme sempre più res-



FIG.2-EDILIZIA RESIDENZIALE PER EPOCA DI COSTRUZIONE.
FONTE: ISTAT.

trittive in merito alle nuove costruzioni proprio al fine di incentivare l'efficientamento energetico dello *stock* edilizio esistente, imponendo il limite nZEB per gli edifici pubblici, limite esteso anche al settore privato a partire da fine 2020, implicando così la costruzione di nuovi edifici caratterizzati da consumi ed emissioni limitate.

Infine, per incentivare la riqualificazione energetica il governo italiano ha stanziato diverse risorse pubbliche. Le detrazioni fiscali disponibili sono riportate all'interno della Legge di Bilancio 2021 [14] e comprendono: il bonus caldaie per incentivare la sostituzione dei generatori di calore esistenti in favore di quelli a condensazione, l'Ecobonus che comprende detrazioni del 50% o del 65% in funzione dei diversi interventi di riqualificazione energetica, il Bonus Facciate con detrazioni del 90% per interventi sulle facciate degli edifici e il Superbonus 110% che riguarda sia interventi di efficientamento energetico che di misure antisismiche.

Concludendo, è chiaro che le politiche continueranno ad avere come *focus* il rinnovamento e la riqualificazione del parco edilizio esistente che, secondo i dati ISTAT, per il 60% risulta essere costruito prima degli anni '70, aspetto che costituirà una sfida per i prossimi anni. Questo d'altro canto non escluderà la costruzione di nuovi quartieri o città che richiederanno necessariamente una pianificazione nell'ottica di perseguire l'efficienza energetica e la minimizzazione degli impatti ambientali.

0.3 RIFERIMENTI

0.3.1. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

[1] Ritchie H, Roser M., "Urbanization," our world data, Jan. 2019, consultato nell'agosto 2021, <https://ourworldindata.org/urbanization>.

[2] "European Commission", European Commission - European Commission. Ultima consultato nell'agosto 2021, https://ec.europa.eu/commission/index_en.

[3] T.Hong, Y.Chen, X.Luo, N.Luo, S.H.Lee, Ten question on urban building energy modeling, Building and Environment 168 (2020), 2020.

[4] F.Johari, G.Peronato, P.Sadeghian, X.Zhao, J.Widén, Urban building energy modeling: State of the art and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews 128 (2020), 2020.

[5] ENEA, Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2020 – Analisi e Risultati delle Policy di efficienza energetica del nostro paese, 2020.

[6] International Energy Agency, World Energy Outlook 2019, 2019.

[7] ISTAT, consultato nell'agosto 2021, <https://www.istat.it/>.

0.3.2. RIFERIMENTI LEGISLATIVI

[8] Direttiva (UE) 2002/91 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 Dicembre 2002.

[9] Direttiva UE 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.

[10] Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.

[11] Legge 30 aprile 1976, n. 373, Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.

[12] Legge 9 gennaio 1991, n. 10, Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.

[13] Decreto interministeriale 26 giugno 2015, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, conosciuto come Decreto Requisiti Minimi.

[14] Legge di Bilancio 2021, Legge 30 dicembre 2020, 2019.

1. MODELLAZIONE ENERGETICA

1.1. BUILDING ENERGY MODEL

In accordo con gli studi di Goy e Finn [2], la domanda energetica può essere analizzata a due differenti scale, una microscala che si riferisce a simulazioni che comprendono fino ad un massimo di cinque edifici e una macroscala che si riferisce a simulazioni caratterizzate dalla modellazione di più di cinque edifici.

I modelli BEM (*Building Energy Model*) sono quei modelli virtuali informatizzati che si riferiscono ad una microscala e nascono con lo scopo di stimare il consumo energetico degli edifici basandosi sulla simulazione dei flussi di energia e di massa, tenendo conto di equazioni, principi della termodinamica e assunzioni complesse. [3] Pertanto, i software BEM sono necessari per elaborare simulazioni in grado di descrivere il comportamento di un edificio al fine di evidenziare i miglioramenti che potrebbero essere messi in atto per una gestione volta alla riduzione del consumo energetico e alla minimizzazione degli impatti ambientali. [4]

Tali modelli si basano su diversi dati di input caratterizzati da una complessità differente in accordo con il *Level of Detail* (LOD) e il *Level of Information* (LOI) predefinito. [5] In particolare è necessario conoscere le caratteristiche geometriche dell'edificio, le serie di dati climatici dell'area oggetto di indagine, le proprietà termofisiche dei componenti dell'involucro edilizio sia opaco che trasparente, la definizione delle differenti zone termiche che caratterizzano l'edificio, il regime di calcolo prescelto, i carichi termici sensibili e latenti e la descrizione dei sistemi impiantistici.

Dal momento che nella maggior parte dei casi non è possibile conoscere i dati di input nella loro totalità, soprattutto nel caso di edifici esistenti, è necessario calibrare il modello, ovvero affinare i parametri di input in modo che si discostino il meno possibile rispetto ai dati del consumo reale, in modo tale da ridurre al minimo le incertezze

che implicano un errore sul risultato finale. Pertanto, è necessario che gli indici statistici che rappresentano l'errore percentuale, siano compresi all'interno di un intervallo di valori accettabile.

È possibile fare riferimento a tre categorie differenti di modelli BEM a seconda delle finalità e del campo applicativo dell'analisi. In base alla metodologia utilizzata si individuano i modelli *white-boxes*, *black-boxes* e *grey-boxes*. [4]

1.1.1. APPROCCIO WHITE-BOX

L'approccio *white-box* è noto anche come *forward modelling technique* ed indica la necessità di una quantità di dati fisici rilevanti relativi all'involucro edilizio.

Questo approccio deterministico permette di modellare l'edificio tramite equazioni matematiche dettagliate *physics-based*. Il modello può essere analizzato sia in regime dinamico che stazionario: il metodo dinamico risulta essere quello più accurato ma richiede metodologie di calcolo più complesse, al contrario il metodo stazionario è più semplice da calcolare ma fornisce risultati meno accurati.

Solitamente i dati necessari per questa tipologia di modelli derivano da misurazioni, pertanto non è necessario alcun dato statistico. Tali dati di input sono i dati meteo dell'area, la descrizione dettagliata dell'edificio, dei suoi componenti e dell'impianto. Il motore di calcolo invece, è costituito da un gruppo di relazioni matematiche dettagliate *physics-based*.

È possibile individuare tre gruppi di motori di simulazione: i *Computational Fluid Dynamics* (CFD), gli *Zonal methods* e i *Nodal methods*, noti anche come metodi multizona. [4]

1.1.2. APPROCCIO BLACK-BOX

L'approccio *black-box* è noto anche come *inverse-modelling technique* ed usa alcune forme di regressione per il calcolo degli indicatori energetici.

Questo modello richiede dati derivanti da misurazioni effettuate in loco per un certo periodo di tempo ed in differenti condizioni al fine di realizzare modelli rappresentativi affidabili. Si ricorre a questo metodo quando i parametri fisici dell'edificio sono ignoti.

Questa tipologia di approccio non richiede equazioni di trasferimento e necessita di un numero inferiore di parametri rispetto all'approccio *white-box*, entrambi aspetti che risultano vantaggiosi. [4]

1.1.3. APPROCCIO GREY-BOX

Il metodo *grey-box* si utilizza quando le caratteristiche dell'edificio non sono ben note. Questo metodo è noto anche come *hybrid method*, in quanto integra alcuni degli aspetti del modello *white-box* con aspetti del modello *black-box*.

1.2. URBAN BUILDING ENERGY MODEL

Analizzare un edificio singolarmente e stimare il suo consumo energetico decontestualizzandolo dall'area urbana in cui è inserito, non è un sistema affidabile ed efficiente in quanto così facendo non vengono considerati diversi aspetti che incidono notevolmente sul consumo energetico e sugli impatti ambientali degli edifici, come il rapporto con il microclima ed il rapporto tra gli edifici stessi. Pertanto, per tenere conto di tali fattori, partendo dai modelli BEM sono stati sviluppati nuovi strumenti in grado di indagare il consumo energetico e gli impatti ambientali su scala urbana, denominati *Urban Building Energy Model* (UBEM).

Un UBEM è un modello che si riferisce alla simulazione della domanda energetica di un gruppo di edifici in un contesto urbano in modo tale da considerare gli effetti delle interconnessioni dinamiche e complesse con il microclima urbano e delle connessioni che intercorrono tra gli edifici stessi. Non si tratta infatti, di una semplice estensione lineare - in termini di scala urbana - del numero di edifici modellabili, ma si tratta di comprendere come l'ambiente urbano eserciti una influenza sul patrimonio edilizio e viceversa, in quanto un edificio che presenta determinate prestazioni quando viene analizzato singolarmente, se viene analizzato relativamente al contesto in cui è inserito, subirà un calo delle prestazioni proprio a causa delle interazioni che in un modello BEM non vengono considerate.

Alla luce di tali osservazioni, lo scopo di questi modelli è quello di fornire i dati quantitativi necessari ai pianificatori urbani, energetici, ad architetti, ingegneri, ai responsabili politici e agli enti pubblici in modo che possano definire le politiche energetiche volte ad una progettazione urbana responsabile e sostenibile.

Gli UBEM sono strumenti versatili in quanto si adattano a scale urbane e ad orizzonti temporali differenti in funzione delle esigenze dell'utente ma allo stesso tempo presentano alcuni limiti.

Una delle sfide maggiori è sicuramente rappresentata dalla quantità, disponibilità ed affidabilità dei dati. Innanzitutto, è necessario notare che per eseguire una simulazione su scala urbana sono necessari tempi lunghi di elaborazione e di calcolo degli input dovuti alla quantità ingente di dati, di conseguenza per cercare di minimizzare

il problema, il livello di dettaglio (LOD) del modello dovrà essere inversamente proporzionale alle dimensioni del sito scelto (2.3.1.).

In secondo luogo, il reperimento dei dati necessari risulta quasi sempre una sfida ardua in quanto si devono fronteggiare problemi quali l'accessibilità, la privacy e la sicurezza. Inoltre, sarebbe necessario muoversi verso una standardizzazione dei dati che permetterebbe una più facile interoperabilità.

Infine, come già detto in precedenza, una delle opportunità più significative degli UBEM è la possibilità di valutare l'interconnessione fra tutti gli elementi che costituiscono un parco edilizio. Questo aspetto però, costituisce un limite in quanto è necessaria la co-simulazione dei sistemi energetici urbani, del microclima, dei trasporti e della rete elettrica.

Gli strumenti UBEM sono caratterizzati da due diversi approcci alla modellazione: l'approccio *top-down* e l'approccio *bottom-up*. Il primo consiste nel valutare il modello come una entità unica, di conseguenza questo approccio non sarà in grado di restituire valori specifici per ciascun edificio. Inoltre, il consumo energetico totale è ottenuto attraverso parametri legati all'economia e parametri legati al sito di studio. Il secondo invece, restituisce un valore complessivo generato a partire da quelli dei singoli edifici, secondo un sistema complesso e dettagliato. Questo approccio pertanto, è legato alla disponibilità e alla qualità dei dati necessari per avviare la simulazione.

1.2.1. STRUTTURA DI UN UBEM

Reinhart *et al.* [4] suddividono il processo di creazione di un modello energetico in tre fasi: l'organizzazione dei dati di input, la modellazione termica e la validazione dei risultati.

1.2.1.1. Organizzazione dati input

I modelli UBEM richiedono la combinazione di diversi dati di input.

Innanzitutto, sono necessari set di dati meteo relativi alla località di indagine che si presentano in un formato denominato *Typical Meteorological Year* (TMY) e sono disponibili per diverse regioni del mondo. [6] Successivamente sono richiesti i dati relativi alla geometria dell'edificio, all'involucro, alle tecnologie costruttive ed ai materiali utilizzati, le proprietà termiche e fisiche dell'edificio e la destinazione d'uso. Inoltre, è necessario definire le proprietà non geometriche, ovvero i dati relativi ai sistemi HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*).

Se da un lato questi dati sono facilmente reperibili quando si fa riferimento ad un singolo edificio, quando l'analisi viene estesa alla scala urbana diventa complesso. Pertanto, il patrimonio edilizio viene suddiviso in gruppi in funzione delle caratteristiche principali di un edificio, allo scopo di identificare per ognuno di tali gruppi un archetipo, ovvero un edificio rappresentativo di un gruppo di costruzioni aventi proprietà simili.

La definizione degli archetipi avviene in due passaggi: il primo prevede la segmentazione dello stock edilizio in gruppi con medesime caratteristiche come la geometria, l'epoca di costruzione, la destinazione d'uso, la tipologia di impianto, mentre il secondo prevede la caratterizzazione dell'archetipo, ovvero la definizione dei parametri non geometrici che includono i materiali da costruzione, i sistemi HVAC, le infiltrazioni e i profili occupazionali. [7]

A tal riguardo, il progetto TABULA prevede la costruzione di un database europeo di archetipi relativo a 13 nazioni. In questo caso la caratterizzazione dell'archetipo può essere basata su un edificio campione, quindi un edificio realmente esistente documentato attraverso un audit, o su un edificio virtuale basato su dati statistici e opinioni di esperti. [8]

1.2.1.2. Modellazione termica

I dati di input precedentemente individuati vengono combinati grazie ad un modello termico che necessita di essere eseguito per ottenere i risultati.

Il caso più semplice prevede modelli di bilancio termico a zona singola eseguiti in regime stazionario per ogni archetipo. Il risultato finale si ottiene moltiplicando il valore relativo al calcolo del singolo archetipo per il numero di edifici facenti parte di quel gruppo.

1.2.1.3. Validazione

Affinché i modelli UBEM siano in grado di supportare le politiche di risparmio energetico, è necessario che i risultati siano affidabili.

Attualmente non è ancora stato individuato un range di valori riconosciuto globalmente ma secondo gli studi di Reinhart *et al.* [6], la tolleranza dell'errore ricade in un range di valori compresi fra il 7% e il 21% per i carichi di riscaldamento e fra l'1% e il 19% per l'*Energy Use Intensity* (EUI).

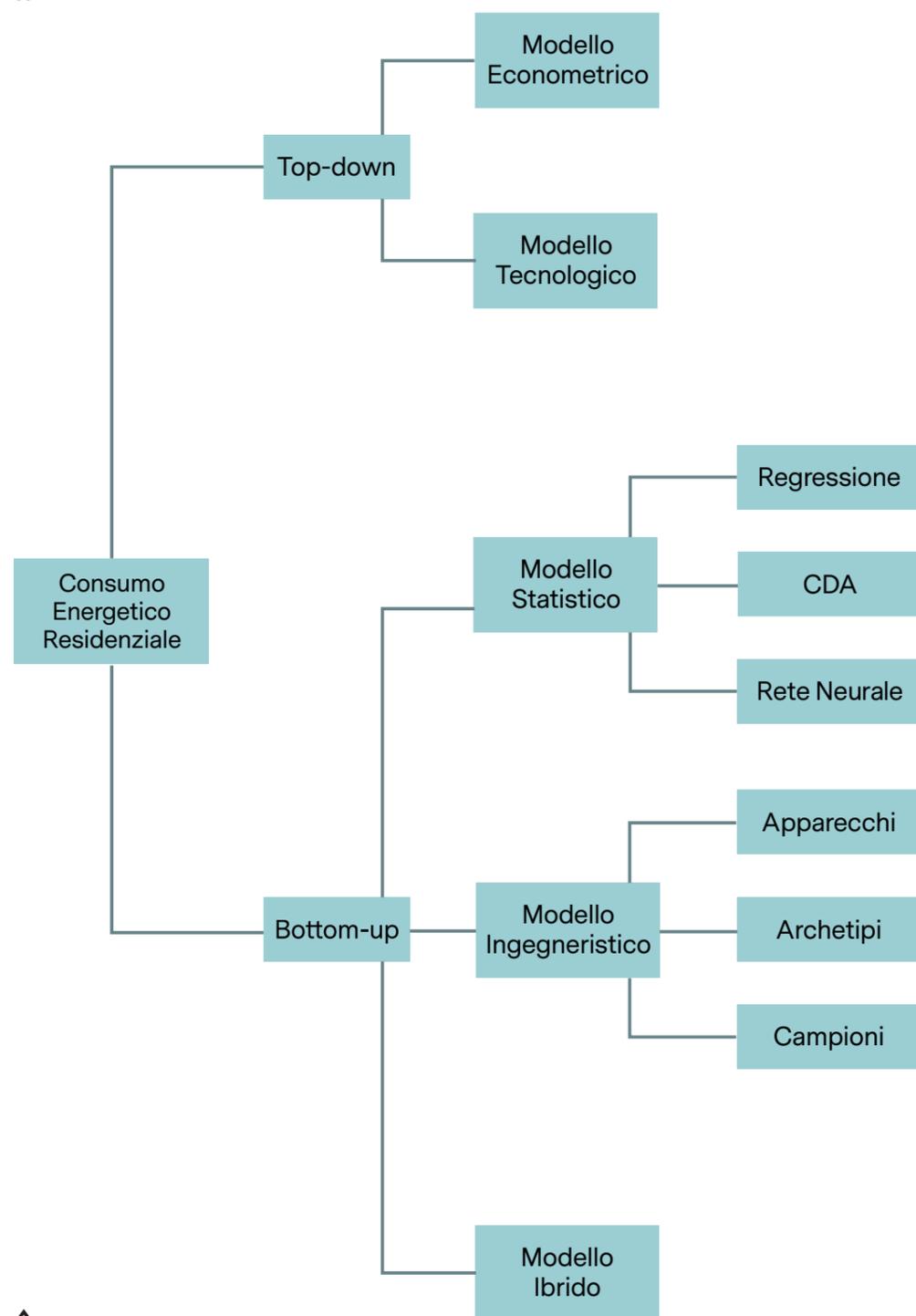


FIG.3-APPROCCI METODOLOGICI PER IL CALCOLO DEL CONSUMO ENERGETICO RESIDENZIALE.

1.2.2. APPROCCI ALLAMODELLAZIONE ENERGETICA

Come già accennato nella sezione precedente, le tecniche impiegate per stimare il consumo energetico di un modello urbano virtuale, vengono classificate da Swan e Ugursal [9] in due categorie differenti: *top-down* e *bottom-up*. Le differenze principali fra i due approcci sono relative al grado di aggregazione dei dati e l'obiettivo finale. Pertanto, privilegiare una metodologia rispetto all'altra è funzione dello scopo dell'analisi, della disponibilità e della tipologia dei dati di input.

I modelli *top-down* funzionano come un modello *black-box* (2.1.2.) applicato ad una scala urbana e utilizzano dati aggregati, ciò implica che il sistema venga analizzato nel suo complesso senza dettagliare le singole parti. Inoltre, permette di indagare le relazioni esistenti tra il settore energetico e l'economia. I modelli *bottom-up*, al contrario, utilizzano dati disaggregati, aspetto che permette di stimare il consumo energetico di ciascun edificio per arrivare solo successivamente al valore finale dell'intera scena urbana, pertanto consente di produrre una più visione dettagliata del sistema.

1.2.2.1. Modelli top-down

I modelli *top-down*, come già accennato, sono basati su un approccio che consiste nel formulare una visione generale del sistema senza scendere nel dettaglio delle singole parti. Tale sistema complesso, viene semplificato attraverso una suddivisione in parti più piccole, al fine di far scaturire dall'obiettivo finale le strategie migliori per raggiungere l'obiettivo stesso. Pertanto, è possibile dimostrare matematicamente il raggiungimento del risultato senza che questo risulti legato alla conoscenza delle leggi fisiche che governano il fenomeno.

Per quanto riguarda il settore energetico riferito all'ambito residenziale, questi modelli sono basati su un bilancio tra il consumo storico di energia e il consumo stimato sulla base delle variabili di input. A tal proposito, uno dei punti a favore dei modelli *top-down* risulta essere l'uso di dati energetici aggregati per la stima del consumo energetico, in quanto ampiamente disponibili, mentre la generalizzazione delle condizioni esistenti e la dipendenza dai dati storici costituiscono gli aspetti a sfavore di questa tipologia di modelli.

Altri aspetti interessanti dell'approccio *top-down* risultano essere la possibilità di considerare gli effetti socioeconomici e il fatto di poter valutare la relazione tra l'uso di energia a livello urbano e gli effetti tecnologici, demografici e macroeconomici. In aggiunta è possibile proiettare lo studio sul lungo termine ai fini di determinare i requisiti di fornitura dell'energia.

Esistono due gruppi di modelli *top-down*, i modelli econometrici e i modelli tecnologici. I primi sono basati sul prezzo - ad esempio quello dell'energia - e sul reddito, mentre i secondi attribuiscono un determinato consumo di energia ad alcune caratteristiche generali come ad esempio l'uso degli elettrodomestici. Si fa notare come nonostante si faccia riferimento a due modelli distinti, questi risultino dipendenti fra loro in quanto una variazione di uno comporta una variazione anche dell'altro.

1.2.2.1.1. Modello econometrico

A differenza del modello tecnologico, che si basa sul consumo e sulle fasi del ciclo di vita degli apparecchi elettronici, il modello econometrico si basa sulla teoria macroeconomica. Il suo scopo, seguendo un calcolo statistico, è quello di determinare l'influenza che le variabili economiche hanno sugli effetti delle strategie energetiche messe in atto. A tal proposito, è possibile prevedere statisticamente la domanda energetica urbana attraverso equazioni di regressione lineare e in funzione delle diverse variabili economiche come il reddito pro capite, il costo del combustibile e il prodotto interno lordo, al fine di esprimere le connessioni tra il settore energetico e quello economico.

Tale modello presenta alcuni aspetti negativi. Come accennato nella sezione 2.2.2.1., sono necessari dati storici aggregati che si assume rimangano invariati nel tempo [14], questo aspetto potrebbe portare a errori nei risultati, errori che Swan e Ugursal [9] affermano non essere significativi relativamente al settore residenziale. Inoltre, l'uso di dati aggregati rende impossibile valutare singolarmente l'incidenza di un singolo parametro a causa della multi-collinearità della metodologia ma semplifica il metodo di calcolo del modello, questo aspetto in particolare costituisce un vantaggio in quanto è più semplice reperire tali dati rispetto a dati non aggregati. Un altro punto a sfavore riguarda le discontinuità tecnologiche - il modello non ha la capacità intrinseca di modellare i cambiamenti discontinui tecnologici - e la mancanza di dati relativi all'involucro e agli impianti che non consente ai pianificatori energetici di elaborare scenari specifici. Questi modelli infatti, si focalizzano sulle relazioni macroeconomiche osservate nel passato a scapito delle informazioni tecnologiche e dei fattori fisici che influenzano la domanda energetica.

Il modello econometrico può essere utilizzato con finalità differenti in base alle quali verranno scelti diversi parametri di input. Un esempio è ovviamente il calcolo della domanda energetica urbana che può essere riferita a differenti scale come quella provinciale, regionale o nazionale ed è necessaria per operare le scelte più corrette per la pianificazione di scenari di riqualificazione il cui fine ultimo è quello della riduzione dell'uso di energia e dell'impatto ambientale.

1.2.2.2. Modelli bottom-up

Diversamente dai *top-down*, nei modelli *bottom-up* le singole parti del sistema vengono dettagliate e successivamente messe in connessione per formare componenti più grandi, connessi a loro volta per comporre il sistema completo. Quindi, partendo dal punto iniziale è possibile giungere all'obiettivo finale tramite un percorso sequenziale articolato in diversi passaggi. Riferendosi al contesto energetico relativo all'ambito residenziale, l'approccio *bottom-up* rappresenta la risoluzione analitica delle equazioni di bilancio termico tenendo presente che le variabili di input vengono influenzate dal contesto, mentre il comportamento della variabile è legato a quello degli altri parametri.

Lo scopo di questi modelli è quello di individuare il contributo del singolo edificio al consumo energetico dell'area urbana considerata e per arrivare a tale risultato sono necessari dati di input disaggregati che risultano essere difficilmente reperibili. Infatti, a differenza dei modelli *top-down*, i *bottom-up* fanno riferimento a dati energetici empirici attuali, consentendo una rappresentazione più realistica del consumo energetico urbano [1], pertanto non è necessario ricorrere a dati storici per la stima del consumo energetico in quanto questo viene effettivamente calcolato.

Uno degli aspetti più vantaggiosi dell'utilizzo di tali modelli è rappresentato dalla possibilità di tenere conto fra i dati di input, del comportamento degli occupanti e degli apporti gratuiti di calore dovuti alla radiazione solare, oltre che alle proprietà geometriche e le caratteristiche dell'involucro dell'edificio e alla tipologia e all'utilizzo di apparecchi ed elettrodomestici, dati invece mancanti nei modelli *top-down*. Inoltre, individuando i consumi energetici di ogni uso finale è possibile identificare gli scenari su cui è opportuno operare dei miglioramenti. Di contro, i limiti dei modelli *bottom-up* sono costituiti dalla semplificazione dei sistemi costruttivi, degli effetti del microclima e della definizione del contesto urbano.

La varietà dei dati di input fa sì che questi modelli vengano divisi in gruppi differenti, pertanto è possibile individuare i metodi statistici (SM), i metodi ingegneristici (EM) e i modelli ibridi. I primi sono basati su analisi di regressione e dati storici e permettono di stabilire relazioni tra il consumo energetico e gli usi finali di energia del singolo edificio, al fine della stima del consumo energetico urbano. I secondi invece, considerano il consumo energetico degli usi finali sulla base delle potenze nominali e sull'uso degli impianti. Inoltre, si basano sulle caratteristiche dell'abitazione e sugli usi finali per risalire al consumo energetico in base ai principi termodinamici e alle caratteristiche di utilizzo e di scambio termico.

1.2.2.2.1. Metodo statistico

Come già accennato, il metodo statistico costituisce uno dei due approcci alla metodologia *bottom-up*, ed è fondato su un calcolo di regressione e su dati storici al fine di produrre una stima del fabbisogno energetico urbano.

Questo metodo utilizza un approccio *black-box*, ovvero ogni edificio viene considerato come una *black-box* (vedi sezione 2.1.2.) e i dati di output -consumo energetico, dati meteo, informazioni geometriche e costo dell'energia- relativi ad ognuno di questi edifici vengono utilizzati come input per calcolare il risultato relativo all'intero modello urbano. A tal proposito, alcuni dati di input necessari per i calcoli sono ricavabili dalla fatturazione dell'energia utilizzata dagli utenti oppure tramite sopralluoghi. Nel primo caso è possibile che si renda necessario ricorrere ad alcune trasformazioni statistiche per valutare singolarmente l'influenza delle variabili che hanno presentato una multi-collinearità all'interno della funzione.

Secondo gli studi di Swan e Urgusul [9], per la stima della domanda energetica urbana esistono tre tecniche statistiche differenti: la regressione, la *Conditional Demand Analysis* (CDA) e la *Neural Network* (NN).

La prima tecnica può essere caratterizzata da linearità – semplice, multipla o quadratica - o da non-linearità e permette di determinare i coefficienti del modello che costituiscono i parametri di input, attraverso l'analisi di regressione. Sostanzialmente si fa regredire il consumo energetico aggregato della singola abitazione sulla base di parametri o combinazioni di essi che influenzano il consumo energetico.

Anche la seconda tecnica è fondata sull'analisi di regressione ma in questo caso la regressione avviene sulla base dello studio della presenza degli apparecchi all'interno delle abitazioni, indicati come variabili, mentre i coefficienti che vengono determinati indicano il livello di utilizzo e il *rating*. Il vantaggio di questa tecnica risiede nella facilità di reperimento dei dati di input, sono però richiesti set di dati con proprietà differenti relative all'applicazione dell'intera area urbana di indagine. Pertanto, affinché i dati risultino affidabili, è necessario analizzare centinaia o addirittura migliaia di abitazioni. È possibile utilizzare questa tecnica per calcolare la domanda relativa al riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria e al consumo elettrico.

La terza tecnica, nota anche come *Artificial Neural Network* (ANN), si basa su un modello matematico semplificato fondato sulla struttura parallela delle reti neurali biologiche. Questa stabilisce una rete di connessioni complesse secondo cui tutti gli utenti finali sono in grado di influenzarsi vicendevolmente tramite una serie di neuroni paralleli, ognuno dei quali possiede una serie di coefficienti che vengono multi-

plicati per i valori degli strati precedenti. Essendo un modello parallelo, i coefficienti sono privi di un significato fisico.

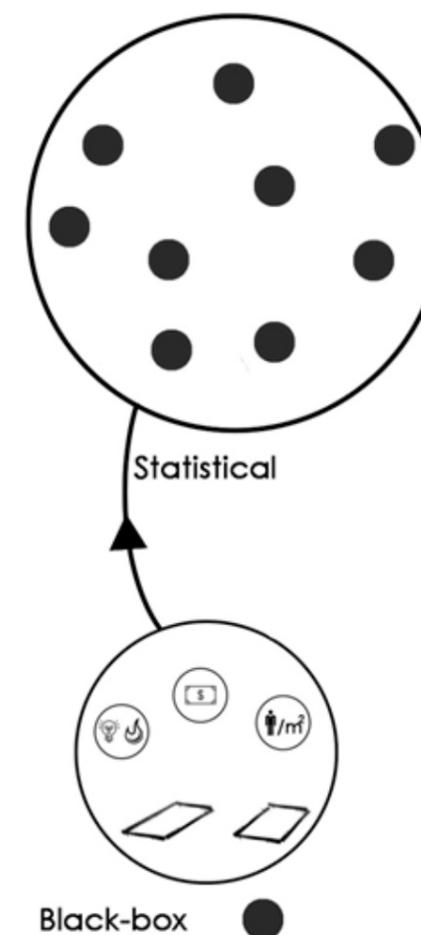


FIG.4-FUNZIONAMENTO DEL METODO STATISTICO.
 FONTE: A.MAGYARI, K.V.VIZI, CITY-SCALE ENERGY
 MODELLING-COMPARATIVE REVIEW OF CITY-
 SCALE ENERGY BUILDING APPROACHES, 2016.

1.2.2.2.2. Metodo ingegneristico

Il secondo approccio alla metodologia *bottom-up* è il metodo ingegneristico e si basa sulla risoluzione delle equazioni di bilancio e tratta gli edifici secondo l'approccio *white-box* (2.1.1.), pertanto sono necessari dati di input con un grado di dettaglio maggiore. Questo metodo è l'unico che permette di arrivare al calcolo del consumo energetico senza alcun dato storico perciò, risulta particolarmente adatto per la modellazione di nuove tecnologie di cui, ovviamente, non sono disponibili dati storici.

In questo caso i parametri di input sono ricavabili tramite misurazioni effettuate durante rilievi o attraverso riferimenti empirici. Gli input presi in considerazione sono i dati climatici, le proprietà geometriche, le caratteristiche termofisiche ma anche il comportamento degli occupanti che influenza notevolmente il consumo energetico totale. A tal proposito, uno dei limiti del metodo ingegneristico è relativo ai fattori comportamentali. Infatti, mutando i fattori demografici, nello specifico relativi all'invecchiamento, mutano anche le condizioni di occupazione delle abitazioni.

Secondo lo studio di Swan e Ugrasul [9], il metodo ingegneristico relativo all'ambito residenziale, viene classificato secondo tre tecniche differenti: la tecnica delle distribuzioni, quella degli archetipi e quella del campione.

La prima fa riferimento allo studio delle distribuzioni delle proprietà e all'uso degli apparecchi per calcolare il consumo energetico totale a livello regionale o nazionale in funzione di diversi parametri come l'efficienza e il consumo. Questa tecnica non considera le interazioni tra gli usi finali in quanto vengono calcolati separatamente, ma si fonda su dati disaggregati, pertanto questo approccio viene classificato come *bottom-up*.

La seconda viene utilizzata per classificare il patrimonio edilizio in funzione di archetipi cioè, unità base che vengono considerate rappresentative del patrimonio edilizio, che vengono definiti in base a diversi parametri come ad esempio l'anno di costruzione, le dimensioni e la tipologia edilizia. Pertanto, è possibile sviluppare diversi archetipi e utilizzare le proprietà ad essi relative come dati di input per la modellazione energetica su scala urbana. Le stime del consumo energetico dei singoli archetipi vengono ridimensionate per essere rappresentative dell'intero stock edilizio, moltiplicando il valore ottenuto dal calcolo relativo al singolo archetipo per il numero di edifici che corrispondono all'archetipo.

La terza invece, fa riferimento ad un campione reale di edifici ritenuto rappresentativo, disponibile grazie ad un database. Applicando opportune ponderazioni è possibile stimare il consumo energetico urbano estendendo agli edifici simili il valore relativo

al campione rappresentativo. A tal proposito, questa tecnica richiede un database di dimensioni ingenti per poter rappresentare al meglio lo *stock* abitativo presente in un determinato territorio. Si fa notare che, mentre la seconda tecnica restituisce una rappresentazione limitata, legata alla quantità di archetipi definiti, la tecnica del campione ricorre all'uso di campioni reali di edifici proprio allo scopo di restituire la varietà delle tipologie edilizie al meglio. Dal momento che necessita di un gran numero di dati, la sua applicazione è limitata.

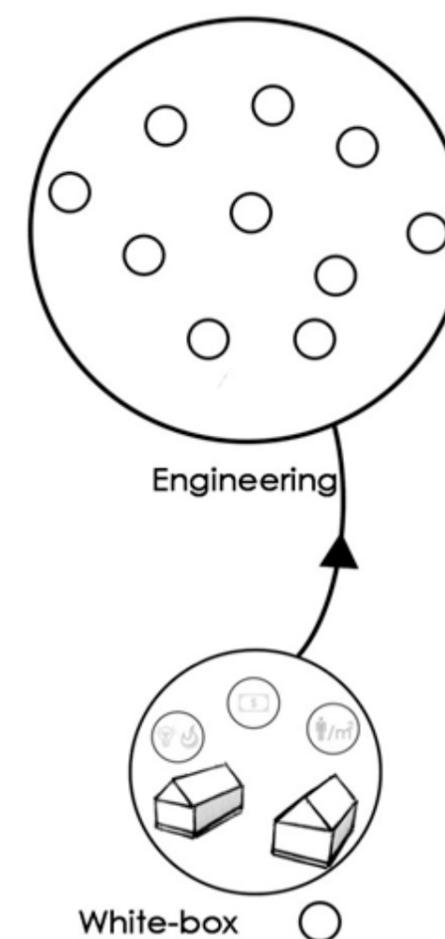


FIG.5-FUNZIONAMENTO DEL METODO INGEGNERISTICO.
 FONTE: A. MAGYARI, K.V. VIZI, CITY-SCALE ENERGY MODEL-
 LING-COMPARATIVE REVIEW OF CITY-SCALE ENERGY
 BUILDING APPROACHES, 2016.

1.2.2.2.3. Modelli ibridi

I modelli ibridi sono modelli avanzati che nascono per superare le carenze dei modelli statistici e ingegneristici attraverso l'integrazione dei due. In questo caso gli edifici vengono trattati in parte con il metodo *black-box*, in parte con il metodo *white-box* ed in parte con il *grey-box*.

Un esempio di tale metodologia è il modello CHREM che si basa su 17000 archivi dettagliati che implementano le reti neurali. È composto da due modelli per la stima energetica, sia fisici che statistici che vengono utilizzati per il calcolo relativo a riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, elettrodomestici e illuminazione.

Il CHREM utilizza il modello di rete neurale, calibrato sulla statistica, per la stima del fabbisogno dell'acqua calda sanitaria, degli elettrodomestici e dell'illuminazione in quanto sono aspetti influenzati dal comportamento degli occupanti.

Per il calcolo del fabbisogno per riscaldamento e raffrescamento invece, ricorre a modelli *physics-based*. [10]

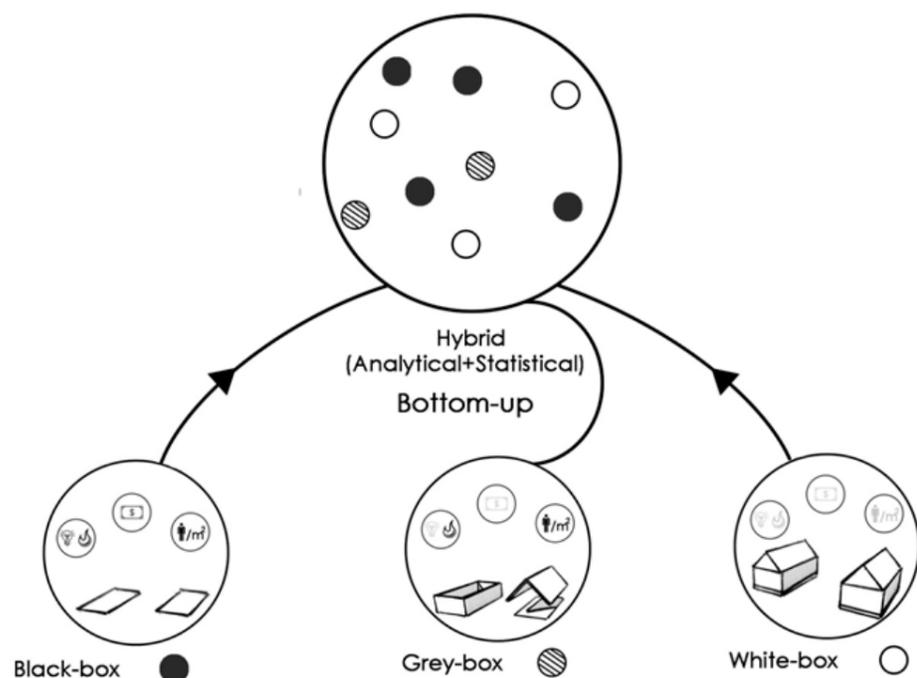


FIG.6-FUNZIONAMENTO DEL METODO IBRIDO.
 FONTE: A. MAGYARI, K. V. VIZI, CITY-SCALE ENERGY MODELLING-COMPARATIVE REVIEW OF CITY-SCALE ENERGY BUILDING APPROACHES, 2016.

1.3. CONFRONTO STRUMENTI BEM E UBEM

Sia gli strumenti BEM che quelli UBEM sono costituiti da differenti fasi, ovvero lo sviluppo dei modelli energetici degli edifici, la definizione delle proprietà geometriche e non geometriche e la simulazione del modello tramite un motore di simulazione, ma presentano alcune differenze fra loro e nel caso specifico di uno strumento UBEM risultano più complesse. Pertanto, lo scopo di questo paragrafo è quello di analizzare le principali disuguaglianze per favorire un confronto fra i due strumenti che evidenzino le approssimazioni che vengono assunte dagli strumenti riferiti al contesto urbano rispetto a quelli riferiti al singolo edificio.

1.3.1. SVILUPPO DEL MODELLO TRIDIMENSIONALE

Come già accennato precedentemente, per entrambi gli strumenti è necessaria la descrizione geometrica degli edifici.

Nel caso di un UBEM, la maggior parte degli studi fa riferimento a informazioni catastali standard attraverso cui vengono generati modelli tridimensionali detti "a scatola" ed equivalenti ad un LOD1 secondo la classificazione dell'*Open Geospatial Consortium* [16], ovvero l'estrusione in altezza dell'impronta a terra dell'edificio. Nel caso in cui lo scopo dello studio sia quello del potenziale solare, allora si ricorre ad un livello LOD2 che implica la definizione effettiva della forma dell'edificio o LOD2+ nel caso in cui vengano modellati anche gli elementi aggettanti e gli abbaini.

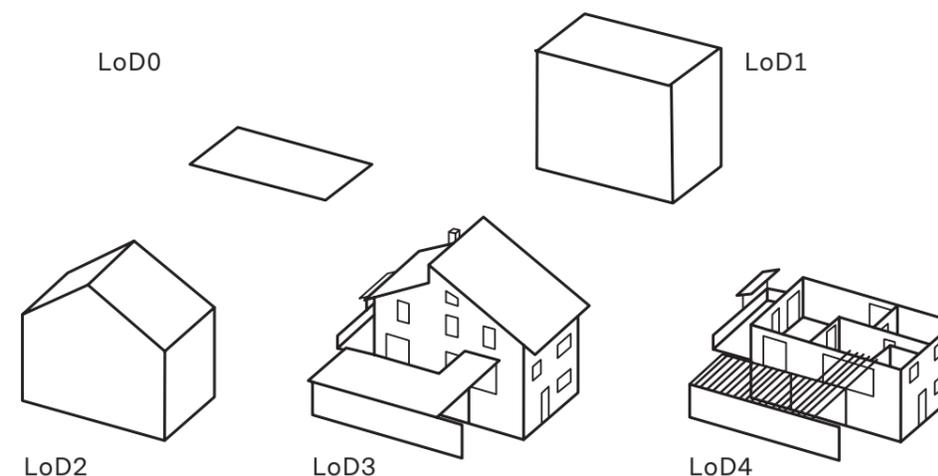


FIG.7-CINQUE LIVELLI DI DETTAGLIO PER RAPPRESENTARE UN EDIFICIO.

Ovviamente il modello “a scatola” genera un errore dovuto alla forma che può essere facilmente corretto utilizzando alcuni dati come attributi non geometrici della geometria stessa. Tali semplificazioni vengono assunte in quanto un modello complesso e dettagliato riferito ad una scala urbana renderebbe i tempi di calcolo eccessivamente lunghi, quindi all’aumentare del numero di edifici modellati corrisponderà una diminuzione del livello di dettaglio (LOD) del modello tridimensionale. Pertanto, si può concludere che non sia necessario un LOD elevato per uno strumento UBEM, in quanto alcuni dettagli tridimensionali risultano superflui ai fini di una simulazione energetica.

Al contrario invece, gli strumenti BEM supportano la modellazione di geometrie complesse fino ad un LOD4 che prevedono un grado di accuratezza che arriva alla definizione delle partizioni interne.

1.3.2. SIMULAZIONE DEL MODELLO

Sia per gli strumenti BEM che per gli UBEM, tutti i dati di input definiti nelle fasi precedenti vengono inseriti all’interno di un motore di simulazione che elabora e simula i modelli termici in relazione ai parametri meteorologici, anch’essi definiti in precedenza.

Però, a differenza dei modelli BEM in cui la caratterizzazione dei dati meteo avviene in modalità diverse a seconda della tipologia di software utilizzato, i modelli UBEM considerano l’influenza del contesto urbano sulla radiazione incidente, attraverso modelli radiativi. Inoltre, viene considerato il fenomeno di origine antropica relativo alle isole di calore urbane che comportano una variazione localizzata del microclima urbano e pertanto devono essere tenute in conto nella simulazione del modello per far sì che rispecchi il più possibile alla situazione reale. Quindi, sarà necessario valutare i set di dati meteo ottenuti nel caso in cui la stazione di riferimento non si trovi all’interno dell’area di indagine.

1.3.3. DEFINIZIONE DELLE PROPRIETÀ TERMOFISICHE

Un’altra differenza fra i due modelli è costituita dalla definizione delle proprietà termofisiche relative all’edificio.

Negli strumenti BEM l’edificio è fortemente caratterizzato, mentre in un UBEM questo processo viene semplificato ricorrendo all’uso di archetipi. Come già spiegato in precedenza, gli archetipi sono edifici prototipo rappresentativi dei volumi modellati che vengono utilizzati per caratterizzare rapidamente lo *stock* urbano. Per arrivare

alla definizione di un archetipo è necessario un numero ingente di dati, perciò nel caso in cui tali dati non siano totalmente disponibili è possibile ricorrere ad archetipi predefiniti già integrati all’interno dei software. Per associare un archetipo ad un edificio, si ricorre all’analogia con i dati disponibili quali l’anno di costruzione, la tipologia edilizia, la destinazione d’uso ed il contesto climatico. [15]

Nello specifico:

-per quanto riguarda la definizione delle proprietà termofisiche relative all’involucro opaco, all’interno degli strumenti BEM queste vengono definite in relazione alla tipologia di materiali utilizzati e la modellazione dei componenti viene definita univocamente. Con strumenti UBEM invece, è possibile assegnare un’unica stratigrafia per ogni componente di involucro, pertanto si assume che tutti i componenti verticali e orizzontali siano uguali fra loro, cosa che ovviamente non corrisponde alla situazione reale ed implica una semplificazione del modello.

-per quanto riguarda la definizione delle proprietà termofisiche relative all’involucro trasparente, nel caso di un BEM vengono definite in funzione della tipologia di telaio e vetro, mentre la posizione del serramento rispetto alla facciata è definita univocamente. Nel caso di un UBEM invece, la posizione del serramento non può essere scelta ma avviene a partire dal baricentro della facciata, inoltre la trasmittanza del telaio non viene considerata in quanto può essere definita solo quella relativa al componente vetrato.

-per quanto riguarda la definizione delle proprietà termiche relative agli elementi oscuranti, nel caso dei BEM vengono definite in funzione della tipologia di oscurante. Nel caso degli UBEM invece, non possono essere definiti nello specifico ma è possibile introdurre un fattore correttivo che tenga conto della presenza o meno del sistema oscurante.

-infine, possono essere definiti i ponti termici. Nel caso BEM si ricorre all’utilizzo dell’atlante dei ponti termici, nel caso UBEM non vengono considerati ma è possibile introdurre anche in questo caso un fattore correttivo che tenga vada ad incrementare la trasmittanza del componente interessato.

1.3.4. DESCRIZIONE DELL' IMPIANTO

Anche nel caso della definizione della tipologia di impianto esistono differenze fra i due modelli.

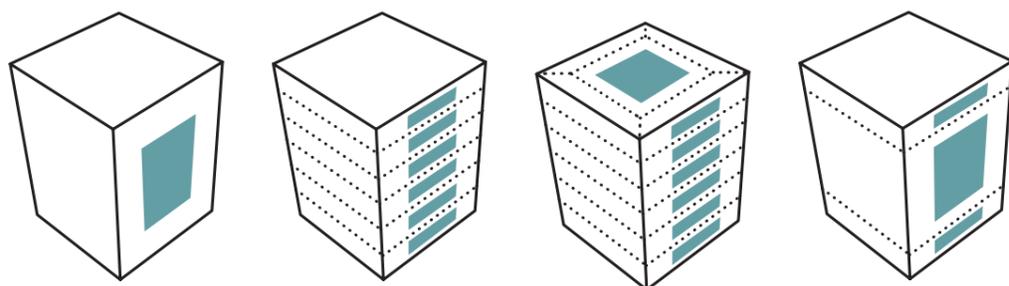
All'interno di un BEM l'impianto viene considerato per via analitica tenendo conto del calcolo delle perdite relative a tutti i sottosistemi presenti. All'interno di un UBEM invece, lo scopo è quello di definire il consumo energetico approssimativo, trascurando le perdite dei sottosistemi e ponendo l'attenzione sulla tipologia e sulle caratteristiche principali del generatore.

1.3.5. DEFINIZIONE DELLE ZONE TERMICHE

La definizione delle zone termiche avviene in modalità differenti a seconda dello strumento.

Nei modelli elaborati attraverso strumenti BEM vengono definite tutte le zone termiche presenti all'interno di un edificio.

Nel caso degli UBEM invece, esistono modelli semplici che prevedono la definizione di una singola zona termica per definire il comportamento termico di un intero edificio -aspetto che riduce di molto i tempi di calcolo ma influenza in modo negativo il risultato- e modelli più complessi detti modelli multizona, che sono in grado di cogliere meglio l'influenza del microclima e del contesto urbano sulle prestazioni termiche. Riferendosi ai modelli più complessi, è possibile individuare differenti configurazioni di definizione delle zone termiche, le più comuni sono tre. La prima prevede la



^
FIG.8-DIFFERENTI CONFIGURAZIONI DELLE
ZONE TERMICHE.

presenza di una singola zona termica per ogni piano dell'edificio [12], la seconda prevede la suddivisione dell'edificio in cinque zone differenti: una centrale e quattro perimetrali [16].

Dal momento che queste suddivisioni aumentano la complessità del modello aumentandone il tempo di calcolo, solitamente l'edificio viene suddiviso in tre zone termiche: la prima in corrispondenza del primo piano, la seconda in corrispondenza dell'ultimo e la terza in corrispondenza dei piani centrali. Questa configurazione permette di ottenere un buon compromesso fra i tempi di calcolo e l'accuratezza dei risultati.

1.3.6. PROFILI OCCUPAZIONALI

In entrambi i casi è necessario definire il comportamento degli occupanti in quanto la loro presenza all'interno degli edifici influenza l'utilizzo degli apparecchi e i tassi di ventilazione che a loro volta incidono sul consumo energetico finale.

Nel caso di un BEM il comportamento degli occupanti può essere definito in modo deterministico o stocastico e in entrambi i casi è possibile individuare un modello basato sul numero di persone o sulla superficie dell'appartamento.

Anche nel caso degli UBEM il comportamento degli occupanti può essere definito in maniera deterministica o stocastica ma in questo caso è possibile valutare l'interazione di ciascun occupante relativamente al contesto urbano.

1.3.7. VALIDAZIONE DEL MODELLO

Come già discusso in precedenza (2.2.1.3.), la validazione del modello nel caso di un UBEM è necessaria e ciò per due motivazioni: la prima riguarda le semplificazioni che vengono apportate al modello e la seconda riguarda la dipendenza dello stock urbano dagli archetipi.

Rappresentare il patrimonio edilizio attraverso un numero ridotto di archetipi restituisce in modo errato la complessità urbana e la diversità dei modelli di utilizzo. Pertanto, è necessario verificare l'affidabilità dei risultati ottenuti dalla simulazione confrontandoli con quelli di consumo reale.

Nella tabella riportata alla pagina seguente vengono riassunte schematicamente le congruenze e le differenze fra i due strumenti di modellazione, descritte dettagliatamente in questa sezione.

>
TAB.1-RIEPILOGO DEL CONFRONTO BEM E UBEM.

Caratteristiche	BEM	UBEM
<i>Sviluppo del modello 3D</i>	Modellazione dettagliata delle geometrie (LOD4).	Modellazione detta “a scatola” (LOD1, in casi specifici LOD2).
<i>Simulazione del modello</i>	- La caratterizzazione dei dati climatici avviene in funzione del <i>software</i> utilizzato.	- Viene valutata l'influenza del contesto urbano sulla radiazione incidente. - Viene valutato il fenomeno delle isole di calore urbane.
<i>Definizione delle proprietà termiche:</i>		
- <i>Involucro opaco</i>	Definite univocamente e in funzione della tipologia di materiali.	È possibile assegnare un'unica stratigrafia per ogni componente dell'involucro (chiusure verticali ed orizzontali)
- <i>Involucro trasparente</i>	- Definite univocamente e in funzione della tipologia di telaio e di elemento vetrato. - È possibile definire univocamente la posizione rispetto alla facciata. - È possibile modellare la dimensione del telaio e del componente vetrato.	- È possibile definire unicamente la trasmittanza del componente vetrato. - Non è possibile indicare la trasmittanza del telaio. - È possibile definire un'unica tipologia di serramento per tutto l'edificio. - La posizione del serramento viene assegnata a partire dal barientro della facciata.
- <i>Schermature</i>	Definite in funzione della tipologia di schermatura.	Valutate attraverso un fattore correttivo da applicare al componente interessato.

- <i>Ponti termici</i>	Definiti numericamente tramite l'utilizzo dell'Atlante dei Ponti Termici.	Valutati attraverso un fattore correttivo da applicare ai componenti di involucro.
<i>Impianto</i>	- Valutato per via analitica. - Vengono considerati tutte le perdite dei vari sottosistemi presenti.	- Focus sulle caratteristiche e tipologia del generatore. - Non vengono considerate le perdite dei sottosistemi.
<i>Definizione delle zone termiche</i>	Definite nel dettaglio tutte le zone termiche presenti nell'edificio.	Definite tre configurazioni differenti: - individuazione di una singola ZT per ogni edificio. - individuazione di una singola ZT per ogni piano dell'edificio. - individuazione di cinque ZT per ogni edificio, una corrispondente al nucleo e quattro zone perimetrali. - individuazione di tre ZT per edificio, una corrispondente al piano terra, una all'ultimo piano e una per i piani centrali.
<i>Profili occupazionali</i>	- Valutati con modelli stocastici o deterministici. - Modelli basati sulle superfici o sul numero di occupanti.	- Valutati con modelli stocastici o deterministici. - Modelli basati sullo spazio.
<i>Validazione del modello</i>	- Non necessaria	Necessaria a causa: - delle semplificazioni adottate nel modello. - della dipendenza dello <i>stock</i> dagli archetipi.

1.4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] T.Hong, Y.Chen, X.Luo, N.Luo, S.H.Lee, *Ten question on urban building energy modeling*, Building and Environment 168 (2020), 2020.
- [2] Goy S., & Finn D., *Estimating demand response potential in building clusters*, Energy Procedia, 78, 3391–3396, 2015.
- [3] CRAWLEY D. B. et al., *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*, Energy and Buildings: 33 (4): 319-331, 2001.
- [4] Foucquier A., Robert S., Suard F., Stéphan L., & Jay A., *State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 272–288, 2013.
- [5] BAZJANAC V., CRAWLEY D. B., *Industry foundation classes and interoperable commercial software in support of design of energy-efficient buildings*, Building Simulation '99, 6th International IBPSA Conference: 661-667, Udagawa and Hensen, ed., Kyoto, Japan. September 13-15, In: Nakahara, Yoshida, 1999.
- [6] C.Reinhart, C.Davila, *Urban building energy modeling-a review of a nascent field*, Building and Environment, pp.196-202, 2016.
- [7] F.Johari, G.Peronato, P.Sadeghian, X.Zhao, J.Widén, *Urban building energy modeling: State of the art and future prospects*, Renewable and Sustainable, Energy Reviews 128 (2020), 2020.
- [8] Ballarini I., Corgnati S. P. e Corrado V., *Building Typology Brochure – Italy, Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana*, Luglio 2014.
- [9] Swan L. G. e Urgusal V. I., *Modeling of end use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1819-1835, 2009.
- [10] Djurovic-Petrovic M., Kavgic M., Mavrogianni A., Mumovic D., Stevanovic Z. e Summerfield A., *A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector*, Building and Environment 45 (2010) 1683-1697, 2010.

- [11] G.Tardioli, R.Kerrigan, M.Oates, J.O'Donnell and D.Finn, *Data driven approaches for prediction of building energy consumption at urban level*, Energy Procedia 78, pp. 3378-3383, 2015.
- [12] C.Davila, C.Reinhart and J.L. Bemis, *Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets*, Energy, Elsevier 117, pp. 237-250, 2016.
- [13] M.Kavgic, A.Mavrogianni, D.Mumovic, A.Summerfield, Z.Stevanovic, M.Djurovic-Petrovic, *A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector*, Building and Environment 45, pp.1683-1697, 2010.
- [14] Hourcade J.-C., Jaccard M., Bataille C., & Gherzi F., *Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges*, The Energy Journal, SI2006(01), 1–12, 2006.
- [15] M. Ferrando, F. Causone, T. Hong, Y. Chen, *Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics based approaches*, Sustainable Cities and Society 62 (2020), 2020.
- [16] Y. Chen and T. Hong, *Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models*, Appl Energy, vol. 215, pp. 717–735, 2018.

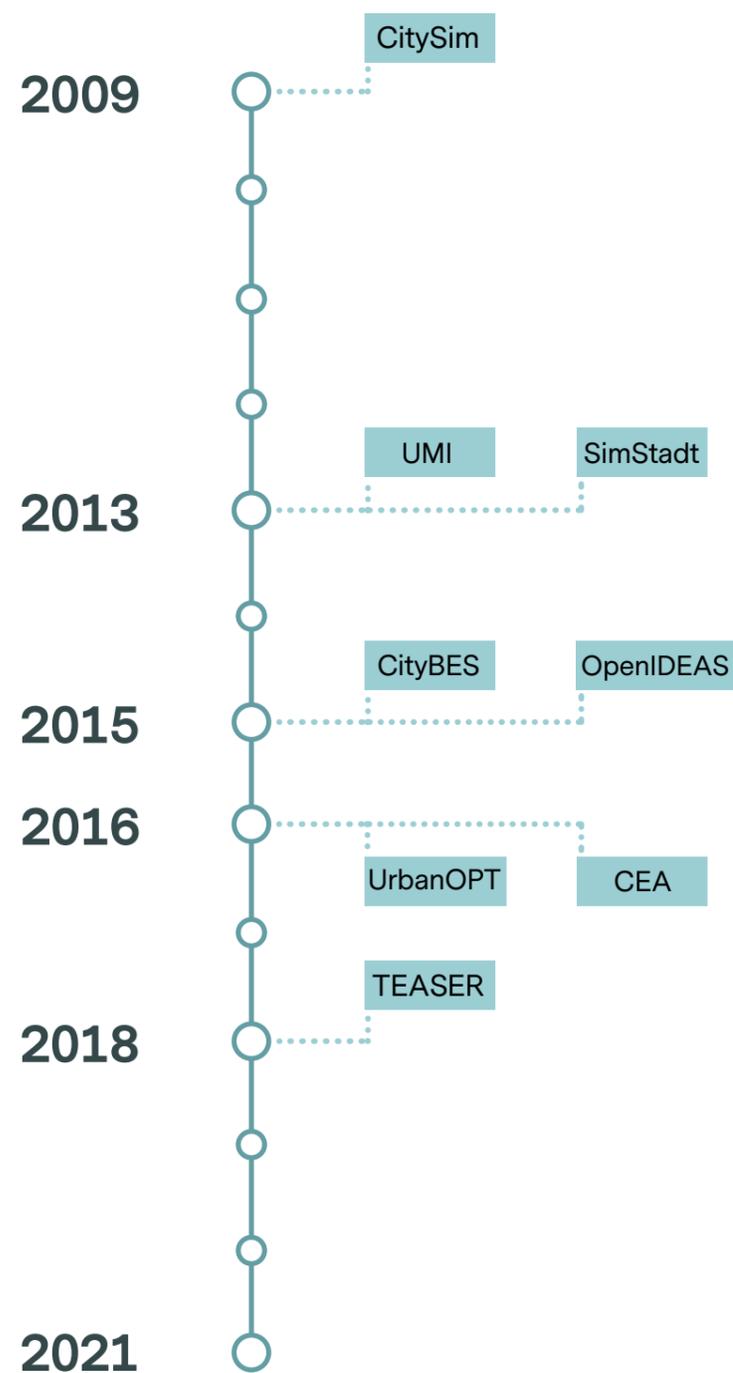


FIG.9-TIMELINE DELLO SVILUPPO DEI PROGRAMMI UBEM BOTTOM-UP.

2. SOFTWARE BOTTOM-UP

In questa sezione verranno presentati i principali software bottom-up attualmente disponibili per l'analisi energetica su scala urbana, con un accenno finale relativo ai programmi al momento in via di sviluppo e non ancora rilasciati pubblicamente.

Si specifica che i primi due programmi descritti, ovvero CitySim e CEA, sono stati oggetto di una analisi più specifica e dettagliata in quanto sono stati selezionati per l'applicazione diretta su un caso studio, discussa nei capitoli successivi.

Gli altri programmi descritti, ovvero UMI, SimStadt, CityBES, OpenIDEAS, UrbanOPT e TEASER, nonostante non siano stati applicati direttamente sono stati ugualmente riportati in modo da fornire una panoramica degli strumenti utilizzabili.

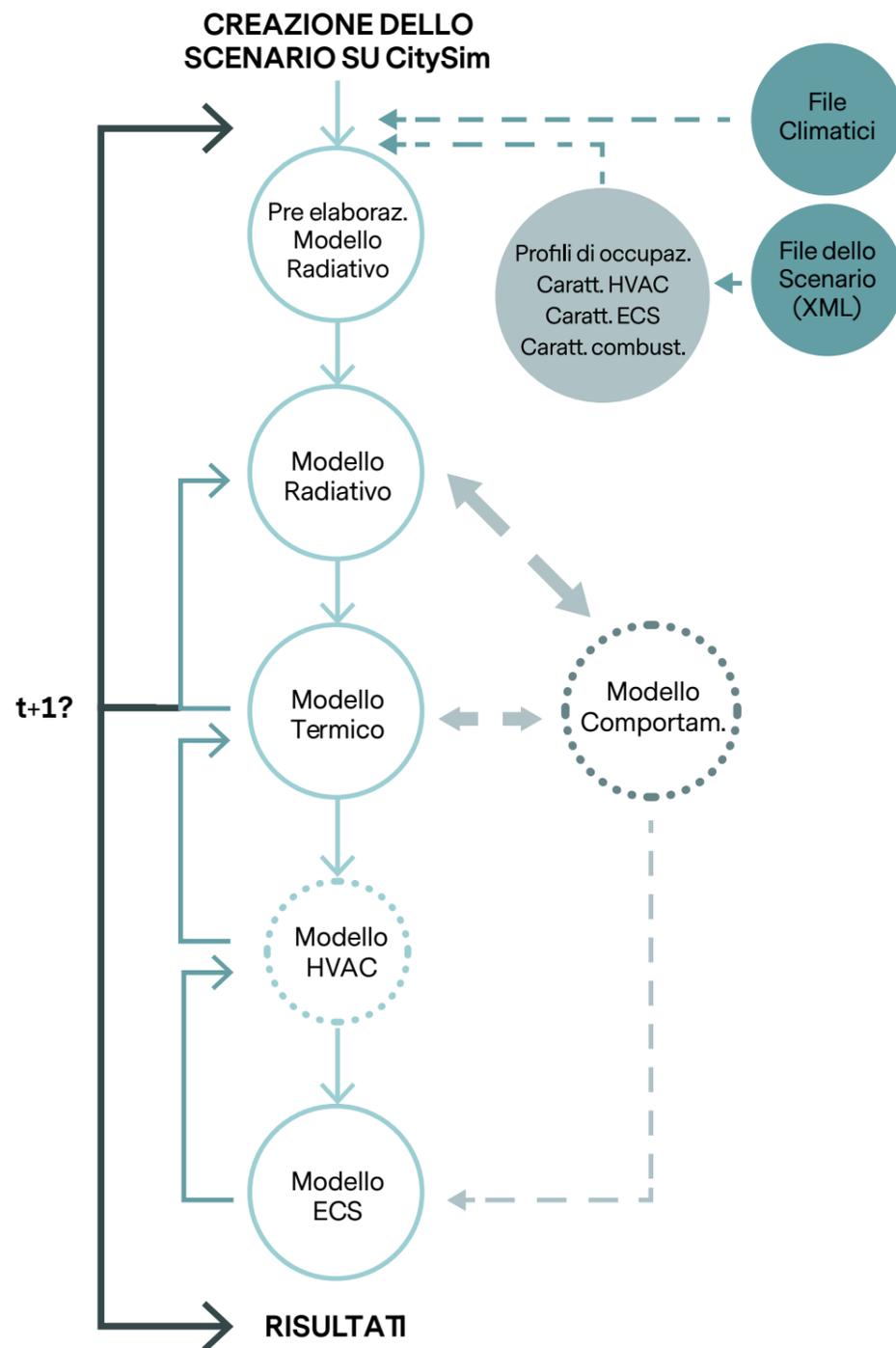
Questa sezione si conclude con alcune tabelle riepilogative relative unicamente ai programmi CitySim e CEA, che permettono una visione d'insieme delle similitudini e delle differenze dei due.

2.1 CITYSIM PRO

Il software *open-source* CitySim è stato sviluppato nel 2009 dal *Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB)* of EPFL (*École Polytechnique Fédérale de Lausanne*), sulla base del suo predecessore SUNtool.[19] È un programma di simulazione energetica dinamica su larga scala, basato sull'assunzione di un modello termico semplificato che consente un compromesso tra i dati di input necessari, l'accuratezza dei dati di output e i tempi di calcolo.[1]

CitySim evolve in CitySim Pro quando la compagnia Kaemco sviluppa un'interfaccia grafica (GUI) basata sul CitySim Solver. Il *software* mira a fornire un supporto decisionale ai pianificatori energetici urbani e ai committenti pubblici e privati.

Per eseguire una simulazione, in primo luogo è necessario importare la morfologia del terreno ed i dati climatici del sito oggetto di studio. Il software supporta due tipol-



ogge di file climatici uno con estensione CLI e uno con estensione HOR. Questi file sono ricavabili dal database Meteonorm che fornisce i dati climatici virtuali relativi alla località selezionata, facendo riferimento a serie storiche di venti anni di ampiezza. I dati meteo che si ottengono sono relativi all'anno meteorologico tipico (TMY), ovvero vengono ricavati tramite un'interpolazione dei parametri mediante un modello di calcolo stocastico.

Successivamente è necessario modellare il contesto urbano che poi verrà importato in CitySim PRO. A tale scopo è possibile utilizzare sia il software Rhinoceros che SketchUp infatti, CitySim PRO per la modellazione tridimensionale supporta le estensioni XML o DXF.

È necessario definire anche le caratteristiche generali - come ad esempio il tasso di ricambi orari dell'aria e la temperatura massima e minima all'interno dell'ambiente - e quelle termo-fisiche degli edifici. Questo passaggio può essere svolto tramite la singola selezione dell'edificio o tramite la selezione di gruppi di edifici con caratteristiche simili. Per quanto riguarda le proprietà termo-fisiche si fa notare che, a differenza dei componenti opachi, per quelli vetriati è possibile inserire una serie di informazioni limitate, ad esempio non vengono considerati il materiale e le dimensioni del telaio, la tipologia di gas presente nella vetrocamera e la presenza di vetri multipli.

Inoltre, possono essere inseriti i dati relativi ai carichi termici endogeni, quindi relativi agli occupanti, in particolare il loro numero massimo, il profilo di occupazione giornaliero e annuale e all'attività metabolica, ma anche le informazioni relative alla presenza di apparecchi elettrici e luminosi come ad esempio la loro potenza.

Infine, è possibile inserire i dati relativi agli impianti termici in maniera semplificata al fine di ottenere una stima della produzione di energia da fonti rinnovabili, ed in particolare relative ai pannelli fotovoltaici e solari, al volume, alla capacità termica e alle temperature in ingresso e in uscita del fluido termovettore dell'accumulatore.

Per la risoluzione del modello, il *software* si basa su quattro modelli di calcolo (3.1.1.). Il modello termico si fonda sull'analogia con un circuito elettrico costituito da resistenze e condensatori, le pareti vengono associate a diversi nodi di temperatura e a resistenze, mentre la conduttanza rappresenta l'inerzia termica. Per quanto riguarda il modello radiativo invece, il programma fa riferimento al *Simplified Radiosity Algorithm* di Robinson e Stone [4] che discretizza la volta celeste in *i*-esime parti, associando ad ognuna di esse un angolo solido noto.

Infine, grazie all'interfaccia grafica è possibile visualizzare i dati derivanti dalla simulazione attraverso scale di colore che indicano l'intensità del parametro selezionato. Questo aspetto rende immediata la lettura dei risultati e il programma più intuitivo.

Nelle ultime versioni CitySim è stato integrato con il *Multi-Agent Transport Simulation toolkit*, MATSim-T, per poter integrare l'analisi dei trasporti permettendo una simulazione dinamica del comportamento degli occupanti. [29]

2.1.1 MODELLO DI CALCOLO

Il modello di calcolo è basato su quattro modelli di base: il modello termico, il modello radiativo, il modello comportamentale e il modello di impianto e attrezzature.

2.1.1.1 Modello termico

Il modello termico è basato sulle analogie con un circuito elettrico, nello specifico su una rete resistore-condensatore.

Secondo questo modello una parete conducente viene rappresentata attraverso diversi nodi di temperatura, il flusso di calore scambiato tra la parete e l'aria esterna è rappresentato da una corrente elettrica che attraversa un resistore posto fra i due nodi corrispondenti, mentre l'inerzia della parete è rappresentata dalla capacità legata al nodo specifico.

Tale modello si riferisce ad una singola zona termica e viene sviluppato da Kämpf e Robinson nel 2007 come perfezionamento del modello di Nielsen del 2005.

Secondo Nielsen, per poter studiare le strategie di risparmio energetico è necessario utilizzare la temperatura dell'aria interna per controllare i sistemi inclusi nella progettazione di un edificio. Ai fini della semplificazione del calcolo e dell'aumento della sua velocità, la temperatura dell'aria interna controlla tutti i sistemi, mentre le

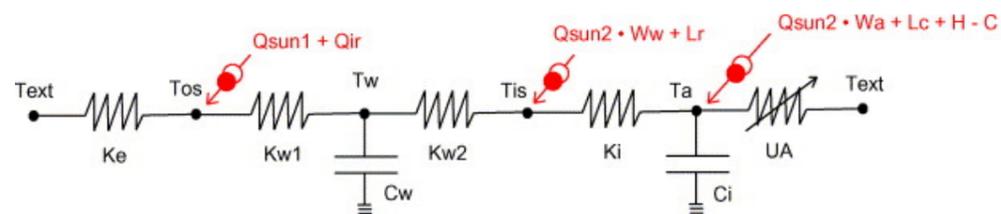


FIG.11-FUNZIONAMENTO DI UNA SINGOLA ZONA TERMICA.
FONTE: KÄMPF ET AL.

capacità termiche delle superfici interne, vengono raggruppate in un'unica capacità termica effettiva che scambia calore con le superfici interne. [31]

Pertanto, nel modello di Kämpf e Robinson, il nodo della temperatura dell'aria esterna Text è collegato al nodo della temperatura della superficie esterna Tos tramite uno stato liminare esterno con conduttanza Ke che varia in funzione della direzione e della velocità del vento.

Tos, che subisce flussi di calore dovuti allo scambio di onde corte e onde lunghe, è connesso al nodo di parete Tw avente capacità Cw, tramite una conduttanza definita dalla parte esterna della parete. Questo nodo funge da asse di simmetria, infatti, si ritrovano connessioni simili dal lato interno della parete dove è presente un nodo di aria interna Ta avente capacità Ci connesso ad un nodo di superficie interna Tis che subisce un flusso di calore ad onde lunghe dovuto agli apporti endogeni per irraggiamento ed un flusso ad onde corte dovuto alla radiazione solare trasmessa.

Il nodo Ta, che può essere soggetto ad apporti interni dovuti ai sistemi di riscaldamento e raffreddamento e ad apporti dovuti all'assorbimento per convezione di radiazioni ad onde corte, può essere connesso al nodo Text tramite resistenze variabili dovute alla ventilazione e ad infiltrazioni.

Per fare riferimento a più zone termiche invece, come avviene nel caso di un edificio, i nodi Ta di due zone adiacenti vengono collegati tramite la conduttanza della parete di separazione. È necessario considerare l'inerzia termica di tale parete, pertanto la sua capacità viene suddivisa ed assegnata alle capacità delle zone adiacenti. [1-5]

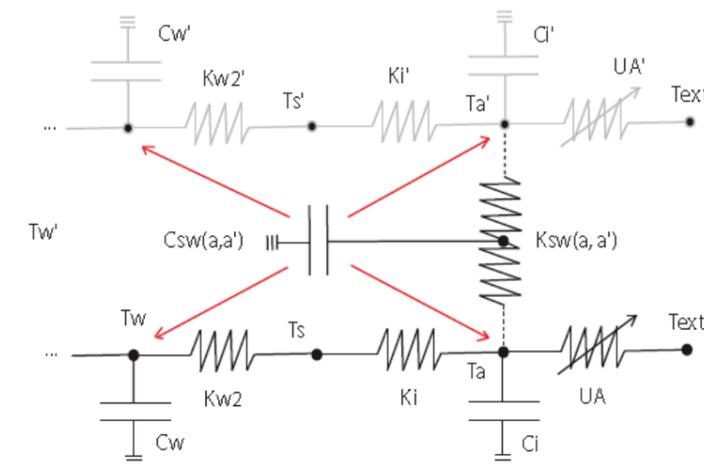


FIG.12-CONNESSIONE FRA PIÙ ZONE TERMICHE.
FONTE: KÄMPF ET AL.

2.1.1.2. Modello radiativo

Il *software* si basa sul *Simplified Radiosity Algorithm* (SRA) di Robinson e Stone [4], utilizzato per la l'irradianza ad onde corte incidente sulle superfici.

Tramite il modello di Tregenza la volta celeste viene suddivisa in 145 parti ognuna delle quali sottende un angolo solido e possiede un valore di luminosità, calcolata al centroide utilizzando il modello di Perez. Quindi, dato l'angolo medio di incidenza tra la parte di cielo e il piano ricevente avente una certa pendenza e considerando la porzione della parte *i*-esima visibile, è possibile calcolare l'irradianza diretta del cielo. [5]

L'irradianza diretta del fascio luminoso viene calcolata a partire dall'irradianza normale che incide su una superficie con un certo angolo, visibile direttamente dal sole solo per una certa quota.

Quindi, alla luminosità di una superficie contribuiscono l'irradianza del fascio luminoso e quella diretta della volta celeste. Tale luminosità, inoltre, produce un incremento dell'irradianza incidente di superfici ad essa visibili. Si fa notare come le difficoltà di questa espressione siano legate alla determinazione dei fattori di vista delle ostruzioni e del cielo.

Questo modello può essere usato anche per calcolare l'irradianza ad onde lunghe.

2.1.1.3. Modello comportamentale

Per i *software* di simulazione urbana, il comportamento degli utenti è una delle fonti maggiori di incertezza, in quanto stocastico. Quindi, la caratteristica principale del modello riguarda la presenza degli occupanti, che attraverso le loro azioni, influenzano i flussi di energia relativi alle sorgenti endogene. Il software è basato sull'ipotesi che ogni occupante agisca indipendentemente e che le sue azioni ad un determinato tempo, dipendano da quelle dell'immediato passato. Pertanto, vengono costruiti modelli giornalieri di presenza/assenza, sulla base dei quali vengono elaborati profili annuali.

Inoltre, è necessario considerare lunghi periodi di assenza. Per questo motivo, basandosi sul modello di presenza appena descritto, si ricorre ad un profilo giornaliero della probabilità che inizi una lunga assenza e un profilo per la probabilità cumulativa della durata della stessa.

2.1.1.4. Modello di impianto e attrezzature

Questo modello include sia i sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffrescamento (HVAC), sia i sistemi di conversione di energia (ECS).

I modelli relativi agli ECS - che comprendono modelli di accumulo termico per fluidi freddi/caldi, pompe di calore, sistemi di cogenerazione, caldaie, turbine eoliche, pannelli solari termici e fotovoltaici - includono tecnologie che forniscono e/o accumulano calore e/o elettricità.

I modelli relativi ai sistemi HVAC si basano sulla psicrometria dell'aria umida, facendo riferimento ad una miscela ideale di due gas perfetti, ovvero aria e vapore. È possibile calcolare il calore latente e sensibile fornito per ogni fase del riscaldamento e/o raffrescamento dell'aria, computando lo stato psicrometrico dell'aria fornita per ogni istante *i*-esimo e data la portata massica richiesta. Si ricavano tre equazioni di bilancio in massa, una che prevede la conservazione della portata entrante e di quella uscente, una che considera la condensazione possibile all'interno dello scambiatore di calore e una che stima la quota umida dovuta alla presenza di occupanti. [6]

2.1.2. DATI DI OUTPUT

I risultati possono essere esportati in formato numerico tramite file con estensione TSV e modificabili in Excel, o consultati tramite l'interfaccia grafica che fornisce diverse scale di colore relative ad un parametro selezionato. Gli output possono essere relativi a diversi intervalli di tempo, nello specifico orario, giornaliero, mensile o annuo.

2.2. CITY ENERGY ANALYST

Il programma è stato sviluppato nel 2016 dal gruppo A/S (Architettura e Sistemi edilizi) fondato e guidato da Arno Schlueter all'ETH (*Eidgenössische Technische Hochschule*) di Zurigo, partendo dalla tesi di dottorato di Jimeno Fonseca.

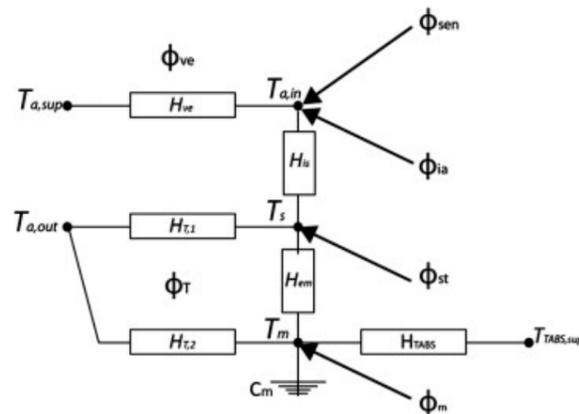
City Energy Analyst (CEA) è un software di simulazione energetica relativo alla scala urbana che differisce da quelli sviluppati precedentemente in quanto integra all'interno di uno stesso programma uno strumento UBEM e un USEM, ovvero si concentra specificamente sull'ottimizzazione, la progettazione e la descrizione dettagliata, in modo sia qualitativo che quantitativo, dei servizi energetici forniti al settore residenziale. Il programma, che si rivolge ai pianificatori urbanistici ed energetici, presenta un'innovativa interfaccia 4D che ha lo scopo di facilitare l'interpretazione dei risultati.

La metodologia di CEA si basa sullo sviluppo e l'integrazione di un modello ibrido di analisi della domanda energetica all'interno di ArcGIS. Tramite due modelli di calcolo *bottom-up*, uno statistico e uno analitico e utilizzando dati di input georeferenziati

relativi a scenari urbani esistenti o prevedibili, è possibile calcolare il fabbisogno orario di potenza e temperatura dei servizi energetici.

Uno degli obiettivi del programma è quello di ottenere risultati accurati, partendo dal numero minore possibile di input, a tal proposito sono state introdotte ventisei tipologie di variabili raggruppate in cinque database, delle quali solo undici sono obbligatorie per ottenere la simulazione di uno scenario urbano. [7]

Per quanto riguarda la risoluzione del modello, il software si basa su sei moduli di calcolo (3.2.2.). Il modulo di domanda, necessario per calcolare i carichi termici ed elettrici, è basato sulle norme UNI EN ISO 13790, UNI EN 15316 e sulla UNI EN 15241. Inoltre, si basa su un sistema R-C di ordine ridotto, costituito da sei resistenze e un condensatore secondo il modello di Fonseca [7].



Infine, per ottenere i valori finali è necessario aggregare i risultati individuali derivanti dal metodo analitico con quelli derivanti dal metodo statistico. In questo modo è possibile ottenere un valore medio annuo per ciascun servizio energetico che deve essere moltiplicato per il valore ottenuto normalizzando la domanda oraria di ogni servizio energetico in relazione alla sua domanda annua originale [7]. È quindi possibile visualizzare i risultati ottenuti grazie all'interfaccia 4D del programma che permette di facilitare il confronto simultaneo dei requisiti di potenza e temperatura per i diversi edifici.

Nella sua ultima versione 2.30, aggiornata al 2021, CEA dispone della possibilità di creare archetipi di base personalizzati, calcolare le emissioni incorporate e valutare la mobilità elettrica. Inoltre, sono disponibili due *plug-in*, uno per calibrare la domanda energetica rispetto ai dati misurati seguendo la linea guida ASHRAE 14-2014 e uno che permette di mappare le proprietà degli edifici tramite il database Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) dell'Ufficio Federale Svizzero per la topografia.

2.2.1. DATABASE

Come già accennato, CEA si basa su cinque database per attingere ai dati necessari per avviare una simulazione. Di seguito viene fornita una descrizione delle categorie di parametri contenuti in ognuno di essi.

2.2.1.1. Database meteo - WDB

Raccoglie i dati meteo ottenuti tramite il software Meteonorm.

2.2.1.2. Database urbano GIS - UGDB

Questo database contiene le informazioni georeferenziate dell'area scelta e degli edifici presenti al suo interno, ottenuti tramite Open Street Maps. Inoltre, sono presenti dati relativi alla geometria dell'edificio, al suo anno di costruzione, alla tipologia di sistemi di ombreggiamento e alla tipologia di occupante.

2.2.1.3. Database degli archetipi - ADB

Questo database definisce 172 differenti classi di edifici per ognuna delle quali definisce i dati caratteristici relativi alle stratigrafie, agli impianti e ai consumi energetici annui specifici. I valori sono basati su dati statistici raccolti per quanto riguarda gli edifici costruiti prima del 2005, mentre per quelli successivi è necessario un'interpolazione lineare dei dati. [16]

2.2.1.4. Database delle distribuzioni - DDB

Questo database contiene serie di dati temporali definiti per ciascuna delle sedici categorie di occupazione definite nell'ADB. I dati riguardano i tassi di ventilazione minimi, la temperatura e l'umidità di setpoint, i valori relativi al consumo orario specifico per illuminazione ed elettrodomestici e le portate volumetriche di acqua calda sanitaria e acqua dolce. [16]

2.2.1.5. Database delle misure - MDB

Contiene i dati necessari a stimare i servizi energetici non standardizzati per edifici ad uso industriale presenti nell'area di interesse.



FIG.13-MODELLO R-C DI UNA SINGOLA ZONA TERMICA.
FONTE: FONSECA ET AL.

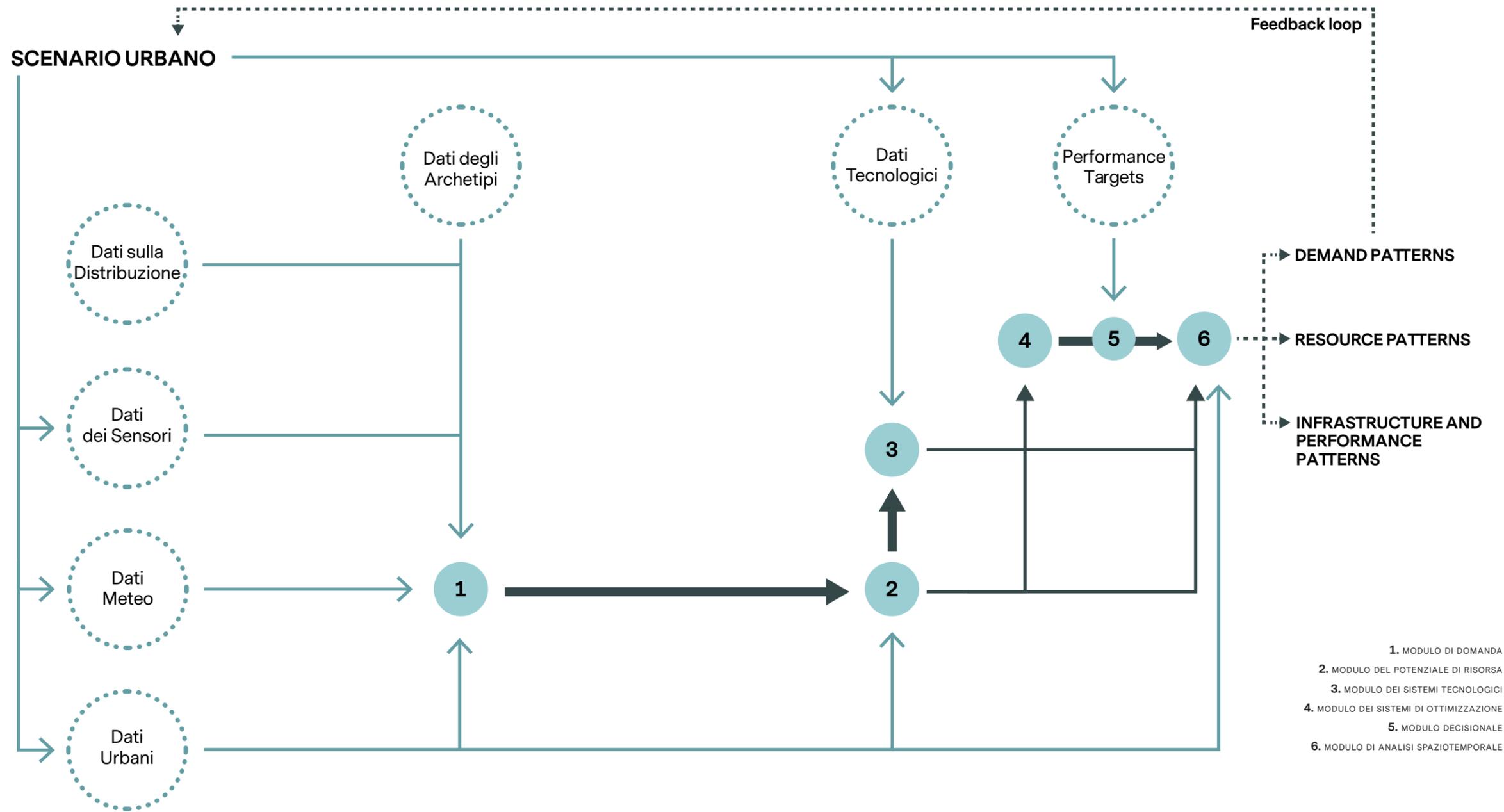


FIG.14-SCHEMA CONCETTUALE DEL FUNZIONAMENTO DI CEA.

2.2.2. MODELLO DI CALCOLO

Il *software* si basa su sei moduli di calcolo: il modulo di domanda, il modulo del potenziale di risorsa, il modulo di tecnologia dei sistemi, modulo di ottimizzazione dei sistemi di alimentazione, modulo decisionale e il modulo di analisi spaziotemporale.

2.2.2.1. Modulo di domanda

Con questo modulo è possibile calcolare il fabbisogno orario di potenza e temperatura dei servizi energetici degli edifici, per fare ciò sono stati integrati due modelli di calcolo *bottom-up*, uno analitico e uno statistico. Con il modello statistico vengono messi in relazione i valori specifici del consumo annuo degli edifici del patrimonio regionale con quelli dell'area considerata, mentre con quello analitico vengono integrati il metodo dinamico orario dell'ECS (*European Committee Standardization*) [8-9-10], il modello semplificato dei sistemi di condizionamento dell'aria di Kämpf [11] e il modello di emissione dei sottosistemi in uno stato quasi stazionario di Holst [12].

I carichi termici sensibili vengono calcolati secondo il metodo dinamico orario con la UNI EN ISO 13790 sulla base di un modello resistenza-capacità con cui è possibile discretizzare un edificio e le superfici che lo compongono in un circuito elettrico in cui sono presenti resistenze, condensatori che rappresentano le aree che ritardano il trasferimento di energia e nodi di temperatura che rappresentano l'inerzia termica del componente dell'involucro (Figura XXX). [13]

2.2.2.2. Modulo del potenziale di risorsa

Questo modulo valuta le fonti energetiche endogene, attraverso l'aggregazione di modelli fisici.

In particolare, considera:

- il potenziale solare sulla copertura, calcolato tramite l'algoritmo delle aree di visibilità emisferiche di Fu *et al.* [14], grazie a cui è possibile stimare la radiazione solare oraria sulle coperture.

I parametri che influenzano l'algoritmo, in quanto specifici di ogni area, sono calibrati in funzione dei dati meteo locali, al fine di aumentare il livello di accuratezza del modello. Le aree delle coperture vengono discretizzate in superfici rettangolari di dimensioni 2x2 metri e la radiazione solare viene calcolata al centroide sul piano orizzontale.

- il calore ambientale, valutato con il calore geotermico e il *lake-water potential*.

- le fonti di calore di scarto, derivanti dalla presenza di centri dati e dai processi industriali. Queste fonti vengono prese in considerazione per poter calcolare il potenziale di recupero del calore attraverso diversi scenari.

Nel primo caso, la simulazione oraria dell'eccesso di calore derivata dai centri dati raffreddati ad acqua, viene ricavata normalizzando il modello empirico di Ham *et al.* [15]

Nel secondo caso, il potenziale del recupero di calore della compressione dell'aria per la produzione di azoto viene calcolato con un sistema di equazioni. Basandosi sul primo principio della termodinamica, viene modellato un compressore a due fasi che permette di recuperare il calore a basse e medie temperature.

Nell'ultimo caso vengono calcolate la portate volumetrica e la temperatura delle linee fognarie, sia degli edifici che delle aree di raccolta circostanti. Ai fini del calcolo è necessario elaborare un profilo normalizzato delle portate massiche e delle temperature per ogni edificio in ogni area di raccolta e considerarlo rappresentativo rispetto alla linea regionale. [16]

2.2.2.3. Modulo dei sistemi tecnologici

Questo modulo comprende modelli techno-economici di differenti unità di produzione, stoccaggio e distribuzione di energia. CEA considera diverse tipologie di impianto, nello specifico si tratta di pompe di calore sia idriche che geotermiche, caldaie a condensazione, tecnologie combinate di calore ed energia, torri di raffreddamento, accumuli termici, sottostazioni e scambiatori di calore, pompe di circolazione e tecnologie solari che comprendono pannelli fotovoltaici, collettori solari e pannelli termici-fotovoltaici.

Con questo modello è possibile calcolare i costi di investimento, i costi operativi e i costi di manutenzione, per ognuno dei sistemi sopra citati.

2.2.2.4. Modulo di ottimizzazione dei sistemi di alimentazione

Questo modello comprende la rete termica e l'ottimizzazione delle sue dimensioni e del suo funzionamento.

Per quanto riguarda la rete termica, lo scopo è l'ottimizzazione ai fini di minimizzare i costi di investimento e quelli operativi. Per rappresentare una rete di riscaldamento e raffrescamento ottimale, è stato integrato un algoritmo sulla piattaforma ArcGIS che prevede la selezione di una griglia geometrica che connette un consumatore ad un produttore all'interno di una stessa area. Quindi, viene selezionato un produttore principale tra l'edificio con l'area di accumulo maggiore e quello con la domanda più alta.

L'ottimizzazione del funzionamento del sistema energetico invece, è basata sull'approccio di Weber *et al.* [17], per cui si ricorre ad una strategia di ottimizzazione a due livelli, una *Master routine* e una *Slave routine*, al fine di configurare un sistema energetico comunitario rispetto ai costi totali annui minimi (TAC), alle emissioni (CO₂) e al fabbisogno energetico primario (PEN).

La *Master routine*, consiste in un algoritmo evolutivo che varia il *set-up* del sistema con la migliore alternativa trovata in precedenza, a sua volta il *set-up* consiste in una rete con diversi utenti collegati ed una combinazione di unità di produzione e stoccaggio. La *Slave routine* invece, valuta il funzionamento di ogni *set-up* di sistema sulla base delle tre variabili precedenti: TAC, CO₂ e PEN.

2.2.2.5. Modulo decisionale

Questo modulo comprende diverse analisi.

La valutazione dell'affidabilità, necessaria per determinare i parametri influenti del modello, viene valutata attraverso il cambiamento di prezzo del gas naturale, del biogas e dell'elettricità. Ogni qual volta si verifica un aumento, il parametro viene rivalutato e vengono selezionate le configurazioni dominanti. L'affidabilità è data dal numero relativo di volte in cui la configurazione è risultata dominante rispetto ad altre. Il parametro a cui è associato il numero maggiore di configurazioni scartate, è il più sensibile.

L'analisi decisionale multicriterio invece, ha lo scopo di selezionare le configurazioni che massimizzano il valore sociale, economico e ambientale di un'area. Questi vengono considerati come criteri principali in aggiunta a sei sotto-criteri. Per ogni sotto-criterio vengono determinate e successivamente normalizzate, la valutazione peggiore e la migliore. L'opzione migliore è quella che ottiene un valore pari a uno.

L'analisi del ciclo di vita avviene attraverso la valutazione di tutti i fattori energetici legati alla costruzione, allo smantellamento, al funzionamento e alla mobilità, che vengono calcolati tramite i modelli visti in precedenza. Le emissioni e l'energia primaria relative alla costruzione e allo smantellamento vengono calcolate grazie ad una relazione tra il modello dell'energia grigia e le emissioni legate alla tipologia di occupanti, l'anno di costruzione, l'anno di ristrutturazione e l'area costruita, secondo il modello di Fonseca *et al.* [18]

L'analisi comparativa avviene confrontando le prestazioni delle configurazioni ottimali degli edifici con la media locale del consumo finale di energia, il valore dell'impronta di carbonio e del consumo di energia primaria. Il database da cui attingere i

dati relativi alla domanda di elettricità, riscaldamento e raffrescamento, è legato alla tipologia di occupazione e all'area costruita.

2.2.2.6. Modulo di analisi spaziotemporale

Questo modello prevede lo sviluppo di un'interfaccia 4D per rappresentare i flussi di energia dipendenti dal tempo tra gli edifici e le infrastrutture. L'interfaccia è fondamentale per far sì che gli urbanisti e i progettisti energetici possano accedere ai risultati in modo intuitivo.

2.3. UMI

L'*Urban Modeling Interface* è un *tool open-source* sviluppato dal *Sustainable Design Lab* del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) nel 2013, con lo scopo di valutare l'impatto energetico e ambientale a livello urbano, valutare le scelte di trasporto sostenibili, l'illuminazione diurna e la produzione alimentare.

Il *tool* si configura come un *plug-in* del programma di modellazione 3D *Rhinceros*. Questo però non è l'unico programma di modellazione utilizzabile infatti, è possibile ricorrere anche all'utilizzo di *Grasshopper*. La scelta di questi due software è dettata dal fatto di voler rendere UMI accessibile agli architetti e ai progettisti urbani ricorrendo all'utilizzo di un ambiente di modellazione noto e familiare.

Il motore di calcolo del programma è *EnergyPlus*, mentre le simulazioni della luce diurna vengono effettuate con *Daysim* e alcuni script di *Python* per valutare la mobilità urbana.

UMI si configura come una barra di lavoro presente nell'ambiente di lavoro di *Rhinceros*, composta da quattro pulsanti. Il primo riguarda i dati relativi al sito di studio e alle sue condizioni. Il secondo riguarda la costruzione del modello tridimensionale che comprende oltre agli edifici anche gli alberi ed eventuali ombreggiamenti. Con il terzo è possibile assegnare ad ogni edificio precedentemente modellato le sue caratteristiche e con l'ultimo è possibile avviare la simulazione i cui risultati sono visualizzabili direttamente su *Rhinceros* attraverso scale cromatiche, utilizzando una visualizzazione basata su *Python*. I file sono esportabili anche in formato numerico con estensione *CSV*.

È possibile importare i file climatici su UMI grazie all'*Urban Weather Generator* (UWG), ovvero un modello combinato di *Urban Boundary Layer* e *Urban Canopy* sviluppato da Norford, Hidalgo e Pigeon [20]. L'UWG converte i file meteo provenienti da *EnergyPlus* in file con formato *EPW* di una stazione meteo rurale, in quelli di un

vicino centro urbano, tenendo conto dell'effetto isola di calore grazie ad una serie di input geografici specifici dell'area. Il modello però deve essere utilizzato prestando degli accorgimenti in quanto è stato dimostrato che i risultati in alcune condizioni specifiche non risultano affidabili.

Per quanto riguarda la metodologia di calcolo, UMI esegue singole simulazioni annuali per ogni edificio durante le quali gli oggetti vicini all'edificio analizzato, vengono considerati come ombreggiamenti.

I modelli multizona vengono generati in due passaggi. Il volume dell'edificio viene diviso in livelli, uno riferito all'involucro e uno del nucleo, ad ogni zona vengono assegnate le stesse stratigrafie e gli stessi tassi di infiltrazione. Le superfici in comune tra due edifici invece, vengono considerate adiabatiche.

UMI considera l'energia utilizzata dai sistemi HVAC basandosi sul sistema di carichi d'aria ideali di EnergyPlus combinati con alcuni coefficienti di prestazione definiti dall'utente.

Come detto in precedenza, per il modello di illuminamento, UMI fa riferimento al *tool* Daysim basato sulla radiazione solare. Per ogni edificio viene calcolata la disponibilità annuale di luce diurna attraverso un calcolo automatico che richiede unicamente i dati inseriti nel modello energetico. Con Daysim è possibile calcolare i valori orari della radiazione grazie ad una griglia di sensori posti su tutte le facciate degli edifici del modello [21]. I dati misurati vengono convertiti, tramite un algoritmo di propagazione 2D della luce, in una griglia interna che definisce il contributo di una porzione di facciata esterna dell'edificio all'illuminamento dell'ambiente interno. Per valutare l'illuminamento diurno Daysim utilizza due parametri, il *Daylight Autonomy* DA e il *Continuous Daylight Autonomy* CDA.[22]

Per aiutare i progettisti urbani a identificare le soluzioni volte al risparmio energetico, al contenimento e alla riduzione degli impatti ambientali, UMI ha introdotto un modulo di trasporto sostenibile che si concentra sulla mobilità pedonale del quartiere e sulle emissioni di carbonio associate. A tal proposito il programma integra il sistema di mobilità pedonale *walkscore* per valutare gli interventi a scala del singolo edificio volti al miglioramento dei collegamenti urbani con i servizi cittadini.

Infine, è disponibile un *tool* per valutare il ciclo di vita dei materiali da costruzione tramite il *Life Cycle Assessment* (LCA).

2.4. SIMSTADT

È una piattaforma di simulazione energetica urbana sviluppata dal dipartimento *Energy and Geo-informatics of the University of Applied Sciences Stuttgart* nel 2013. Lo scopo del programma è quello di supportare i pianificatori urbanistici, le compagnie ingegneristiche e le autorità pubbliche per definire le strategie energetiche meno impattanti.

Il programma non è *open-source* ma necessita di una abilitazione specifica ed è sviluppato in Java che consente l'esportazione di dati XML, formato funzionale per la tipologia di dati trattati.

Il punto di forza del programma è l'utilizzo di CityGML [24] per ricavare il modello 3D dell'area di interesse. Questo modello, che non contiene alcun tipo di dato energetico, permette di scegliere fra quattro livelli di dettaglio differenti (LoD) in funzione delle esigenze e della disponibilità di dati. Il LoD1 rappresenta il modello più semplice e privo di dettagli, cosiddetto "a scatola", mentre il LoD4 rappresenta il modello più elaborato, comprensivo della definizione degli spazi interni, così come già spiegato nella sezione 2.3.1.

Per integrare i dati energetici mancanti, è stata creata un'estensione di CityGML chiamata Energy ADE, attraverso cui è possibile modellare le diverse zone termiche e le loro superfici di confine, definire alcune proprietà dell'involucro, delle condizioni di occupazione e i sistemi energetici. [25]

Per il calcolo della domanda energetica, il programma valuta il riscaldamento dell'ambiente, l'acqua calda sanitaria e la domanda elettrica per ogni singolo edificio. I valori relativi all'acqua calda sanitaria e alla domanda elettrica vengono ottenuti con un metodo statistico su base annua in quanto dipendono dall'utilizzo dell'edificio, per ottenere i valori relativi al riscaldamento invece, viene applicato un bilancio energetico mensile ricorrendo alla normativa UNI EN ISO 13790.

È quindi possibile calcolare le emissioni di CO₂ in quanto nota la domanda di energia ed i sistemi energetici.

Per il calcolo dell'incidenza della radiazione solare sono necessari i dati meteo locali su base annua o mensile. Questi dati, ricavabili tramite il database *Meteonorm*, vengono importati nel *WFS WeatherProcessor* che permette di selezionare diversi modelli di distribuzione della radiazione in funzione delle diverse esigenze.

Il primo è basato sul modello di cielo di Hay, in questo caso l'edificio viene considerato privo di interazioni con l'ambiente circostante, perciò adatto a una zona urbana caratterizzata da bassa densità.

Nel secondo modello viene accoppiato al modello di cielo di Hay un algoritmo *ray-casting*, in questo caso le ostruzioni vengono considerate ma non viene tenuto conto del loro riflesso.

Infine, l'ultimo modello è basato sul *Simplified Radiosity Algorithm* [4] accoppiato al modello di cielo di Perez, che tiene conto sia delle ostruzioni che della loro riflessione.

2.5. CITYBES

City Building Energy Saver, sviluppata dalla Lawrence Berkeley National Lab (LBNL) degli Stati Uniti nel 2015, è una piattaforma *web-based* e *open-source* di modellazione energetica e di analisi del patrimonio edilizio, che ha lo scopo di fornire ai pianificatori urbani e alle amministrazioni pubbliche, le informazioni relative alle nuove tecnologie energetiche e alle strategie di riqualificazione del patrimonio edilizio, valutare il *benchmarking* energetico, la gestione operativa degli edifici, il potenziale solare fotovoltaico e la visualizzazione del microclima urbano.

Il programma si articola su tre livelli differenti, il livello dati, il livello relativo agli algoritmi e ai *software* e il livello relativo ai casi studio.

Il primo livello include i dati meteo ed il modello 3D dell'area di studio. Il software utilizza il formato standard internazionale dell'*Open Geospatial Consortium* CityGML [24] per rappresentare tridimensionalmente gli edifici urbani tramite modelli geometrici standardizzati. Il programma supporta 5 diverse tipologie di LoD partendo dal livello più semplice LoD0 fino a quello più dettagliato LoD4 (2.3.1.). Dal momento che CityGML non comprende alcun dato energetico è necessaria un'integrazione dei dati che avviene tramite l'estensione di CityGML chiamata Energy ADE. Inoltre, è possibile ricorrere ad ulteriori database per la modellazione 3D, come ad esempio GeoJSON che include alcune proprietà aggiuntive [26].

Il secondo livello include EnergyPlus, OpenStudio e CityBES, mentre il terzo livello permette la visualizzazione delle prestazioni degli edifici e fornisce le possibili applicazioni relative alla riqualificazione energetica e l'analisi delle energie rinnovabili.

In CityBES la modellazione energetica dinamica e la simulazione degli scenari di risparmio energetico vengono effettuati attraverso un *Software Development Kit* (SDK) chiamato OpenStudio che permette di gestire la simulazione effettuata con il motore di simulazione EnergyPlus. Inoltre, integra oltre 75 misure di risparmio energetico provenienti da diversi database tra cui il *Database for Energy Efficiency Resources* (DEER) e il *Commercial Building Energy Saver* (CBES). Questi database includono le descrizioni dettagliate delle caratteristiche tecniche, dei metodi di modellazione e dei costi di investimento. I risultati derivanti dalle simulazioni sono visualizzabili in

un ambiente 3D, a cui è possibile applicare filtri, attraverso scale cromatiche. Evidenziando un singolo edificio è possibile visualizzare una serie di caratteristiche specifiche tra cui il suo consumo energetico.

Si fa notare come il programma presenti alcuni limiti legati alla scala a cui si riferisce. Il principale riguarda la disponibilità di dati necessari per effettuare la simulazione, a partire dalla costruzione del modello 3D attraverso CityGML, passando per i dati relativi all'uso energetico degli edifici ed infine la definizione di un numero sufficientemente ampio di scenari di retrofit contenuti nel *database* delle misure di risparmio energetico.

2.6. OPEN IDEAS

Open IDEAS, sviluppato dalla KU Leuven nel 2015, è un *framework open-source* basato su Modelica, sviluppato per simulazioni energetiche integrate su scala urbana basato su IDEAS, StROBe, FastBuildings e GreyBox. Il programma consente la valutazione dei profili di carico degli edifici ai fini dell'ottimizzazione dei sistemi energetici.

La libreria IDEAS (*Integrated District Energy Assessment by Simulation*) basata sul linguaggio di modellazione Modelica, costituisce il nucleo del *framework* e permette la simulazione transitoria simultanea di edifici termici multizona includendo non solo l'involucro, ma anche i sistemi HVAC ed i sistemi di controllo ed elettrici sia a livello del singolo edificio che a livello urbano. La differenza con gli ambienti di modellazione esistenti risiede nel fatto che utilizza un approccio *white-box* ovvero, costituito da equazioni differenziali parziali, equazioni differenziali ordinarie ed equazioni algebriche risolte simultaneamente grazie ad un risolutore.

Il modulo StROBe basato su Python fornisce le condizioni al contorno necessarie per la libreria IDEAS. È possibile modellare stocasticamente serie di dati temporali relativi agli occupanti, all'acqua calda sanitaria, agli apporti di calore interni e alle temperature di set point interne per il riscaldamento.

La libreria FastBuildings, basata anch'essa su Modelica, implementa i modelli di edifici compatibili con IDEAS, differenziandosi da questa per due aspetti. Il primo è rappresentato dal fatto che i componenti mirano ad obiettivi diversi, mentre il secondo è rappresentato dalla diversa parametrizzazione dei componenti stessi. Infatti, al contrario di IDEAS, FastBuildings è progettato in modo da ottenere i parametri tramite una stima basata su segnali simulati o misurati [28], questo aspetto ha reso necessario lo sviluppo del modulo GreyBox.

Il modulo GreyBox è basato su Python ed implementa un *tool* per la stima semi-automatica dei parametri.

2.7. URBANOPT

È una piattaforma di simulazione di sistemi energetici avanzati per edifici ad alte prestazioni energetiche, sviluppata dal *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) nel 2016.

Lo scopo di questo programma è quello di integrare un UBEM e un USEM permettendo la definizione dettagliata dell'ambiente costruito a scala urbana e la caratterizzazione dei sistemi energetici urbani comprendendo anche la distribuzione dell'energia stessa.

Attualmente, *Urban Renewable Building and Neighborhood optimization* non è *open-source* ma l'obiettivo posto è quello di renderlo pubblico in modo che possa diventare ampiamente utilizzabile. Per la modellazione energetica dettagliata riferita al singolo edificio, il programma ricorre al sistema *open-source* del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti OpenStudio e ad EnergyPlus. Inoltre, adotta la piattaforma di ottimizzazione dell'efficienza energetica COFFEE, ovvero un *tool* che genera modelli energetici di base.

Con il programma sarà possibile valutare vari aspetti vantaggiosi dal punto di vista energetico. Sono un esempio i sistemi di energia termica condivisa, più efficienti rispetto ai sistemi HVAC autonomi per ogni edificio, soprattutto in contesti urbani caratterizzati da funzioni differenti in cui il picco di consumo energetico viene raggiunto in momenti differenti della giornata. Un altro punto è rappresentato dalle fonti di calore di scarto derivanti ad esempio da processi industriali, in questo caso attraverso un sistema di teleriscaldamento sarebbe possibile recuperare questa energia che in condizioni normali non viene sfruttata. Infine, l'aggregazione del carico relativo alle utenze, in questo caso i fornitori di energia potrebbero essere interessati all'aggregazione dei carichi per ottimizzare la distribuzione stessa.

Al momento URBANOpt si focalizza unicamente su aspetti energetici ma è previsto uno sviluppo futuro per il collegamento con altri settori.

2.8. TEASER

Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit è stato rilasciato nel 2018 dall'*RWTH Aachen University* ed è uno strumento *open-source* basato su Python.

Il focus del programma è un modello *design-driven* di ordine ridotto che necessita una descrizione dettagliata dell'edificio allo scopo di poterlo parametrizzare in maniera corretta. I parametri necessari per la descrizione comprendono le informazioni geometriche, le caratteristiche fisiche e le condizioni al contorno dell'edificio.

Dal momento che spesso è difficile raccogliere i dati nella loro totalità, TEASER include una funzione di implementazione dei parametri che combina diverse risorse di dati per completare la descrizione dell'edificio, sono un esempio la destinazione d'uso, l'anno di costruzione e set di parametri di input necessari a stimare le proprietà non note.

Il programma include un'interfaccia per CityGML che supporta i LOD1 e LOD2 ed utilizza informazioni statistiche e normative relative allo *stock* di edifici per incrementare i set di dati richiesti per il modello di simulazione dinamica.

Per quanto riguarda il modello termico, TEASER fa riferimento a due livelli differenti: un *wall level* che riduce il numero di elementi R-C per parete, e un *zone level* che unisce più pareti in una unica.

Nel primo caso la discretizzazione spaziale di ogni parete avviene attraverso un numero variabile di combinazioni R-C che utilizzano una o due capacità per ogni parete. Nel secondo caso, la discretizzazione spaziale è rappresentata da un numero variabile di elementi di parete. Pertanto, si assume che le pareti di una zona termica disperdano termicamente in maniera simile e successivamente vengono unite diverse pareti in combinazioni R-C rappresentative.

In base al modello scelto, TEASER calcola i parametri necessari per l'elaborazione di un modello di simulazione dinamico di ordine ridotto. Il programma supporta il calcolo dei parametri per ROM of AixLib e la libreria IEA-EBC Annex 60, entrambi implementati nel linguaggio di modellazione *object-oriented* Modelica.

Il programma inoltre, fornisce moduli, classi e funzioni per l'acquisizione e l'implementazione dei dati e per generare modelli *ready-to-run* di ordine ridotto basati su Modelica. [30] A tal proposito la struttura del software viene suddivisa in tre sotto-pacchetti: il pacchetto dati, il pacchetto logico e il pacchetto dell'interfaccia grafica (GUI). Esiste anche un quarto sotto-pacchetto, il pacchetto di esempio, che contiene script che dimostrano l'utilizzo e il flusso di lavoro di TEASER.

Il primo pacchetto, ovvero il pacchetto dati gli input e gli output, serve ad implemen-

tare, attraverso moduli basati su Python, le interfacce per formati specifici di file o altri linguaggi di programmazione e/o modellazione. In questo caso l'importazione delle informazioni viene distinta dall'esportazione. Un esempio di interfaccia di importazione sono le connessioni con *database* specifici che spesso vengono accoppiate ad un sistema GIS, un esempio di interfaccia di esportazione invece, sono gli output del codice per i modelli PBS (*Building Performance Simulation*). Come già accennato, per scambiare informazioni con altri programmi, TEASER fornisce un'interfaccia a CityGML con l'estensione EnergyADE per integrare i dati energetici.

Il secondo pacchetto invece, relativo alla manipolazione dei dati, è necessario per implementare l'arricchimento dei dati e la generazione del modello. Il pacchetto è suddiviso a sua volta nei pacchetti *buildingobjects* e *archetypebuilding*: il primo contiene le classi necessarie per descrivere un edificio, ovvero le sue proprietà fisiche, gli impianti e le condizioni al contorno, mentre il secondo contiene la metodologia per creare gli archetipi e comprende a sua volta la metodologia BMVBS [31] che si concentra sul settore non residenziale, in particolare edifici per uffici e il pacchetto *urbanrenet* che raccoglie un certo numero di archetipi assegnati a diverse tipologie di tessuto urbano.

2.9. SOFTWARE IN VIA DI SVILUPPO

Oltre ai programmi appena descritti, altri sono in via di sviluppo.

LakeSIM è stato sviluppato tramite una collaborazione dell'*Urban Center for Computation and Data* dell'Università di Chicago con lo studio di architettura Skidmore Owings & Merrill, il Clean Energy Trust e gli sviluppatori McCaffery Interests ed unisce gli strumenti di pianificazione urbana con modelli per la costruzione di energia e trasporti. Lo scopo è quello di elaborare stime a lungo termine per i trasporti, le acque reflue ed altri aspetti critici. Il programma viene già utilizzato in qualche applicazione ma non è stato ancora rilasciato pubblicamente.

Il *System Master PLanner / Net Zero Planner* (SMPL / NZP), sviluppato dalla *US Army Engineer Research and Development* con l'*US Army Construction Engineering Research Laboratory*. È un programma *web-based* che non supporta solo la pianificazione energetica, ma anche quella di acqua e rifiuti e punta all'ottimizzazione dei sistemi di alimentazione per soddisfare i carichi energetici. Il metodo di calcolo è basato su EnergyPlus, attualmente non è ancora stato rilasciato pubblicamente ma è già stato utilizzato più volte dall'esercito americano.

L'*Energy Atlas Berlin*, sviluppato dalla *Technische Universität München*, è uno strumento olistico per la valutazione energetica a scala urbana incentrato sulle fonti energet-

iche rinnovabili. Permette di confrontare scenari diversi per ottimizzare la gestione urbana e la progettazione delle infrastrutture energetiche. È basato su CityGML ed include anche la gestione delle acque, dei trasporti e dei rifiuti.

Il *Building Energy Modeling - Town Energy Balance* (BEM-TEM) è un modello in grado di valutare gli effetti energetici di un edificio in un clima urbano. Il consumo energetico degli edifici viene calcolato applicando il metodo di bilancio termico ed è stato utilizzato per un quartiere di edifici haussmanniani a Parigi. [29]

2.10. CONFRONTO DEI SOFTWARE CITYSIM PRO E CEA

In questa sezione vengono riportate alcune tabelle utili al confronto dei due software oggetto di analisi, CitySim PRO e CEA.

Queste tabelle hanno lo scopo di restituire sinteticamente le principali differenze e congruenze fra i due programmi che sono stati trattati nello specifico nelle sezioni precedenti ai fini di permettere una visione d'insieme dei due software.

I restanti programmi che sono stati anch'essi trattati in precedenza per fornire una panoramica dei software disponibili, non sono stati inseriti all'interno delle tabelle in quanto non sono stati testati direttamente.

	CitySim	CEA	
INFORMAZIONI GENERALI	Autore	J. Kämpf e D. Robinson	J. Fonseca e A. Schlueter
	Sviluppatore	EPFL	ETH Zurigo e Singapore
	Anno di sviluppo	2009	2015
	Open source	Si, tramite richiesta	Si
	Approccio alla modellazione	Bottom-up ibrido	Bottom-up ibrido
	Piattaforma di simulazione	CitySim	Python
	Metodo di calcolo	CitySim solver	Modulo di calcolo specifico del programma
INPUT	Presenza degli occupanti	Si	Si
	Morfologia del terreno	Si	Si
	Effetto isola di calore	No	Si
OUTPUT	Emissioni di carbonio	Si	Si
	Analisi di sensibilità	No	Si
	Aspetti finanziari	No	Si

^
TAB.2-INFORMAZIONI GENERALI SU CITYSIM PRO E CEA.

INPUT	CitySim	CEA	
FORMATO DATI SUPPORTATO			
	GIS (.shp, .gdb, ecc...)		X
	CityGML	X	X
CARATTERIZZAZIONE EDIFICI	Classificazione archetipi basata su:		
	Destinazione d'uso	X	X
	Anno di costruzione		X
	Tipologia edilizia	X	X
	Caratterizzazioni incluse:		
	Involucro	X	X
	Impianti	X	X
	Utilizzo dell'energia	X	
	Metodo di calcolo occupanti:		
	Deterministico	X	X
Stocastico	X*	X**	

X* Caratteristica in fase di studio

X** Caratteristica implementata parzialmente

^
TAB.3-RIELABORAZIONE DELLA TABELLA RELATIVA AGLI INPUT RICHIESTI DA CITYSIM PRO E CEA. FONTE: M. FERRANDO, ET AL.

OUTPUT	CitySim	CEA	
RIFERITI AGLI EDIFICI	Luce diurna	X	
	Energia termica per il risc./raffr.	X	X
	Domanda di ACS	X	X
	Uso di elettricità	X	X
RESOURCE POTENTIAL	Potenziale solare sulla copertura		X
	Potenziale solare sulle facciate		X
SIST. ENERGETICI URBANI	Riscaldamento/raffrescamento urbano	X**	X
	Rete elettrica	X**	X
	Accumulo energetico	X**	X*
VALUTAZIONI SU LARGA SCALA	Scenari	X	X
	Benchmarking		X
	Analisi costi-benefici		X
	Trasporti/Mobilità	X (MATsim-T)	X
	LCA	X	X

TEMPI DI RISOLUZIONE			
Ora	X	X	
Giorno	X	X	
Mese	X	X	
Anno	X	X	
SCALA DELLA RISOLUZIONE	Singolo piano		
	Singolo edificio	X	X
	Gruppi di edifici	X	X
DISPLAY	Foglio di calcolo	X	X
	Visualizzazione grafica	X	X

X* Caratteristica in fase di studio

X** Caratteristica implementata parzialmente

2.11. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

- [1] Emmanuel W. e Kämpf J.H., *A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values*.
- [2] Robinson, D., Campbell, N., Gaiser, W., Kabel, K., Le-Mouele, A., Morel, N., Page, J., Stankovic, S., Stone, A. (2007), *SUNtool – a new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability*, *Solar Energy*, 81(9), p1196-1211
- [3] Becchio C., Corgnati S., Fabi V., Schiari G., *Urban building energy models considering occupants: a software review*, 2019.
- [4] Robinson D. e Stone A., *Holistic Radiation Modelling with a fast Simplified Radiosity Algorithm*, IBPSA Conference, 2005.
- [5] Robinson D, Haldi F, Kämpf J, Leroux P, Perez D, Rasheed A. and Wilke U. (2009) *CitySim: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning*, IBPSA Conference, pp. 1083-1090, 2009
- [6] Kämpf J., *On the Modelling and Optimisation of Urban Energy Fluxes*, Thesis n.4548 (2009) EPF de Lausanne, 2009.
- [7] J.A. Fonseca, A. Schlueter, *Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts*, *Appl. Energy* 142 (2015) 25.
- [8] European Committee for Standardization. Energy performance of buildings – calculation of energy use for space heating and cooling (EN 13790:2007); 2008
- [9] European Committee for Standardization. Heating systems in buildings – method for calculation of system energy requirements and system efficiencies (EN 15316:2007); 2007
- [10] European Committee for Standardization. Ventilation for buildings – calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in buildings (EN 15241:2007); 2011
- [11] J.H. Kämpf, *On the modelling and optimisation of urban energy fluxes*, EPFL (2009)

- [12] Holst S., *TRNSYS-models for radiator heating systems*, Munchen, 1996.
- [13] J.A. Fonseca, A. Schlueter, *Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts*, *Appl. Energy* 142 (2015) 25.
- [14] P. Fu, P.M. Rich, *A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry*, *Comput. Electron. Agr.* 37 (1–3) (2002) 25–35
- [15] S. Ham, M. Kim, B. Choi, J. Jeong, *Simplified server model to simulate datacenter cooling energy consumption*, *Energy Build.* 86 (2015) 328–339.
- [16] Fonseca J. A., Marechal F., Nguyen T. e Schlueter A., *City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts*, *Energy and Buildings* 113 (2016) 202–226, 2015.
- [17] C. Weber, F. Marechal, D. Favrat, *Design and optimization of district energy systems*, *Comput. Aided Chem. Eng.* 24 (2007) 1127–1132.
- [18] J.A. Fonseca, A. Willmann, C. Moser, M. Stauffacher, A. Schlueter, *Assessing the environmental impact of future urban developments at neighborhood scale*, in: *CISBAT 2015: Future Buildings and Districts—Sustainability from Nano to Urban Scale*, 2015, p. 6.
- [19] D. Robinson, N. Campbell, W. Gaiser, K. Kabel, A. Le-Mouel, N. Morel, J. Page, S. Stankovic, A. Stone, *SUNtool – A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability*, *Solar Energy*, 81(9), p.1196-1211.
- [20] Bueno B, L. Norford, J. Hidalgo and G. Pigeon, *The urban weather generator*, *Journal of Building Performance Simulation*, 2013
- [21] Reinhart C F, Walkenhorst O, *Dynamic RADIANCEbased daylight simulations for a full-scale test office with outer venetian blinds*, *Energy & Buildings*, 33:7 pp. 683-697, 2001.
- [22] Reinhart C F, J. Mardaljevic and Z. Rogers, *Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design*, *Leukos* 3:1, 2006.

[23] Dogan T., Jakubiec J.A., Rakha T., Reinhart C. F e Sang A., *UMI – An Urban Simulation Environment for Building Energy Use, Daylighting and Walkability*, Proceedings of BS2013, pp. 476-483.

[24] Groeger, G., Kolbe, T.H., Nagel, C., Häfele, K.H 2012. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard*. OpenGIS® Encoding Standard, Version: 2.0.0, OGC 12-019, 2012-04-04

[25] Brassel K-H, Bruse M., Coors V., Duminil E., Eicker U., Nouvel R. e Robinson D., *SimStadt, a new Workflow-driven urban Energy Simulation Platform for CityGML city Models*, CISBAT 2015, 2015.

[26] Chen Y., Hong T. e Piette M. A., *City-Scale Building Retrofit Analysis: A Case Study using CityBES*, Building Simulation 2017, August 7-9, 2017

[27] Chen Y., Hong T., Lee S. H. e Piette M. A., *CityBES: A Web-based Platform to Support City-Scale Building Energy Efficiency*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016.

[28] R. Baetens, R. De Coninck, F. Jorissen, D. Picard, L. Helsen & D. Saelens, *OPENIDEAS – AN OPEN FRAMEWORK FOR INTEGRATED DISTRICT ENERGY SIMULATIONS*, Conference: Building Simulation 2015 - 14th Conference of the International Building Performance Simulation Association, 2015

[29] M. Ferrando, F. Causone, T. Hong, Y. Chen. *Urban Building Energy Modeling (UBEM) Tools: A State-of-the-Art Review of bottom-up physics-based approaches*. Sustainable Cities and Society, 2020.

[30] Peter Remmen, Moritz Lauster, Michael Mans, Marcus Fuchs, Tanja Osterhage & Dirk Müller, *TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks*, Journal of Building Performance Simulation, 11:1, 84-98, 2018.

[31] *Vereinfachung zur geometrischen und technischen Datenaufnahme im Nicht-wohngebäudebestand*, BMVBS-Online-Publikation 26/2010: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

[32] Kämpf J.H, Robinson D., *A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows*, Energy and Buildings, 39(4), pp. 445-453, 2007.

[33] Nielsen T.R., *Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design*, Solar Energy, 78(1), pp. 73-83, 2005.

UMI, consultato nel marzo 2021, <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>

Walkscore, consultato nell'aprile 2021, <https://www.walkscore.com/>

Rhinoceros, consultato nell'aprile 2021, <https://www.rhino3d.com/it/>

Grasshopper, consultato nell'aprile 2021, <https://www.grasshopper3d.com/>

SimStadt, consultato nell'aprile 2021, <https://simstadt.hft-stuttgart.de/de/index.jsp>

OpenStudio, consultato nel marzo 2021, <https://www.openstudio.net/>

CityBES, consultato nell'aprile 2021, <https://citybes.lbl.gov/>

Open IDEAS, consultato nell'aprile 2021, <https://github.com/open-ideas>

URBANopt, consultato nel marzo 2021, <https://www.nrel.gov/buildings/urbanopt.html>

Urban Center for Computation and Data, consultato nell'aprile 2021, <http://www.urbanccd.org/news/tag/LakeSim>

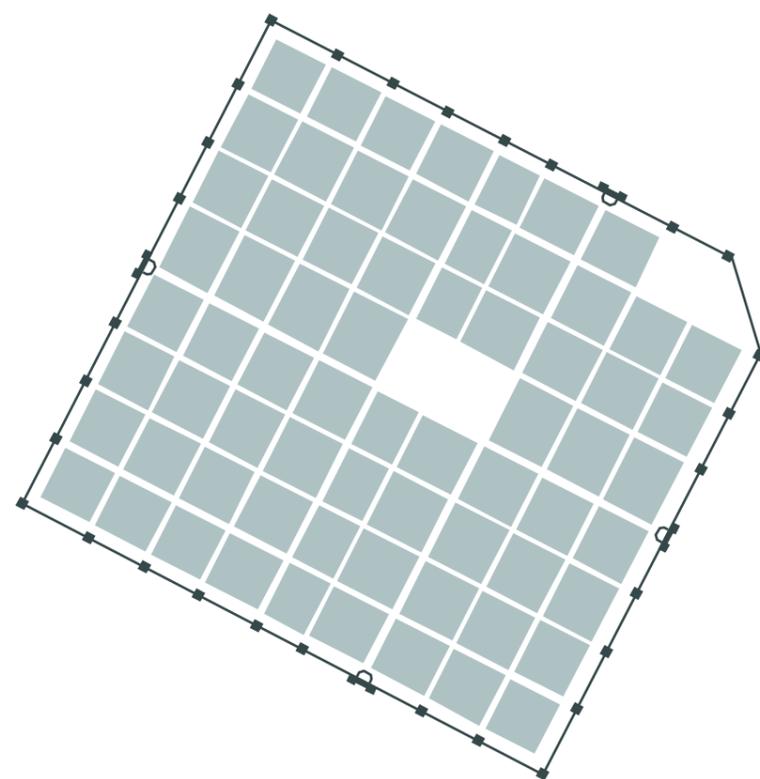
Meteonorm, consultato nel marzo 2021, <https://www.athsoftware.it/prodotti/linea-fonti-rinnovabili-meteonorm/>

CitySim, consultato nell'aprile 2021, <https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>

Kaemco, consultato nell'aprile 2021, <http://www.kaemco.ch/download.php>

CEA, consultato nell'aprile 2021, <https://cityenergyanalyst.com/>

TEASER, consultato nel maggio 2021, <https://www.github.com/RWTH-EBC/TEASER>



^
FIG.15-ASSETTO DELL'INSEDIAMENTO ROMANO.

3. PRESENTAZIONE DELL'AREA DI STUDIO

Torino, capoluogo della regione Piemonte avente 848 196 abitanti, è il quarto comune italiano per popolazione. La città è situata nella pianura delimitata dai fiumi Stura di Lanzo, Sangone e Po e costituisce uno dei poli culturali, artistici, turistici e artistici d'Italia. Fu capitale di un ducato longobardo, di una marca carolingia, del ducato di Savoia e divenne la prima capitale del Regno d'Italia. È il centro dell'industria automobilistica italiana ma anche del cinema, del settore aerospaziale e del disegno industriale.

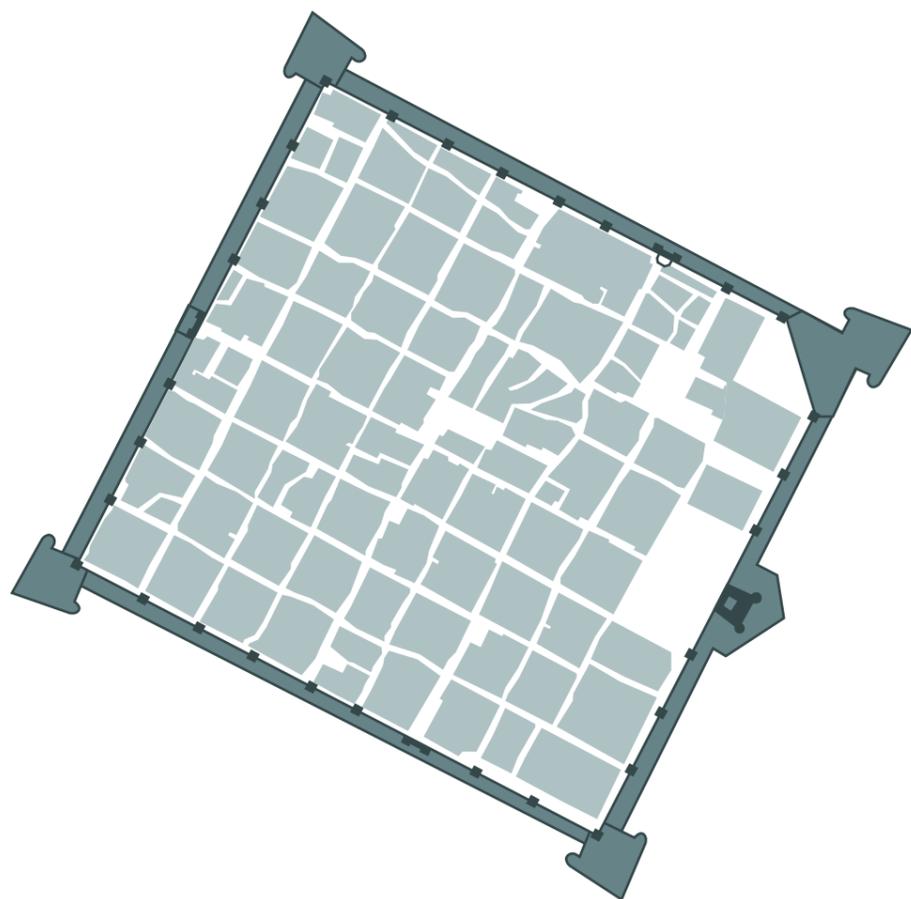
3.1. CONTESTUALIZZAZIONE STORICA E URBANISTICA DELLA CITTÀ

3.1.1. ETÀ ANTICA

La fondazione di Augusta Taurinorum si data intorno al tardo I secolo a.C., in età augustea, quando Roma aveva mostrato interesse per i territori dell'Italia settentrionale a causa della loro posizione strategica. Grazie alle mura perimetrali costruite proprio in epoca augustea, conservate e ancora visibili tutt'oggi in alcuni punti della città, è stato possibile risalire alle dimensioni dell'insediamento originario, un rettangolo di 670 x 790 metri.

In questo periodo le infrastrutture risultavano praticamente assenti e solo negli ultimi decenni del I secolo d.C. venne avviata la costruzione della rete fognaria e dell'acquedotto, ultimata la cinta muraria e avviata la costruzione di una via larga circa sessanta piedi romani lungo tutto il perimetro interno delle mura.

Le porte principali dell'insediamento erano quattro, situate agli estremi del cardo (attuale Via San Tommaso) e del decumano (attuale Via Garibaldi), due di queste sono ancora visibili oggi: la Porta Palatina e la Porta Fibellona, attualmente inglobata all'interno di Palazzo Madama.



^
FIG.16-ASSETTO DELLA CITTÀ MEDIEVALE.

La trama ortogonale che caratterizza Torino ancora oggi trova le sue origini nel tessuto dell'insediamento romano ma è dovuta in gran parte agli ampliamenti della seconda metà del 1700 che riprenderanno tale caratteristica e ai risanamenti del tessuto medievale -attuati nel corso dell'Ottocento- che aveva alterato il tessuto originario.

3.1.2. ETÀ MEDIEVALE

Durante il periodo delle invasioni barbariche il sistema della città entra in crisi, alcune di queste scompaiono, mentre quelle rimaste si riducono sia per dimensioni che per numero di abitanti.

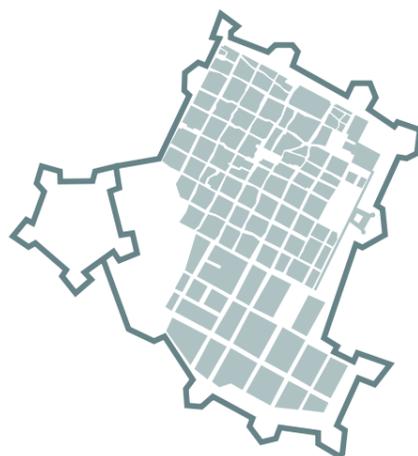
Con il periodo di ripresa economica e culturale successivo, che interessa tutta l'area europea, le città riprendono a svilupparsi, ma non Torino che rimane confinata all'interno delle mura di epoca romana.

In questo periodo però, la colonia che prima aveva carattere militare, assume un carattere artigianale e commerciale, contemporaneamente a questo processo si verifica un aumento della popolazione, di conseguenza lo spazio all'interno delle mura inizia a scarseggiare. I tracciati stradali prima ortogonali, assumono l'assetto della tipica città medievale, caratterizzati da linee spezzate e lati obliqui che però seguono il sedime degli assi romani. Pertanto, l'unico modo affinché la città possa crescere è lo sviluppo in altezza e lungo il fronte delle vie, a tal proposito per aumentare l'affaccio su strada si prediligeva lo sviluppo di lati obliqui, motivo per cui l'assetto della città medievale è caratterizzato da linee curve e spezzate, strade irregolari e strette, numerosi cortili di dimensioni ridotte e comunicanti tra loro tramite passaggi interni e alta densità abitativa.

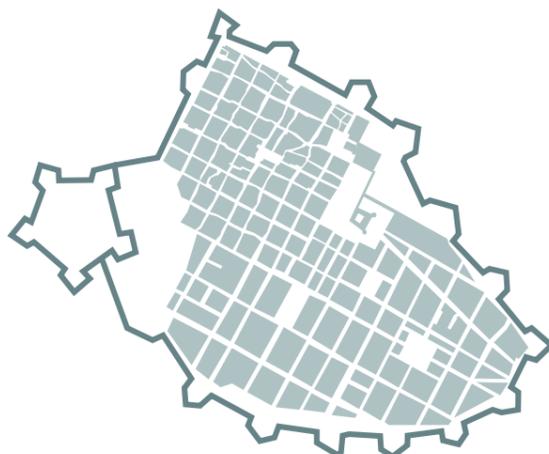
Nel XV secolo, con l'avvento dei Savoia, Torino passa dall'essere una piccola città, a capitale e crocevia di grande importanza sia a fini strategici che politici. Nel XVI secolo però, l'assetto della città era ancora quello di una città medievale, pertanto i Savoia decidono di adattare l'immagine della città al ruolo di capitale del ducato attraverso diverse trasformazioni pianificate. Viene quindi realizzata una nuova cinta muraria caratterizzata dalla presenza di bastioni, viene realizzata la cittadella, baluardo fortificato dove si concentravano le risorse belliche, tutti aspetti che rendono la città più adatta agli scopi militari.

Nonostante vengano costruite nuove mura, il perimetro rimane sempre il medesimo e nel giro di un secolo gli abitanti passano da cinquemila a ventimila, pertanto, di pari passo all'adeguamento militare si rendono necessarie nuove aree abitative. A questo proposito i Savoia attuano un ampliamento organizzato in tre fasi successive

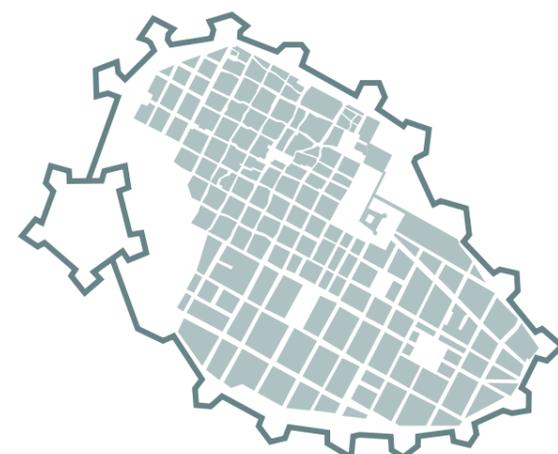
I° AMPLIAMENTO



II° AMPLIAMENTO



III° AMPLIAMENTO



che privilegia la ripresa del tessuto di epoca romana.

Sebbene siano di epoche diverse e quindi contraddistinti da caratteristiche diverse, devono essere interpretati come facenti parte di un progetto unitario che termina nel XVIII secolo con il raggiungimento della tipica forma “a mandorla”.

Ognuno dei tre ampliamenti è caratterizzato da un asse principale che funge da collegamento fra i quartieri di nuova costruzione con il centro della città.

3.1.3. ETÀ MODERNA

L'età moderna è caratterizzata dagli ampliamenti della città.

Il primo ampliamento è orientato a Sud sull'asse della Contrada Nuova e viene realizzato ad opera degli ingegneri militari del ducato. L'asse viario principale di questo ampliamento è la Via Nuova, l'attuale Via Roma, mentre il centro urbano principale è quello che corrisponde all'attuale Piazza San Carlo. Via Roma viene posizionata in asse con l'ingresso del Palazzo Ducale allo scopo di creare una continuità fisica e visiva fra il centro del potere ed i palazzi in cui si concentravano i nobili e i funzionari che governavano il ducato.

Il secondo ampliamento viene avviato nel Seicento sull'asse dello stradone militare di Po. Questo asse, a differenza di tutti gli altri, viene realizzato in maniera obliqua, infatti seguiva il tracciato di una via preesistente che collegava la porta della città con il ponte sul fiume Po. Piazza Castello viene raddoppiata di dimensioni e assume un ruolo di centrale importanza che in precedenza non aveva mai avuto. In entrambi gli ampliamenti gli isolati sono caratterizzati da grandi dimensioni e giardini ampi.

Il terzo ampliamento invece, avviene verso Ovest ed è conosciuto come ampliamento di Porta Susina. Si attua entro i terreni non ancora edificati compresi all'interno del perimetro della cinta ed è caratterizzato da una densità abitativa elevata, vie strette, isolati di dimensioni minori rispetto ai precedenti ed edifici con ingresso a ballatoio allo scopo di sfruttare la volumetria il più possibile.

Il XVIII è caratterizzato dallo sviluppo di piani urbanistici e architettonici e dal consolidamento delle linee già tracciate. Il progetto finale si legge come unitario e organizzato con una struttura viaria centripeta rafforzata da assi che collegano le porte della città con Piazza Castello e il Palazzo Reale.



3.1.4. ETÀ CONTEMPORANEA

Durante i primi anni dell'Ottocento il Piemonte viene annesso alla Francia e per Torino si apre una nuova fase: la città diventa snodo commerciale fra Italia e Francia. Inizia perciò ad assumere un aspetto diverso, i bastioni vengono smantellati e vengono realizzate grandi piazze connesse fra loro da ampi viali alberati. Smantellando la cinta muraria, molti terreni vengono liberati e per organizzare questi spazi la città prende spunto dallo stile francese. Alcune aree, nello specifico quelle fra Porta Nuova e il Po, sono oggetto di una edificazione significativa che riceve l'input sia dalla ripresa demografica che da quella economica. Inoltre, verso la metà del secondo decennio del XIX secolo inizia la costruzione della Piazza di Po (attuale Piazza Vittorio Veneto) e del tempio della Gran Madre di Dio.

L'inizio degli anni quaranta del secolo è caratterizzato dal sorgere di edifici isolati oltre i quartieri che si erano già consolidati, pertanto si rendono necessarie ipotesi di espansione dei confini della città ed in particolare nelle zone al di fuori di Porta Nuova, Porta Susa, Vanchiglia e regione Valdocco. La crescita demografica accelerata, che caratterizza la città in questi anni, si interrompe bruscamente nel 1864 quando Torino perde il suo ruolo di capitale. A questo evento segue uno spostamento di massa della popolazione verso altre città e una conseguente riorganizzazione del sistema economico che fino a quel momento era stato dipendente dalla corte.

La ripresa da questo evento critico avviene con lentezza e negli anni settanta del secolo la città diventa un centro manifatturiero. Inizia quindi a delinearsi la dualità fra le borgate operaie localizzate nelle zone suburbane e la città borghese.

Gli anni ottanta invece, segnano l'inizio di una nuova fase caratterizzata dalla crescita delle borgate operaie all'esterno della cinta daziaria, l'urbanizzazione della zona precollinare e gli interessi fondiari che portano alla realizzazione della rete fognaria e di due nuovi assi obliqui: Via Pietro Micca e Via IV Marzo. Questi anni inoltre, sono caratterizzati da un impegno dell'amministrazione per il miglioramento del sistema ferroviario e dell'istruzione. È anche di questi anni la nascita della FIAT al cui sviluppo contribuiscono la municipalizzazione dei trasporti urbani e la statalizzazione delle ferrovie. La nuova funzione della città attrae popolazione dalle campagne dando il via ad un nuovo periodo di crescita demografica che si conclude nel 1908 con la crisi automobilistica e con la conseguente riorganizzazione profonda degli insediamenti produttivi basati sul modello fordista e l'approvazione del nuovo Piano Regolatore della città. Quindi per la maggior parte del XX secolo, l'immagine di Torino rimane legata a quella di una città industriale e rimane tale fino alla fine degli anni settanta quando il sistema subisce nuovamente una crisi.

La fase che inizia dopo il primo conflitto mondiale è caratterizzata dalla riorganizzazione delle strutture produttive sorte alla fine del XIX secolo, in questo contesto nascono gli stabilimenti di FIAT Lingotto e FIAT Mirafiori. Gli ampliamenti che avvengono in questi anni seguono ancora il Piano Regolatore del 1908 ma procedono per grandi tasselli che si sovrappongono al tessuto rurale storico, le funzioni vengono concentrate ma contemporaneamente si verifica una dispersione nello spazio.

Gli anni sessanta e settanta invece, sono caratterizzati sia dalla crescita della domanda abitativa che di servizi come conseguenza dello sviluppo di grandi industrie. Il piano regolatore del 1956 prevede un'organizzazione a settori: quello abitativo e quello industriale. Questi vengono intervallati da spazi verdi che si sviluppano verso l'interno della città. In questo contesto, l'avvento dell'anniversario del centenario dell'Unità d'Italia diventa il pretesto per l'inizio di un nuovo momento per la città per prendere le distanze dall'idea di città industriale. Questo periodo rimane l'unica vicenda di sviluppo urbano non legato a ragioni di produzione o crescita.

Come accennato, la crisi del sistema industriale degli anni settanta viene colta come opportunità per ripensare la morfologia urbana di Torino e dell'area metropolitana. Il dibattito che viene aperto a cavallo fra anni Ottanta e Novanta, porta all'approvazione del nuovo P.R.G. nel 1995 ed ha come focus i trasporti pubblici, la riorganizzazione dei tessuti industriali, la riqualificazione delle aree centrali e il potenziamento dell'offerta culturale.

3.2. CONTESTUALIZZAZIONE STORICA DEL QUARTIERE CENISIA

Il perimetro del quartiere è delimitato dagli assi di Corso Vittorio Emanuele II, Corso Peschiera, Corso Castelfidardo e Corso Trapani.

L'urbanizzazione di quest'area inizia verso la metà dell'Ottocento con il sorgere degli insediamenti industriali al di fuori della cinta daziaria (3.1.4.) e da subito si connota come borgo operaio. L'area conosce un rapido sviluppo seguendo un impianto urbanistico caratterizzato da uno schema stellare che ha come polo Piazza Sabotino.

Il piano regolatore del 1901 influenza il carattere del quartiere che è contraddistinto da un tessuto che si sviluppa lungo gli assi viari andando a costituire isolati chiusi. Gli edifici che si trovano su questi isolati sono di natura differente, infatti possono essere residenziali o commerciali solitamente a quattro o cinque piani fuori terra e aventi una volumetria elevata, edifici più modesti a due o tre piani edificati nei primi due decenni del Novecento e ancora edifici a cinque o più piani realizzati negli anni trenta. Inoltre, sono presenti alcuni edifici pluripiano residenziali antecedenti al P.R.G. del 1901.

Questa zona è una delle principali in cui si delinea la città pubblica a partire dai primi anni del Novecento e caratterizzata da grandi isolati costruiti dall'Istituto Autonomo Case Popolari (IACP, 3.3.) che si pongono in continuità con il tessuto del contesto rispettando le altezze, gli allineamenti, e il rapporto con gli assi viari.

La crescita della popolazione all'interno del quartiere avviene rapidamente all'inizio del Novecento, infatti in questa area si insediano numerosi stabilimenti produttivi legati all'industria automobilistica e non solo. Nel 1905 apre la Società Piemontese Automobili (SPA), successivamente la Lancia intorno alla quale si sviluppa la borgata Monginevro ma anche la SIP, l'Ansaldo e gli stabilimenti Pininfarina. A partire da questo momento si innesca una trasformazione edilizia che elimina per sempre l'assetto rurale precedente e le cascine che lo caratterizzavano.

Con la crisi del settore però, molti tasselli produttivi della zona si svuotano completamente a partire dagli anni ottanta, in questo contesto il P.R.G. del 1995 evidenzia diverse zone urbane di trasformazione (ZUT) e aree di trasformazione a servizi (ATS) per sottolineare l'esigenza di convertire porzioni estese di vuoti urbani, di ripensare agli spazi pubblici e di ricostruire il tessuto urbano ed economico.

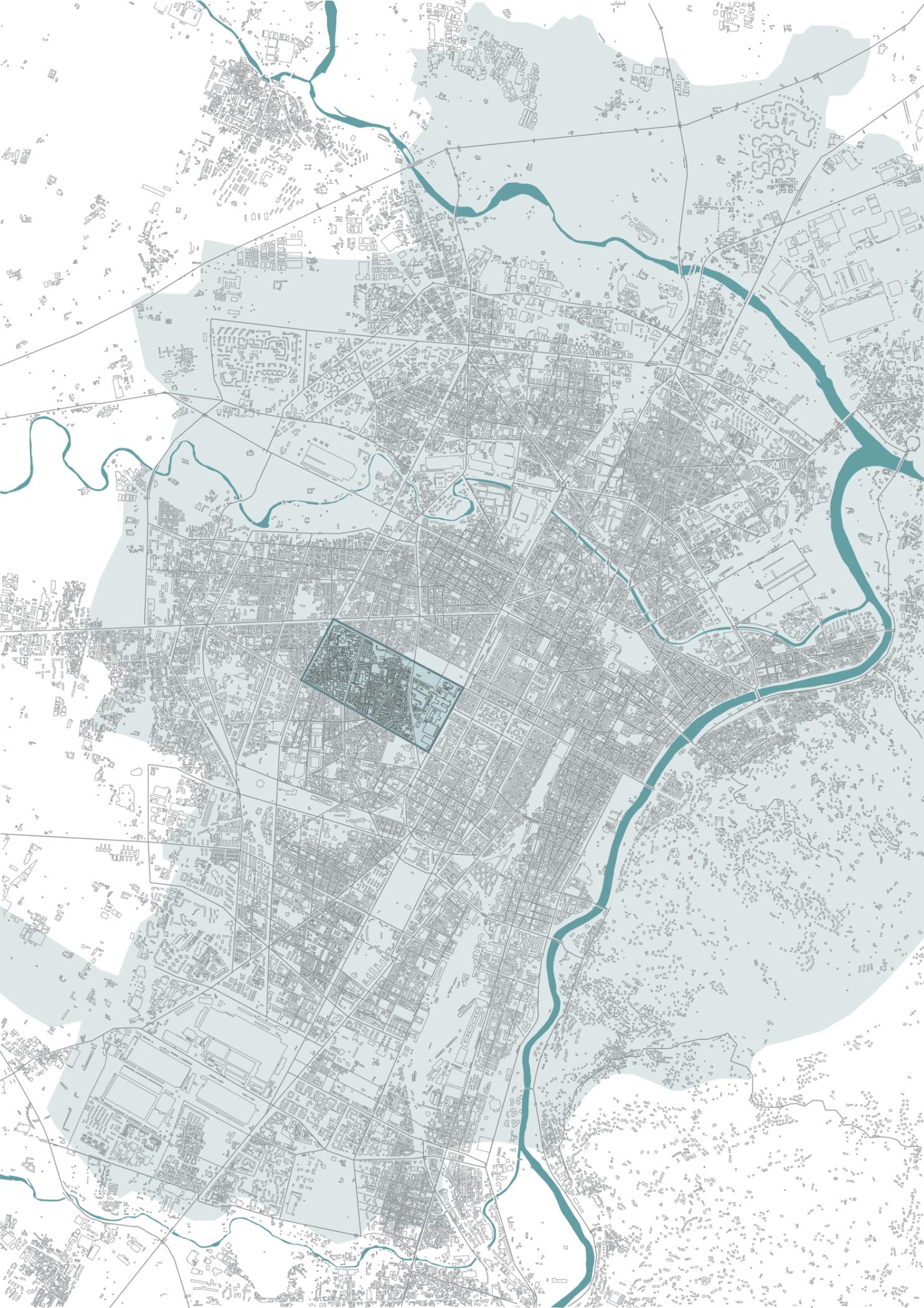


FIG.19-PATRIMONIO ATC SUL TERRITORIO DI TORINO.

FIG.18-QUARTIERE CENISIA.



3.3. CONTESTUALIZZAZIONE STORICA DELL'ENTE ATC

L'ente ATC nasce come ex IACP (Istituto Autonomo Case Popolari), un ente pubblico costituito per volontà dell'amministrazione civica guidata dal sindaco Secondo Frola che intendeva fronteggiare il disagio causato dalla mancanza di abitazioni. L'IACP viene istituito ufficialmente a Torino nel 1907 grazie anche al coinvolgimento della Cassa di Risparmio e dell'Istituto delle Opere pie di San Paolo che elargiscono somme di denaro a fondo perduto.

Già fra il 1907 e il 1918 vengono realizzati otto insediamenti a cui si aggiungono altri tre gruppi nel primo dopoguerra quando l'Istituto riesce a interrompere lo stallo edilizio alla base della crisi abitativa in atto nel periodo.

Nel 1935 l'Istituto viene tramutato in ente con competenze non solo più cittadine ma anche provinciali ed in periodo fascista diventa promotore di una fervente attività edilizia. Inoltre, riesce ad affermarsi come centro di coordinamento per le politiche della casa, ruolo che si rivela importante soprattutto nel periodo di avvio della costruzione di grandi quartieri come Lucento, Mirafiori, Regio Parco, Falchera e Vallette.

L'ente è stato anche stazione appaltante per INA-casa e Gescal¹ e costruttore su committenza dell'industria Fiat.

Fra gli anni 1960 e 1990 si crea una situazione di dissesto finanziario legata a problemi di gestione dell'ingente patrimonio edilizio che porta a due periodi di commissariamento. Tali problemi vengono superati nel 1993 quando a seguito della riorganizzazione dei compiti in materia di edilizia pubblica dello Stato e delle Regioni, l'ente viene riorganizzato in Agenzia Territoriale per la Casa (ATC) della provincia di Torino ai sensi della legge regionale n.11 del 26 aprile 1993.

Pertanto, l'IACP diventa un ente pubblico ausiliario alla regione Piemonte, avente competenze nell'ambito della provincia di appartenenza e con la possibilità di azione nei territori provinciali limitrofi.

L'ATC è dotato di autonomia amministrativa, organizzativa, contabile e patrimoniale e mentre nei primi anni di fondazione subisce gli strascichi delle gestioni commissariali, nel 1996 vengono nuovamente insediati la presidenza, il consiglio di

1. Il piano INA-Casa nasce nel 1949 con la legge Fanfani, prorogata poi nel 1955 per ulteriori 7 anni, allo scopo di assicurare fondi per l'edilizia popolare tramite una contribuzione mista garantita dal concorso di stato, dai lavoratori dipendenti e dai datori di lavoro tramite una trattenuta sullo stipendio. Soppresso nel 1963, l'assegnazione del patrimonio edilizio passa alla Gestione per le case dei lavoratori, GESCAL.[5]

amministrazione e la direzione.

Nel periodo successivo si apre una fase di risanamento del bilancio dopo circa cinquant'anni di deficit con un impegno rinnovato e basi solide per diverse iniziative che hanno permesso di coinvolgere anche gli inquilini stessi.

Attualmente, l'ATC si occupa anche di interventi e processi di recupero e riqualificazione allo scopo di conservare il proprio patrimonio, possibili grazie alle risorse e ai fondi provenienti direttamente dallo Stato, dalle Regioni o da altre istituzioni.

3.3.1. PRIMO PERIODO DI COSTRUZIONE : 1907-1918

Al termine del primo periodo di costruzione, l'ATC poteva contare trentanove fabbricati facenti parte di otto quartieri diversi.

Questo periodo è stato segnato da alcuni caratteri ricorrenti come la costruzione di complessi di quattro o cinque piani fuori terra concentrati su isolati di dimensioni limitate e orientati in modo ottimale rispetto all'arco solare. Gli appartamenti avevano una consistenza di massimo tre vani ed erano dotati di doppio affaccio.

Vi era inoltre la presenza di cortili, in una misura circa pari al 50% dell'area totale, caratterizzati da alberi di altezza media spesso disposti a filari. Inoltre, i fabbricati erano posizionati su filo strada e localizzati nei dintorni degli opifici industriali, andando a configurare come un anello intorno alla città. [3]

Un'altro aspetto caratterizzante è stato quello di evitare totalmente la presenza di spazi comuni che potessero generare promiscuità, a tal proposito ogni appartamento era stato dotato di servizi igienici propri, così come una cucina con allacciamento alla rete del gas.

Intorno al 1914 la depressione economica implica il verificarsi di irregolarità sul pagamento degli affitti, pertanto l'Istituto si trova a dover fronteggiare problemi economici per la prima volta. Il periodo però, ha breve durata e non lascia conseguenze.

Durante il periodo del primo conflitto mondiale invece, l'IACP offre il suo aiuto alla comunità, accogliendo i profughi e i militari all'interno degli appartamenti sfitti e affittando al municipio i locali destinati ad ospitare le scuole elementari. Pertanto, l'Istituto non ha solo svolto unicamente una funzione di risposta all'emergenza abitativa ma anche una funzione morale.

3.4. PRESENTAZIONE DEL CASO STUDIO

Per eseguire le analisi e definire la validità della metodologia illustrata nei capitoli successivi, è stato necessario individuare un caso studio.

Dal XVI Rapporto dell'Osservatorio sulla Condizione Abitativa della Città di Torino emerge che il 3,5% delle unità abitative nel territorio cittadino è annoverabile come edilizia sociale, di questi il 68% è stato costruito prima del 1981, mentre solo il 14% risulta costruito in epoca successiva al 1991.[5] Alla luce di questi dati emerge come molti di questi complessi necessitino di interventi di retrofit al fine di limitarne il consumo energetico, realtà che deve fare i conti con la carenza di fondi necessari per realizzare gli interventi. Inoltre, il patrimonio di Edilizia Residenziale Pubblica di Torino è costituito da edifici costruiti in epoche e contesti urbani molto differenti fra loro, pertanto, anche l'approccio ai complessi e le strategie d'intervento dovranno tenere conto di queste differenze.

Come già accennato nella sezione 3.2. il quartiere Cenisia è contraddistinto da una identità urbana precisa, infatti l'area in passato era caratterizzata da terreni agricoli su cui sono state edificate le prime industrie e le abitazioni dei lavoratori negli immediati dintorni. Questo ambito urbano ha conservato nel tempo sia la memoria industriale della città che una parte della città pubblica che è stato un aspetto integrante dello sviluppo produttivo.

Dal punto di vista morfologico il quartiere presenta tre diverse classi di edifici residenziali. Della prima classe fanno parte gli edifici residenziali destinati all'affitto costruiti intorno alla seconda metà dell'Ottocento e le case di borgata, spesso caratterizzate dalla presenza di botteghe, caratteristiche della seconda fase di urbanizzazione ovvero databili intorno ai primi due decenni del Novecento. La seconda comprende gli edifici di inizio Novecento facenti parte della terza fase di urbanizzazione, sono edifici destinati all'affitto che spesso ospitano negozi nel caso in cui affaccino su vie commerciali. La terza comprende edifici degli anni trenta-quaranta del Novecento appartenenti alla quarta fase dell'urbanizzazione, ovvero edifici da reddito di livello medio.

In accordo con l'ATC è stato individuato all'interno del quartiere, un isolato di particolare interesse di case di Edilizia Residenziale Popolare (ERP), candidato al bando del Programma Innovativo Nazionale per la Qualità dell'Abitare (PINQuA).

Per definire correttamente il modello geometrico è stato necessario ricavare i seguenti parametri: l'impronta a terra degli edifici oggetto della simulazione, la loro altezza e la percentuale vetrata rispetto alla superficie totale di ogni facciata.

Queste informazioni, per ognuno degli edifici, sono state ricavate grazie ad un fascicolo di dati resi disponibili dall'ente ATC che ha fornito un rilievo completo dell'isolato. Inoltre è stato eseguito un rilievo conoscitivo e fotografico direttamente sul luogo che ha permesso di arrivare ad una visione completa del sito di indagine.

Il caso studio è un isolato di forma quadrangolare situato appunto nel quartiere Cenisia, che presenta caratteristiche proprie rispetto agli isolati delle zone residenziali limitrofe che fanno parte di un tessuto urbano consolidato.

Si tratta, infatti, del 5° Quartiere IACP costruito nel 1910 e compreso fra gli assi viari di Corso Racconigi, Via Chianocco, Via Revello e Via Foresto. Su quest'area di 14 585 m² si trovano otto fabbricati con destinazione d'uso residenziale, disposti parallelamente rispetto al corso e caratterizzati dalla presenza di cortili condominiali su cui affacciano gli alloggi, parcheggi interni e vegetazione di media altezza. Attualmente sono presenti 350 alloggi di cui 52 appartamenti privati e 298 in locazione.

Il complesso è stato ampliato una prima volta nel 1938 con due fabbricati e una seconda volta nel 1978 con una sopraelevazione di due piani che ha interessato i due fabbricati con affaccio su Corso Racconigi, realizzata nel rispetto dei caratteri stilistici della preesistenza.

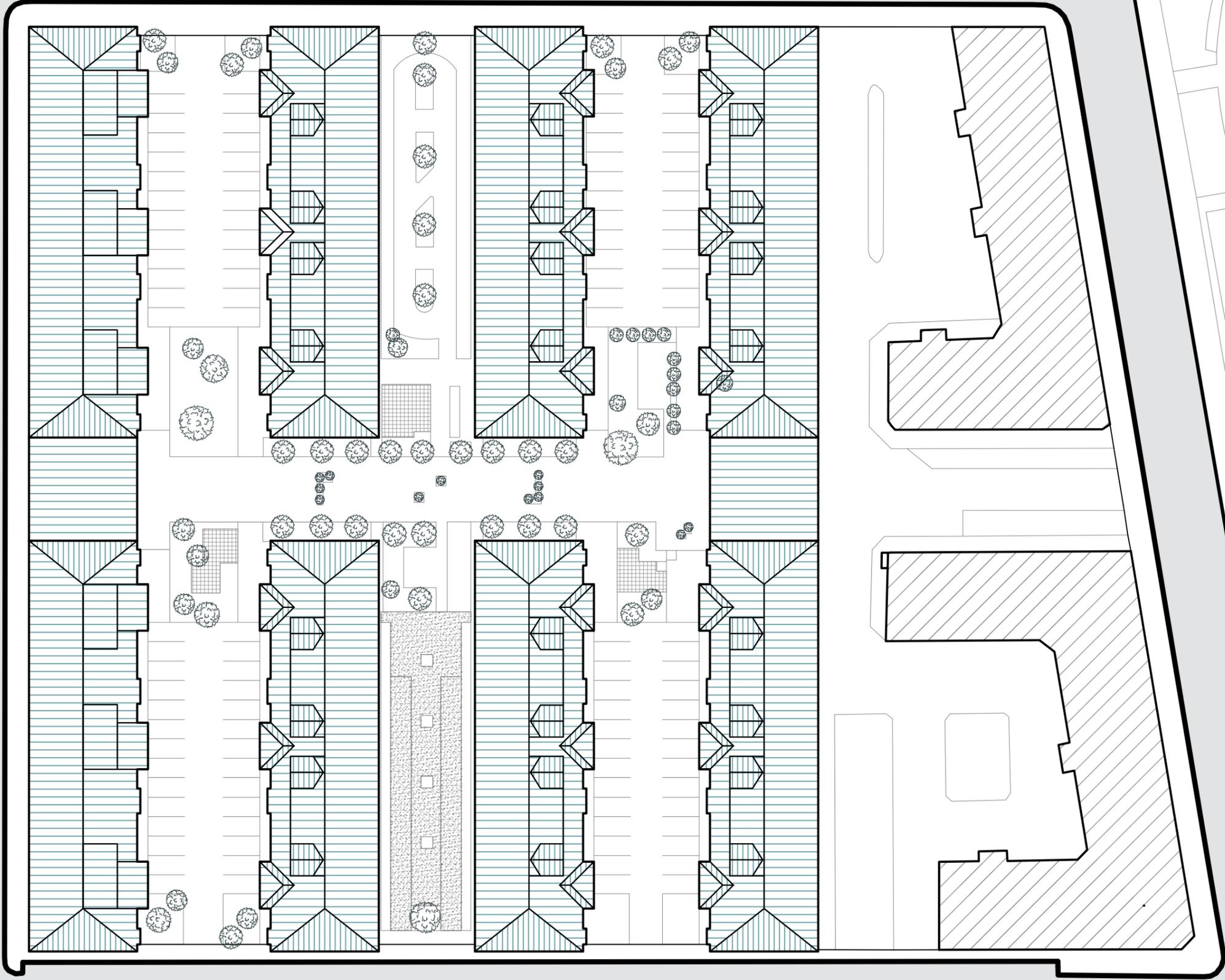
Gli edifici sono costituiti da un piano seminterrato adibito a cantine, e da cinque piani fuori terra destinati ad abitazione -ad eccezione dei due fabbricati sopraelevati che presentano un'altezza di sette piani fuori terra- e sono realizzati in muratura portante in laterizio e solai voltati anch'essi in laterizio. Le sopraelevazioni invece, sono state realizzate in calcestruzzo armato.

L'accesso all'area avviene da sei ingressi posti lungo gli assi stradali che delimitano l'isolato e in particolare un accesso principale su Corso Racconigi, due su Via Foresto, due su Via Chianocco e uno su Via Revello. L'ingresso sul corso e quello su Via Revello sono caratterizzati dalla presenza di un corpo di fabbrica di due piani fuori terra ciascuno, che fungono da unione dei due fabbricati affiancati che in questo modo assumono la configurazione di due stecche.

L'accesso ai singoli edifici invece, avviene attraverso tre corpi scala distinti.

Negli anni ottanta i fabbricati sono stati oggetto di alcune ristrutturazioni che hanno interessato l'assetto planimetrico degli appartamenti, l'ampliamento dei servizi igienici e l'inserimento dei corpi ascensore. Inoltre, i serramenti che originariamente erano costituiti da un telaio in legno e vetro singolo, sono stati sostituiti da serramenti più recenti in alluminio con vetrocamera.





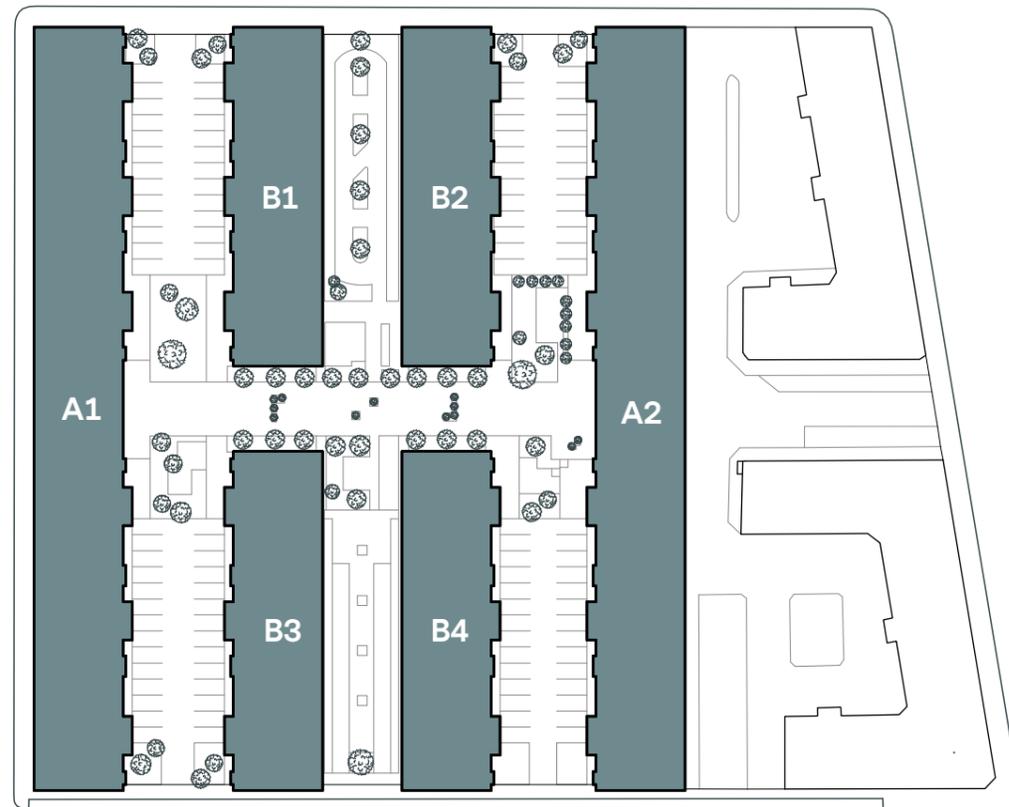
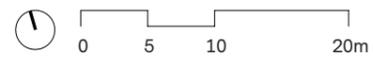


FIG.22-CODICI UTILIZZATI PER GLI EDIFICI.



FIG.21-PLANIMETRIA DEL CASO STUDIO.



	A1	A2	B1	B2	B3	B4
Anno di costruzione	1910 - 1978	1910	1910	1910	1910	1910
Numero di piani	7	5	5	5	5	5
Sopraelevazione	SI	NO	NO	NO	NO	NO
Impronta a terra [m ²]	1530	1530	682	682	682	682
Altezza [m]	25	19	19	19	19	19
Numero di unità abitative	107	83	40	40	40	40
Numero vani scala	7	7	3	3	3	3



TAB.5-INFORMAZIONI GENERALI SUGLI EDIFICI.

3.4.1. SOPRALLUOGO

Il 3 giugno 2021 è stato eseguito un sopralluogo del sito al fine avere una visione diretta degli edifici di cui verrà presentata la simulazione energetica.

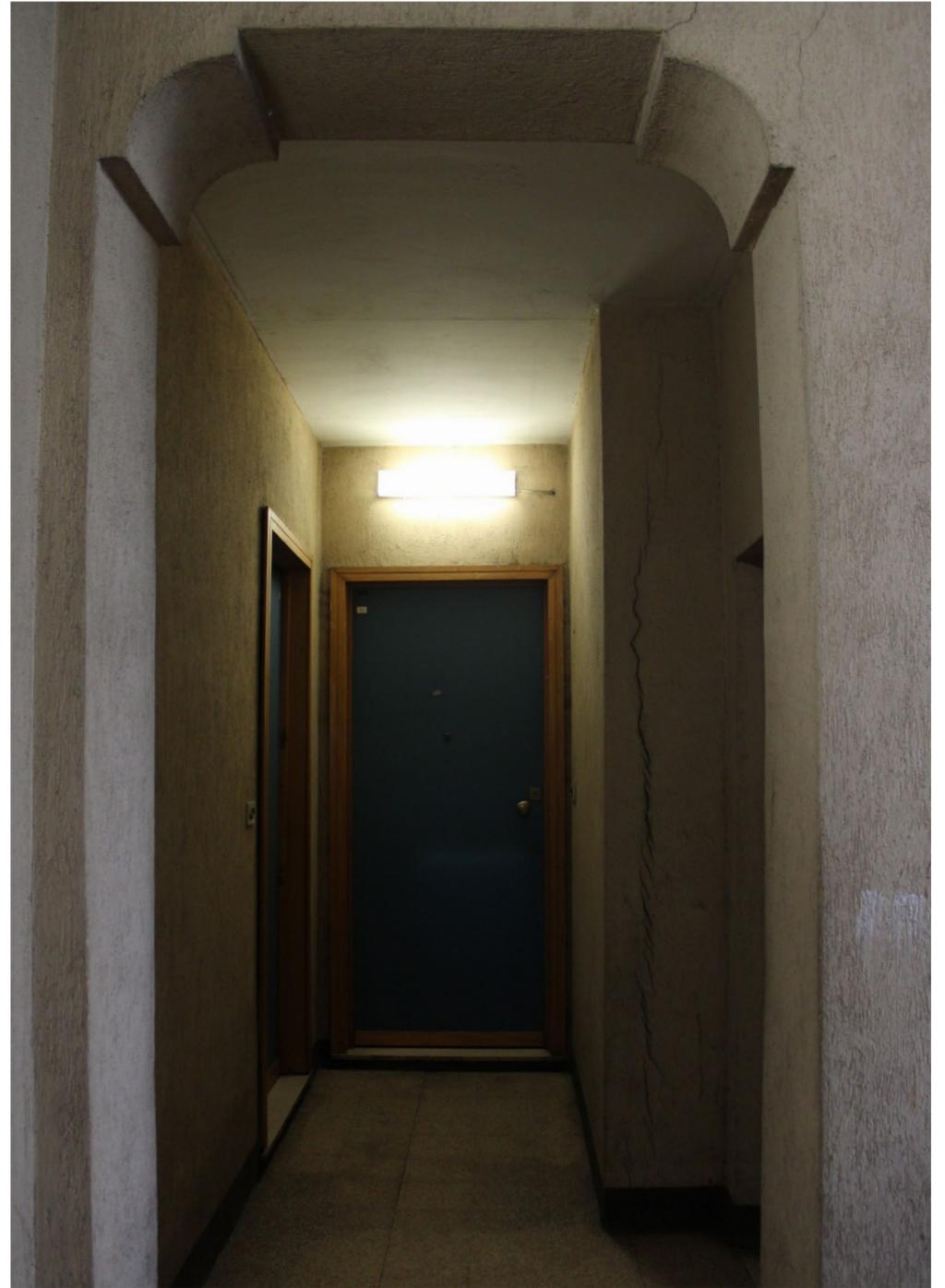
Nonostante le informazioni fossero state già fornite in precedenza dall'ATC, il sopralluogo è stato necessario per prendere coscienza ed avere un quadro completo delle diverse caratteristiche dell'isolato.

Durante il sopralluogo è stato possibile raccogliere ulteriori informazioni riguardo eventuali ristrutturazioni parlando direttamente con i residenti, è stato possibile avere accesso ad alcuni degli ambienti degli edifici e pertanto verificare le informazioni relative alla tipologia costruttiva, allo stato di conservazione, alla presenza di eventuali schermature solari, alla sostituzione dei serramenti ma anche ricavare le informazioni relative alla tipologia di impianti presenti. Inoltre, sono stati valutati gli spazi di pertinenza esterni e la presenza di aree verdi di dimensioni modeste.

Di seguito vengono riportate le fotografie scattate all'interno dell'area.









3.5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

[1] V. Comoli Mandracchi, *Torino*, Laterza, Roma - Bari 1983.

[2] D. Adorni, M. D'Amuri, D. Tabor, *La casa pubblica, Storia dell'Istituto autonomo case popolari di Torino*, Viella, Roma, 2017.

[3] IACP Torino, *Sessantennio di fondazione Istituto autonomo per le case popolari della provincia di Torino, 1907-1967*, Torino, 1968.

[4] Politecnico di Torino. Dipartimento Casa Città, *Beni culturali ambientali nel Comune di Torino, Vol. 1*, Società degli ingegneri e degli architetti in Torino, Torino, 1984.

[5] Città di Torino - Direzione servizi sociali, area edilizia residenziale pubblica, XVI *Rapporto dell'Osservatorio sulla condizione abitativa della città di Torino*, Torino, 2019.

[6] <https://www.museotorino.it/view/s/6f5e05e8d9934e2d8c9ac665658b42a4>

Museo Torino, consultato nel maggio 2021, <https://www.museotorino.it/site>

Comune di Torino, consultato nel maggio 2021, <http://www.comune.torino.it/>

4. COSTRUZIONE DEL MODELLO

Come è già stato detto, la modellazione e la simulazione energetica verranno eseguite attraverso due *software* differenti descritti nella sezione 2., ovvero CitySim Pro e CEA. Diverse sono le motivazioni che hanno dettato la scelta di tali programmi, in primo luogo la possibilità di accesso ai *software*, in secondo luogo la tipologia di motore di calcolo ed infine la possibilità di poter comparare i risultati una volta eseguita la simulazione. Nonostante i due programmi presentino alcune differenze, il modello è stato costituito tenendo in considerazione gli stessi parametri di input in modo da utilizzare come base di partenza due modelli che risultino il più simile possibile fra loro.

Sebbene i dati necessari alla costituzione del modello siano stati forniti dall'ATC, in alcuni casi è stato necessario integrare e completare i parametri richiesti dai due *software*. Questa operazione è stata possibile grazie a database di natura statistica ed informativa, a pubblicazioni scientifiche, alle normative e ad osservazioni e riflessioni sviluppate sulla base delle esperienze maturate nel corso degli anni di studio.

Con riferimento a quanto appena detto, i dati meteorologici su base oraria sono stati ricavati dai set di dati resi disponibili sul sito di EnergyPlus, mentre la definizione dei componenti di involucro, sia opachi che trasparenti, è avvenuta a partire dalle informazioni fornite da ATC attraverso il fascicolo del PINQuA, supportata dagli studi contenuti all'interno del progetto TABULA [1-2], implementata dalle informazioni riportate all'interno della normativa UNI TR 11552 [6], completata da quanto riscontrato personalmente durante il sopralluogo e dalle esperienze maturate nel corso degli anni.

Le informazioni relative alla frequenza e all'intensità degli apporti termici dovuti alle sorgenti endogene -valutati in modo parametrico- sono state ottenute in accordo con quanto riportato all'interno della normativa EN 16798-1 del 2019 [7], con riferimento ad una destinazione d'uso residenziale. Per la tipologia di impianti di

condizionamento installati, invece, anche in questo caso le informazioni di partenza sono state fornite dall'ATC, mentre i parametri di input necessari ai calcoli sono stati desunti dagli Attestati di Prestazione Energetica (APE) scaricabili dal sito del SIPEE (Sistema Informativo per la Prestazione Energetica degli Edifici) e completati quando necessario in accordo con quanto riportato all'interno del progetto TABULA.

Inoltre, in relazione agli Attestati di Prestazione Energetica, si fa notare come sia stato possibile ricavare solo una parte dei dati necessari, come ci si attendeva, in quanto i documenti risultano scaricabili solo per una minima percentuale delle unità abitative rispetto a quelle complessive. In aggiunta a ciò, la redazione di tali documenti è da imputare a certificatori diversi e avvenuta nel corso di anni diversi, pertanto sono state riscontrate alcune incongruenze nei dati raccolti; ciò detto è stato possibile selezionare in modo critico le informazioni necessarie.

Infine, si fa notare che nel caso in cui le informazioni siano risultate mancanti per alcune unità immobiliari, è stato possibile procedere alla definizione delle caratteristiche energetiche necessarie basandosi sulle osservazioni e riflessioni maturate in seguito al sopralluogo e sulle esperienze sviluppate nel corso degli anni, tenendo presente che tutti gli edifici risultano assimilabili fra loro in quanto facenti parte di un unico complesso con medesime caratteristiche.

Nei paragrafi che seguono vengono analizzate nello specifico le categorie di parametri di input necessarie per la costituzione del modello energetico.

4.1. MODELLO TRIDIMENSIONALE

La prima operazione necessaria da compiere quando si utilizza un software UBEM è la generazione del modello tridimensionale dell'area oggetto di analisi.

Nel caso dei due programmi selezionati per eseguire la simulazione, CitySim Pro e City Energy Analyst, la generazione del modello avviene con modalità differenti.

CITYSIM PRO

Il modello urbano tridimensionale su CitySim Pro è stato generato estrudendo l'impronta a terra di ogni edificio dell'area, rispetto all'asse verticale.

Tale operazione è stata effettuata sul programma AutoCAD partendo dal rilievo dell'isolato fornito dall'ATC all'interno del fascicolo relativo al PINQuA, mentre per la modellazione tridimensionale del contesto si è fatto riferimento alla carta tecnica del comune di Torino.

Il modello 3D così ottenuto è stato successivamente importato sul programma SketchUp per convertire i solidi in superfici, eliminare le pareti adiabatiche -che in caso contrario sarebbero state considerate dal software in fase di calcolo in quanto, ogni parete presente nel modello viene valutata come disperdente verso l'esterno - e per denominare correttamente i diversi layer secondo le convenzioni utilizzate dal programma.

Come già accennato, oltre agli edifici oggetto di analisi sono stati modellati anche gli isolati nelle immediate vicinanze, così facendo è stato possibile considerare tali edifici come ostruzioni durante il calcolo delle ombre portate. Pertanto, per quanto riguarda tali isolati, non sono state definite le proprietà termiche ed energetiche.

Al termine della modellazione su SketchUp, il file è stato esportato in formato DXF2000 per poter essere importato su CitySim Pro.

Si fa notare che il programma supporta la presenza di facciate inclinate, pertanto sarebbe stato possibile importare un modello geometrico che comprendesse la modellazione delle falde degli edifici interessati dall'analisi, in questo caso però, si è preferito non procedere con la modellazione della copertura per poter ottenere un modello pressoché identico a quello che è possibile generare sul software CEA che al contrario non ammette superfici inclinate.

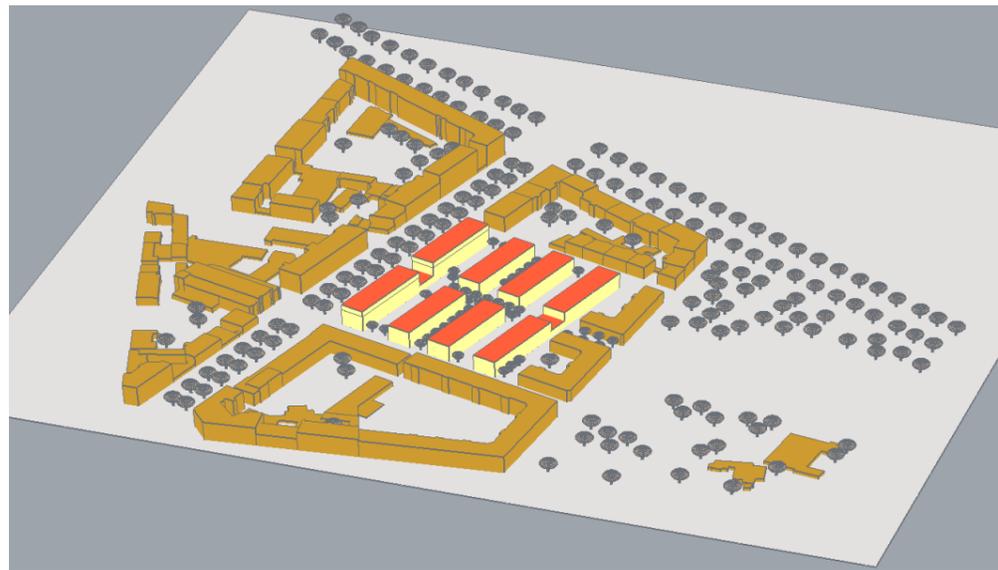
CEA

Al contrario di CitySim Pro, nel caso di CEA non è stato necessario generare un modello tridimensionale *ad hoc*, ma è stato possibile generare le volumetrie direttamente tramite l'interfaccia del programma che come già ampiamente discusso in 2.2., integra al suo interno un collegamento ad Open Street Maps.

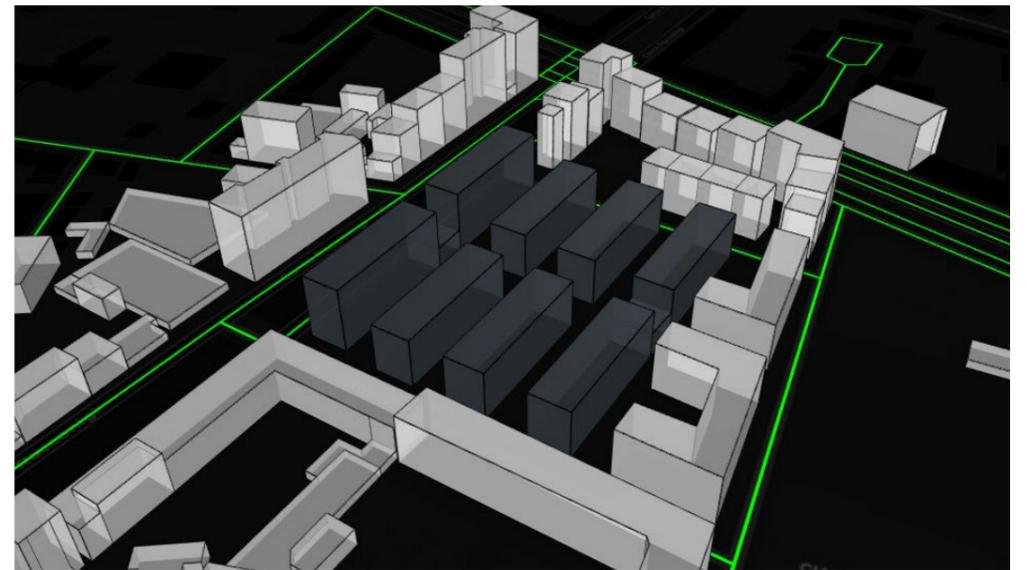
In questo modo è stato possibile selezionare tramite l'interfaccia grafica del programma, l'area oggetto di interesse su una mappa bidimensionale e successivamente il software ha provveduto in automatico alla generazione del modello tridimensionale e del contesto ritenuto rilevante ai fini della simulazione, di cui lo stesso utente può settare il raggio -in metri- ritenuto adeguato.

Si fa notare che all'interno di CEA è possibile selezionare gli elementi di cui si vuole tenere conto nel modello oltre agli edifici; infatti, è possibile importare anche le strade -pedonali, ciclabili, destinate al traffico veicolare e private- e la geometria del terreno.

4.1.1. RAPPRESENTAZIONE TRIDIMENSIONALE



^
FIG.23-MODELLO TRIDIMENSIONALE DI CITYSIM PRO.



^
FIG.24-MODELLO TRIDIMENSIONALE DI CEA.

4.1.2. SUPERFICI CLIMATIZZATE

Definire le superfici climatizzate è un passaggio di fondamentale importanza in quanto influenzano in modo rilevante il calcolo della simulazione energetica.

Nel caso dell'isolato di Corso Racconigi, è stato possibile conoscere con precisione tutte le superfici dei diversi appartamenti presenti all'interno dell'area, grazie alle informazioni fornite dall'ATC che ha effettuato un rilievo tramite una nuvola di punti, restituito in seguito bi-dimensionalmente su AutoCAD. In aggiunta a ciò, è stato effettuato un sopralluogo conoscitivo dell'area personalmente, per poter avere una maggiore coscienza e osservare direttamente le informazioni apprese precedentemente tramite il fascicolo del PINQuA.

Si fa notare che grazie alla precisione dei dati forniti è stato possibile evitare il grado di incertezza che sarebbe derivato dalla stima di tali superfici attraverso metodologie indirette.

Nella tabella di seguito vengono riportati i valori delle superfici dei diversi appartamenti relativi ad ogni edificio.

Edificio	Piano	Sup.1 [m ²]	Sup.2 [m ²]	Sup.3 [m ²]	Sup.4 [m ²]	Sup.5 [m ²]	Sup.6 [m ²]	Sup.7 [m ²]	Sup.8 [m ²]	Sup.9 [m ²]	Sup.10 [m ²]	Sup.11 [m ²]	Sup.12 [m ²]	Sup.13 [m ²]	Sup.14 [m ²]	Sup.15 [m ²]	Sup.16 [m ²]	Sup.17 [m ²]	Sup.18 [m ²]
A1	1	39	35	48,8	110	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	63	68,5
	2	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	3	39	35	48,8	49	59	80	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	50	63	68,5
	4	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	75	48,8	49	59	47,8	35	50	50	63	68,5
	5	39	35	48,8	49	59	47,8	35	88,5	35	48,8	49	59	47,8	35	50	50	63	68,5
	6	39	35	48,8	49	59	80	50	74	48,8	49	59	47,8	35	50	50	50	63	68,5
	7	74	48,8	49	59	47,8	35	50	74	48,8	49	59	47,8	35	50	50	50	63	68,5
A2	1	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	2	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	3	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	4	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	5	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
B1	1	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	2	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	3	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	4	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	5	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
B2	1	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	2	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	3	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	4	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	5	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
B3	1	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	2	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	3	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	4	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	5	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
B4	1	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	2	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	3	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	4	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5
	5	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	39	35	48,8	49	59	47,8	35	50	63	68,5



4.2. DATI CLIMATICI

I programmi CitySim Pro e CEA supportano due formati differenti di file climatici, rispettivamente aventi estensione CLI e EPW (*EnergyPlus Weather File*).

CITYSIM PRO

Come accennato sopra, all'interno del software è necessario importare un file climatico con estensione CLI, scaricabile tramite il database Meteonorm. Nel caso della presente analisi, per fare in modo che la simulazione sui due programmi venga basata sui medesimi dati di input, permettendo un confronto dei risultati una fase finale, si è deciso di utilizzare i parametri del file EPW, che in questo caso sono stati selezionati e successivamente importati all'interno del file con estensione CLI.

Oltre al file climatico, su CitySim Pro è necessario importare un file con estensione HOR, che riporta la superficie orizzontale e che può essere generato con Meteonorm. Tale file può essere scaricato come DTM (*Digital Terrain Model*) o come DSM (*Digital Surface Model*), dal momento che in fase di modellazione tridimensionale sono stati generati anche gli edifici del contesto, in questo caso si è proceduto scaricando un DTM che, quindi, contiene unicamente le informazioni relative al terreno e non quelle relative alle ostruzioni.

Nella pagina seguente si riporta la tabella contenente i parametri meteo presi in considerazione da CitySim Pro, si fa notare che la codifica utilizzata per i parametri riportati in tabella, è quella proposta all'interno del manuale di Meteonorm, mentre le unità di misura risultano essere quelle accettate dai motori di calcolo del software.

CEA

Nel caso di CEA, come già accennato, è necessario importare un file climatico con estensione EPW. Tale file è stato scaricato direttamente dalla sezione *Weather* dal sito di EnergyPlus e riguarda i dati registrati presso la stazione meteorologica di Torino-Caselle ($\varphi = 45^{\circ}18'$; $\lambda = 7^{\circ}65'$; 282 m.s.l.m.). I parametri del file climatico così ottenuto sono stati poi riportati anche all'interno del file con estensione CLI da importare su CitySim Pro.

Nelle pagine seguenti si riporta la tabella contenente i parametri meteo considerati da CEA e presenti all'interno del file con estensione EPW. Anche in questo caso, si fa notare che la codifica utilizzata per i parametri riportati in tabella, è quella proposta all'interno del manuale di Meteonorm, mentre le unità di misura risultano essere quelle accettate dai motori di calcolo del software.

Sigla	Variabile	Unità di misura
dm	Giorno	-
m	Mese	-
h	Ora	-
G_Dh	Irradianza solare diffusa sul piano orizzontale	W/m ²
G_Bn	Irradianza solare diretta normale	W/m ²
Ta	Temperatura dell'aria esterna	°C
Ts	Temperatura del terreno	°C
FF	Velocità del vento	m/s
DD	Direzione de vento	°
RH	Umidità relativa	%
RR	Tasso di precipitazioni	mm
N	Copertura nuvolosa	octal

Sigla	Variabile	Unità di misura
dm	Giorno	-
m	Mese	-
h	Ora	-
G_G0	Radiazione al bordo superiore dell'atmosfera	Wh/m ²
G_ex	Radiazione solare extraterrestre orizzontale	Wh/m ²
G_Gh	Irradianza solare globale sul piano orizzontale	Wh/m ²
G_Bn	Irradianza solare diretta normale	Wh/m ²
G_Dh	Irradianza solare diffusa sul piano orizzontale	Wh/m ²
LG	Illuminamento globale	lux
LD	Illuminamento diffuso	lux
LZ	Illuminamento zenitale	lux
N	Copertura nuvolosa	octal
N1	Copertura opaca volta celeste	octal
Ta	Temperatura dell'aria esterna	°C
Td	Temperatura di rugiada dell'aria esterna	°C
RH	Umidità relativa	%
PP	Pressione atmosferica	Pa
DD	Direzione del vento	°
FF	Velocità del vento	m/s
Vis	Visibilità	km
w	Angolo di incidenza solare orario	°
Sn	Approfondimento nevoso	cm



4.3. DEFINIZIONE DELL' INVOLUCRO

Le informazioni relative alla tipologia costruttiva e all'involucro -sia opaco che trasparente- dei fabbricati facenti parte dell'isolato oggetto di studio, sono state ricavate anche in questo caso attraverso il fascicolo relativo al PINQuA fornito dall'ATC e sono state direttamente verificate durante il sopralluogo conoscitivo.

Come già detto in precedenza (3.4.), l'isolato è stato edificato nel 1910, epoca in cui la tipologia costruttiva prevedeva l'impiego di muratura portante in laterizio pieno e solai voltati anch'essi in laterizio. Il fabbricato con affaccio su Corso Racconigi invece, è stato oggetto di una sopraelevazione di due piani avvenuta nel 1978, che è stata realizzata in calcestruzzo armato.

Di seguito si riporta la tabella riepilogativa delle tipologie costruttive individuate per i fabbricati presenti all'interno dell'area di indagine.

Edificio	Anno di costruzione	Tipologia costruttiva
A1	1910 Sopraelevato nel 1978	Muratura portante in laterizio pieno Solai voltati in laterizio Sopraelevazione in CLS e solai in laterocemento Copertura in legno
A2	1910	Muratura portante in laterizio pieno Solai voltati in laterizio Copertura in legno
B1	1910	Muratura portante in laterizio pieno Solai voltati in laterizio Copertura in legno
B2	1910	Muratura portante in laterizio pieno Solai voltati in laterizio Copertura in legno
B3	1910	Muratura portante in laterizio pieno Solai voltati in laterizio Copertura in legno
B4	1910	Muratura portante in laterizio pieno Solai voltati in laterizio Copertura in legno



Al fine di arrivare a definire nello specifico le stratigrafie dei componenti orizzontali, verticali e inclinati - dal punto di vista termofisico - è stato necessario ricorrere alle informazioni riportate all'interno del progetto europeo *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment* (TABULA), elaborato allo scopo di armonizzare le tipologie costruttive riferite all'ambito residenziale del patrimonio immobiliare europeo. In accordo con quanto indicato all'interno dello studio, ciascuna tipologia di fabbricati è funzione della zona climatica, della classe di dimensione edilizia e dell'epoca di costruzione. Quindi, essendo nota l'epoca di costruzione dell'edificio, è stato possibile risalire alle informazioni relative alle tipologie costruttive sconosciute.

Una volta note le caratteristiche dei fabbricati, è stato possibile arrivare alla determinazione dei parametri termofisici grazie all'utilizzo della normativa UNI/TR 11552 del 2014, che fornisce un abaco delle stratigrafie -relative all'involucro opaco- più comunemente riscontrate in funzione dell'epoca costruttiva e della regione di appartenenza. Attraverso tale normativa è possibile determinare alcune caratteristiche specifiche di ciascun strato caratterizzante i diversi componenti di involucro come lo spessore, la conducibilità termica, la massa volumica e il calore specifico. Inoltre, è possibile individuare direttamente la trasmittanza termica del componente in funzione dello spessore totale del componente stesso.

Alla luce di quanto detto fin ora, in accordo con le informazioni riportate sulla normativa, è stato possibile definire nel dettaglio i componenti di involucro, individuati precedentemente attraverso il progetto TABULA.

Infine, si fa notare che le resistenze liminari -interna ed esterna- necessarie per il calcolo della trasmittanza termica dei componenti opachi, sono state ricavate attraverso la normativa EN ISO 6946 [8], in funzione della direzione del flusso termico.

Nella pagina seguente viene riportata la tabella che presenta l'assegnazione - per ogni fabbricato - di un codice relativo a ciascun componente di involucro (orizzontale, verticale, inclinato) individuato.

Componente	A1	A2	B1	B2	B3	B4
Componenti opachi verticali	COV_01 COV_02	COV_01	COV_01	COV_01	COV_01	COV_01
Componenti opachi orizzontali - chiusure inferiori	COOI_01 COOI_02	COOI_01	COOI_01	COOI_01	COOI_01	COOI_01
Componenti opachi orizzontali - chiusure superiori	COOS_01 COOS_02	COOS_01	COOS_01	COOS_01	COOS_01	COOS_01
Componenti trasparenti	CTV_01	CTV_01	CTV_01	CTV_01	CTV_01	CTV_01

4.3.1. INVOLUCRO OPACO

CITYSIM PRO

L'inserimento dei dati relativi all'involucro opaco su CitySim PRO può avvenire direttamente tramite l'interfaccia grafica del programma o tramite la compilazione del file con estensione XML. Dal momento che il primo processo -nel caso in cui si abbiano più edifici- risulta essere macchinoso, si è proceduto con il secondo metodo, ovvero la compilazione dell'XML.

In questo caso all'inizio del file, nel *Tags Composite*, devono essere definite tutte le stratigrafie che è necessario utilizzare all'interno del modello. Ogni *Composite* contiene le informazioni termofisiche di ogni strato relative a ciascun componente di parete, di solaio e di copertura individuato -a partire dall'esterno verso l'interno- e a cui viene assegnato un codice specifico; tali informazioni riguardano lo spessore, la conducibilità, il calore specifico e la densità dello strato.

Le informazioni inserite all'interno del *Tags Composite*, vengono riprese successivamente all'interno dei *Tags Walls*, del *Tags Roofs* e del *Tags Floors*, che sono necessari al fine di caratterizzare ciascuna zona termica presente all'interno del modello.



CEA

L'inserimento dei dati relativi all'involucro su CEA invece, avviene attraverso la sezione *Envelope* del *database Assemblies*. All'interno di tale sezione sono presenti le schede *Roof*, *Wall* e *Floor* in cui è possibile inserire le informazioni termofisiche dei diversi componenti e il loro codice identificativo.

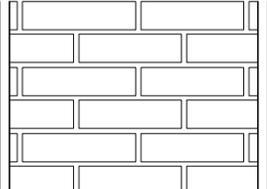
Nello specifico nelle schede *Roof* e *Wall* è possibile inserire la trasmittanza, il coefficiente di assorbimento solare ricavabile attraverso la normativa ISO 13790 [9], l'emissività della superficie esterna, anch'essa ricavabile attraverso la normativa ISO 13790 e l'indice di riflessione nello spettro dell'infrarosso del componente, mentre nella scheda *Floor* è possibile inserire unicamente la trasmittanza del componente.

Inoltre, si fa notare che, a differenza di CitySim Pro, in CEA è possibile considerare un ulteriore parametro, relativo alle emissioni incorporate di GHGs per metro quadro di superficie di componente espresse in $\text{kg CO}_2_{\text{eq}}/\text{m}^2$, relative all'intero processo di produzione del componente stesso.

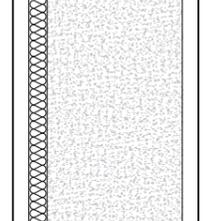
È possibile inserire tale parametro sia nella scheda *Roof*, che in *Wall* e *Floor*.

Nelle pagine seguenti si riportano le specifiche delle stratigrafie relative all'involucro opaco.

4.3.1.1. Componenti verticali

Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza	Rappresentazione
COV_01	Muratura in laterizio pieno	55 cm	1,08 W/m ² K	

Strato (int.-est.)	Spessore	Densità	Calore specifico	Conducibilità termica
Intonaco interno	2 cm	1400 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,70 W/mK
Mattoni pieni	51 cm	1800 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,72 W/mK
Intonaco esterno	2 cm	1800 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,90 W/mK

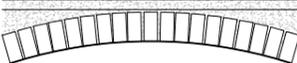
Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza	Rappresentazione
COV_02	Muratura in CLS, livello di isolamento basso	35 cm	0,82 W/m ² K	

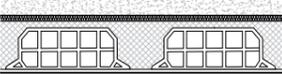
Strato (int.-est.)	Spessore	Densità	Calore specifico	Conducibilità termica
Intonaco interno	1 cm	1400 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,70 W/mK
Pannello fibra di vetro	2 cm	30 kg/m ³	670 J/(kg K)	0,04 W/mK
Pannello CLS	30 cm	1400 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,58 W/mK
Intonaco esterno	2 cm	1800 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,90 W/mK

TAB.11-SPECIFICHE COV_01.

TAB.12-SPECIFICHE COV_02.

4.3.1.2. Componenti orizzontali - chiusure inferiori

Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza	Rappresentazione
COOI_01	Solaio a volte in laterizio	30 cm	1,58 W/m ² K	
Strato (int.-est.)	Spessore	Densità	Calore specifico	Conducibilità termica
Pavimento interno	2 cm	1700 kg/m ³	1000 J/(kg K)	1,47 W/mK
Malta di cemento	2 cm	2000 kg/m ³	1000 J/(kg K)	1,40 W/mK
Massetto in CLS	14 cm	1900 kg/m ³	1000 J/(kg K)	1,06 W/mK
Mattoni pieni	12 cm	1800 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,72 W/mK

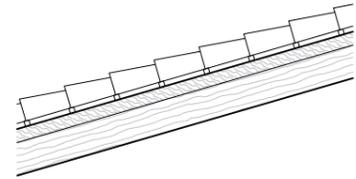
Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza	Rappresentazione	
COOI_02	Solaio in laterocemento, livello di isolamento basso	35,5 cm	1,59 W/m ² K		
Strato (int.-est.)	Spessore	Densità	Calore specifico	Conducibilità termica	Resistenza termica
Pavimento interno	1,5 cm	1700 kg/m ³	1000 J/(kg K)	1,47 W/mK	-
Malta di cemento	2 cm	2000 kg/m ³	1000 J/(kg K)	1,40 W/mK	-
Massetto in CLS	12 cm	1900 kg/m ³	1000 J/(kg K)	1,06 W/mK	-
Malta di cemento	2 cm	2000 kg/m ³	1000 J/(kg K)	-	0.300-0.350*
Soletta	16 cm	900kg/m ³	1000 J/(kg K)	-	-
Intonaco esterno	2 cm	1800 kg/m ³	1000 J/(kg K)	0,90 W/mK	-

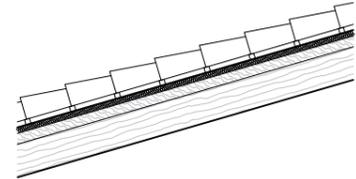
*I valori di resistenza termica sono stati ricavati dalla normativa UNI 10355.

^
TAB.13-SPECIFICHE COOI_01.

^
TAB.14-SPECIFICHE COOI_02.

4.3.1.3. Componenti orizzontali - chiusure superiori

Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza	Rappresentazione
COOS_01	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno	30 cm	1,80 W/m ² K	
Strato (int.-est.)	Spessore	Densità	Calore specifico	Conducibilità termica
Assito in legno	3 cm	550 kg/m ³	1600 J/(kg K)	0,15 W/mK
Coppi in laterizio	-	-	-	-

Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza	Rappresentazione
COOS_02	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, livello di isolamento medio	30 cm	1,05 W/m ² K	
Strato (int.-est.)	Spessore	Densità	Calore specifico	Conducibilità termica
Assito in legno	3 cm	550 kg/m ³	1600 J/(kg K)	0,15 W/mK
Pannello polistirene	2 cm	30 kg/m ³	1220 J/(kg K)	0,045 W/mK
Coppi in laterizio	-	-	-	-

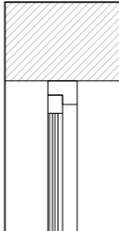
^
TAB.15-SPECIFICHE COOS_01.

^
TAB.16-SPECIFICHE COOS_02.

4.3.2. INVOLUCRO TRASPARENTE

Come per l'involucro opaco, anche per quello trasparente le informazioni sono state desunte dal fascicolo del PINQuA.

Come già riportato in 3.4., tutti i serramenti originali dei fabbricati sono stati sostituiti con serramenti più recenti con telaio in alluminio a taglio termico e vetrocamera. Inoltre, durante il sopralluogo è stato possibile notare che alcune unità immobiliari presentano serramenti sostituiti recentemente con vetro doppio con rivestimento basso-emissivo e telaio in pvc. Dal momento che il numero di tali unità risulta esiguo rispetto alla totalità, queste informazioni sono state trascurate e i serramenti sono stati considerati tutti della medesima tipologia. Pertanto, note queste informazioni, è stato possibile individuare i parametri interessati (trasmissione termica e fattore solare del serramento) all'interno dell'abaco del progetto TABULA.

Codice	Descrizione	Trasmittanza	$g_{gl,n}$	Rappresentazione
CTV_01	Telaio metallico senza taglio termico e vetrocamera con aria in intercapedine	3,4 W/m ² K	0,75	

La definizione delle proprietà termofisiche relative ai serramenti avviene con modalità differenti nei due programmi.

CITYSIM PRO

L'inserimento dei dati relativi all'involucro trasparente su CitySim Pro avviene attraverso la compilazione del file XML generato dal *software*. In questo caso però, a differenza dell'involucro opaco, non è presente un *Tags* specifico per i serramenti ma è possibile inserire unicamente la percentuale vetrata rispetto alla facciata (o alla copertura nel caso di lucernari), la trasmittanza termica del serramento, il fattore solare del serramento e la percentuale apribile direttamente all'interno del *Tags Walls* o del *Tags Roofs* specifico della facciata (o della falda nel caso di lucernari).



TAB.17-SPECIFICHE CTV_01.

CEA

L'inserimento dei dati relativi all'involucro trasparente su CEA invece, avviene attraverso la scheda *Window* della sezione *Envelope* del database *Assemblies*.

Rispetto a CitySim Pro, CEA permette di considerare alcuni parametri aggiuntivi, infatti, oltre alla trasmittanza termica del serramento è possibile indicare il *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC), l'emissività della superficie esterna del componente vetrato e un coefficiente che esprime la frazione della superficie del telaio rispetto a quella dell'intero serramento.

Inoltre, si fa notare che -come nel caso dell'involucro opaco (4.3.1.) - in CEA è possibile considerare un ulteriore parametro, relativo alle emissioni incorporate di GHGs per metro quadro di superficie di serramento espresse in kg CO₂_{eq}/m², relative all'intero processo di produzione del serramento stesso.

Si precisa che è stato necessario assumere alcune semplificazioni per quanto concerne le aperture in facciata, dal momento che è possibile definire unicamente una tipologia di serramento valida per l'intera zona termica.

Pertanto, con riferimento a quanto detto in precedenza, a differenza di CEA in cui è possibile valutare la frazione di telaio rispetto a quella dell'intero serramento attraverso un parametro specifico, nel caso di CitySim Pro l'area del telaio è stata assunta come facente parte della frazione vetrata e non è stata, quindi, considerata come involucro opaco.

Inoltre, sono state considerate come area vetrata tutte le aperture presenti sulle facciate lato cortile dei corpi centrali a due piani in corrispondenza dei locali adibiti a sala riunione, mentre i portoni in legno di ingresso ai fabbricati non sono stati considerati come vetrati.

Nella pagina seguente si riporta la tabella riepilogativa relativa alle percentuali vetrature di ciascuna facciata -in funzione dell'orientamento- per ogni fabbricato.



TAB.18-PERCENTUALE VETRATA PER OGNI EDIFICIO IN RELAZIONE ALL'ESPOSIZIONE DELLA FACCIATA.

Edificio	% sup. vetr. NE	% sup. vetr. SE	% sup. vetr. SO	% sup. vetr. NO
A1	11%	19%	11%	19%
A2	10%	18%	10%	18%
B1	10%	18%	0%	19%
B2	10%	19%	0%	18%
B3	0%	18%	10%	19%
B4	0%	19%	10%	18%

4.4. INDIVIDUAZIONE DELLE ZONE TERMICHE

Una zona termica è intesa come quella parte di edificio che comprende un insieme di ambienti omogenei dal punto di vista termico, le cui variazioni del carico termico sensibile e latente vengono considerate simili e che vengono serviti dallo stesso sistema di climatizzazione e/o riscaldamento. L'individuazione di più zone termiche, quindi, è da imputare alla tipologia del sistema impiantistico presente e alle differenti condizioni d'uso ma anche alla complessità dell'edificio stesso.

La definizione delle zone termiche, infatti, risulta di fondamentale importanza in quanto produce ripercussioni sulla caratterizzazione degli impianti e sulla definizione dei carichi termici endogeni, dal momento che è necessario gestire la coesistenza di molteplici unità abitative aventi caratteristiche differenti all'interno di uno stesso edificio.

Nel caso dell'isolato di Corso Racconigi, nonostante le dimensioni risultino essere modeste, si fa riferimento ad una scala più vasta rispetto a quella che considera un singolo edificio, quindi si è scelto di far coincidere ogni singola zona termica con il volume intero dell'intero edificio, pertanto sono state trascurate le differenze fra le unità immobiliari che si riscontrano abitualmente all'interno di un condominio. Quanto appena detto vale per tutti gli edifici all'interno dell'area, eccezion fatta per

l'edificio A1. Come già detto più volte in precedenza (3.4.), questo edificio è stato sopraelevato nel 1978, pertanto presenta caratteristiche costruttive differenti dal resto dell'area. Dal momento che -generalmente- all'interno di un UBEM è possibile assumere una unica tipologia di involucro -sia opaco che trasparente- valida per tutto l'edificio, al fine di ottenere una analisi che sia il più accurata possibile, è necessario tenere conto di tale differenza. A tal proposito è stata valutata la presenza di due zone termiche unicamente per l'edificio A1.

CITYSIM PRO

Come spiegato nella sezione 2.1.1.1, in CitySim Pro è possibile valutare la presenza di più zone termiche all'interno dello stesso modello.

Tale operazione avviene attraverso il *Tag Building* del file XML, all'interno del quale sono presenti tanti *Tags Zones* quanti si rendono necessari per la descrizione dell'edificio considerato. Ogni *Tags Zones* contiene le informazioni relative alle chiusure verticali, orizzontali (superiori e inferiori) e alle superfici, quindi in questo modo è possibile valutare la presenza della sopraelevazione all'interno del modello.

CEA

Come è stato spiegato in 2.2, CEA è fondato su un modello a singola zona termica che segue quanto riportato all'interno della normativa ISO 13790, pertanto non è possibile valutare la presenza di più zone termiche all'interno di uno stesso edificio. Alla luce di quanto detto, non è stato possibile includere nel modello la presenza della sopraelevazione -avente caratteristiche differenti rispetto all'edificio originale- in quanto non è stato possibile trovare una via alternativa attraverso cui poter valutare le sue caratteristiche.

4.5. DEFINIZIONE DEI CARICHI TERMICI ENDOGENI

I carichi termici endogeni sono definiti come apporti termici che modificano le condizioni di comfort dell'ambiente interno di progetto di una determinata zona termica. Tali carichi termici sono individuabili come apporti gratuiti nella stagione invernale, mentre nella stagione estiva sono individuabili come quote in surplus da eliminare. Questi inoltre possono essere di natura convettiva e/o radiativa: mentre la quota convettiva è convertita istantaneamente in carico termico, la quota radiativa necessita di essere assorbita dalle superfici dei materiali presenti all'interno dell'ambiente di progetto prima di poter essere ceduta al sistema. Pertanto, l'inerzia termica dei componenti presenti all'interno dell'ambiente è responsabile dell'entità

dell'accumulo e del rilascio di queste quote di energia. In sostanza, la quota radiativa è valutabile -rispetto ad un determinato intervallo di tempo- in modo sfasato e smorzato, dovuto proprio all'influenza dell'inerzia termica.

I carichi termici endogeni possono essere classificati in funzione della natura della sorgente che li produce, in particolare: gli occupanti, i sistemi di illuminazione e le apparecchiature elettriche.

Secondo quanto riportato in letteratura, i carichi termici endogeni possono essere valutati in modalità differenti in funzione dello spazio o della persona in modo stocastico o deterministico [3-4]. Pertanto, nel primo caso viene attribuito un certo valore parametrico, in relazione alla tipologia di locale o di destinazione d'uso e allo spazio, riferito alla specifica classe di utilizzo; nel secondo caso invece, viene valutato il comportamento di un singolo occupante e le azioni da esso compiute in relazione alle sorgenti termiche presenti all'interno dell'ambiente progettuale. La valutazione del comportamento degli occupanti ed in particolare una definizione incompleta del loro profilo di presenza-assenza, determina un errore che è fra le cause maggiori di discostamento dei valori prodotti dalla simulazione rispetto a quelli reali.

Sicuramente la metodologia più semplice per considerare la presenza degli occupanti all'interno di un modello è l'utilizzo di abachi deterministici che definiscono la probabilità di utilizzo di un determinato spazio in ogni momento della giornata e per tutto l'anno in funzione delle diverse destinazioni d'uso di un edificio.

Esistono poi, modelli di occupazione stocastica che sono classificabili in tre forme diverse: i processi di Bernoulli, l'analisi di sopravvivenza e le catene di Markov a tempo discreto [4] che si basano sul calcolo delle probabilità di transizione degli occupanti da uno stato ad un altro, in modo che lo stato di un occupante nella fase successiva sia dipendente unicamente dal suo stato attuale.

In generale però, questi modelli si trovano più comunemente in letteratura e richiedono una quantità di parametri di input tali che li rendono inadatti all'utilizzo con riferimento a una scala urbana, pertanto in questo caso si farà riferimento a valori di natura deterministica che si basano sulla tipologia dello spazio preso in considerazione, in quanto in caso diverso sarebbe stato necessario gestire le azioni degli utenti all'interno dell'ambiente urbano, operazione che risulta eccessivamente complessa.

Nello specifico, entrambi i software analizzati utilizzano modelli deterministici basati sullo spazio che fanno riferimento ad abachi semplici definiti in funzione della tipologia di spazio modellato.

CITYSIM PRO

All'interno di CitySim Pro è possibile inserire i dati relativi ai carichi termici endogeni prodotti dagli apparecchi elettrici e dai sistemi di illuminazione attraverso la compilazione del file XML come già visto in precedenza per altri set di dati. Nello specifico questa operazione avviene attraverso i *Tags DeviceType* e *ActivityType*. Tramite il *Tag DeviceType* è possibile inserire la potenza media erogabile, gli apporti di calore derivanti dalla frazione convettiva e da quella radiativa e il profilo di utilizzo orario giornaliero.

In aggiunta, l'algoritmo è in grado di generare un numero stocastico per ciascun valore orario che rappresenta la probabilità di utilizzo dell'apparecchio, dal momento che, se tale valore risultasse minore o uguale a quello dell'i-esima ora, sarebbe tenuto in conto il consumo derivante dal *DeviceType* considerato.

Con il *Tag ActivityType* invece, è possibile collegare gli apparecchi elettrici di ciascun edificio. In questo modo l'algoritmo tiene conto del singolo utilizzo, dell'utilizzo combinato o del non utilizzo degli apparecchi a cui fa riferimento.

In sostanza definito un ambiente all'interno del quale siano presenti più apparecchi elettrici, ognuno associato ad un profilo di utilizzo su base oraria e a una potenza, viene generato dall'algoritmo -in modo stocastico- un valore per ogni ora che successivamente viene confrontato con i valori di ciascun apparecchio -relativi alla medesima ora- al fine di prevedere l'utilizzo degli apparecchi stessi presenti nell'ambiente.

```
<DeviceType id="1" name="Device isolato">
  <Device name="Elettrico" avgPower="180" convectiveFraction="0.7" radiativeFraction="0.3"
    p1="0.5" p2="0.5" p3="0.5" p4="0.5" p5="0.5" p6="0.5" p7="0.5" p8="0.7" p9="0.7" p10="0.5"
    p11="0.5" p12="0.6" p13="0.6" p14="0.6" p15="0.6" p16="0.5" p17="0.5" p18="0.7" p19="0.7"
    p20="0.8" p21="0.8" p22="0.8" p23="0.6" p24="0.6"/>
  <Device name="Illuminazione" avgPower="360" convectiveFraction="0.3" radiativeFraction="0"
    p1="0" p2="0" p3="0" p4="0" p5="0" p6="0" p7="0.15" p8="0.15" p9="0.15" p10="0.15" p11="0.05"
    p12="0.05" p13="0.05" p14="0.05" p15="0.05" p16="0.05" p17="0.2" p18="0.2" p19="0.2"
    p20="0.2" p21="0.2" p22="0.2" p23="0.15" p24="0.15"/>
</DeviceType>

<ActivityType id="1" name="Activity standard">
  <Activity name="activity" deviceType="1" p1="1" p2="1" p3="1" p4="1" p5="1" p6="1" p7="1"
    p8="1" p9="1" p10="1" p11="1" p12="1" p13="1" p14="1" p15="1" p16="1" p17="1" p18="1" p19="1"
    p20="1" p21="1" p22="1" p23="1" p24="1"/>
</ActivityType>
```

FIG.25-STRINGA RELATIVA AI CARICHI TERMICI ENDOGENI DI CITYSIM PRO.

Pertanto, alla luce di quanto detto fin ora è possibile fare alcune osservazioni.

In primo luogo, l'algoritmo è stato formulato in modo da valutare il probabile utilizzo di più dispositivi contemporaneamente, presenti in una zona termica in maniera specifica e non valutando il carico termico in modo parametrico. Quindi, i carichi termici non verranno valutati in funzione delle superfici climatizzate, come accennato in precedenza, in quanto in questo modo non è possibile prevedere il numero, la tipologia, la potenza e l'utilizzo di tutti gli apparecchi presenti all'interno di una zona termica.

In secondo luogo, su CitySim Pro non è possibile individuare un andamento annuo relativo al consumo ma unicamente un andamento giornaliero.

Inoltre, la natura stocastica dei dati non è la più adatta al modello considerato in questa sede, dal momento che è necessario che il valore derivante dai calcoli compaia con certezza nel modello al fine di evitare il confronto in fase finale con risultati in cui compaiano formulazioni differenti.

Infine, come già detto in precedenza, si fa notare come quella appena descritta sia l'unica modalità possibile prevista dal software CitySim Pro per poter inserire i dati relativi ai carichi nel caso in cui si voglia valutare la loro influenza sul modello, in caso contrario non potranno essere valutati secondo altre modalità.

CEA

All'interno di CEA invece, i dati relativi ai carichi termici endogeni sono contenuti all'interno del *database Archetypes* che include diversi *schedules*, elaborati in funzione della tipologia di destinazione d'uso degli edifici (18 destinazioni d'uso diverse supportate dal programma) e che sono basati sugli standards in vigore: nello specifico gli *schedules* presenti all'interno del software sono frutto dello standard SIA 2024 [10] (Fig. 28).

Tali *schedules* si presentano come tabelle editabili composte da:

- la probabilità oraria della presenza degli occupanti nei giorni feriali, sabati e domeniche;
- la probabilità oraria dell'utilizzo dei sistemi di illuminazione e degli apparecchi elettrici nei giorni feriali, sabati e domeniche;
- la probabilità oraria dell'utilizzo di acqua calda sanitaria nei giorni feriali, sabati e domeniche;
- la probabilità mensile di occupazione relativa ad un intero anno;
- la densità degli occupanti.

Si fa notare che nel caso preso in esame gli *schedules* che sono stati utilizzati per la simulazione sono stati editati con valori specifici (vedi 4.5.2.), in accordo con quanto riportato all'interno della normativa EN 16798-1.

Successivamente gli *schedules* vengono trasmessi al modulo dei carichi termici, dove risultano rappresentativi degli apporti termici da tenere in considerazione all'interno del modello.

4.5.1. PROFILI ORARI

Come già accennato, per poter valutare i carichi termici endogeni è necessario definire i profili orari, pertanto lo scopo di questa sezione è quello di descrivere le modalità adottate per il raccoglimento dei dati necessari per definire il profilo temporale su base oraria, che abbia validità per un anno di riferimento -in accordo con i time step dei due programmi- e l'intensità degli apporti termici dovuti agli occupanti, ai sistemi di illuminazione e agli apparecchi elettrici.

È stato possibile ricavare i dati necessari dalla normativa EN 16798-1 del 2019 con riferimento alla destinazione d'uso residenziale. Inoltre, è stata elaborata una scheda riepilogativa all'interno della quale sono stati riportati i principali parametri di input richiesti dai due software utilizzati e i profili giornalieri dei carichi suddivisi per giorni feriali, festivi, sabato e domenica. A tale scopo è stato scelto un anno di riferimento virtuale -in accordo con i dati climatici utilizzati- all'interno del quale è stato individuato e conteggiato il verificarsi dei profili giornalieri sopra detti riportati anch'essi all'interno della scheda riepilogativa riportata di seguito; quindi, per attribuire il numero di giorni feriali e festivi è stato fatto riferimento al calendario riportato nelle pagine seguenti.

Si fa notare che la definizione di una zona termica è strettamente correlata alla definizione dei carichi termici, in quanto all'interno di uno stesso edificio con destinazione d'uso residenziale, sono presenti appartamenti occupati da utenti molto diversi fra loro, basti pensare ad anziani, famiglie o studenti, aspetto che si traduce con profili occupazionali molto diversi. Quindi dato un certo giorno ed una certa ora è possibile definire i comportamenti che si verificano all'interno di un edificio come somma dei comportamenti derivanti da ogni singolo appartamento; tale osservazione risulta veritiera per quanto concerne l'intensità dei carichi termici ma non risulta altrettanto vera in relazione ai profili di presenza-assenza o di utilizzo.

Nel caso dell'isolato di Corso Racconigi 25 però, si è scelto di trascurare le differenze fra le diverse tipologie di utenti, quindi diversi profili occupazionali e di utilizzo delle apparecchiature elettriche, prediligendo il riferimento ad un utente standard,

in quanto il focus del lavoro qui presentato non verte sull'influenza del comportamento degli occupanti sulla domanda energetica.

Pertanto, alla luce di quanto detto fin ora, il fatto che all'interno dei due modelli, ogni edificio coincida con una singola zona termica comporterà sicuramente alcune imprecisioni per quanto riguarda la definizione dei carichi termici, dovute appunto alla semplificazione adottata.

Infine, ai fini della definizione dei carichi termici endogeni, è stato necessario determinare il numero di unità immobiliari presenti all'interno dell'area considerata. In questo caso, come già detto più volte in precedenza (3.4.), è stato possibile conoscere il numero esatto delle unità grazie ai rilievi forniti dall'ATC, informazioni poi confermate dall'osservazione diretta condotta durante il sopralluogo (vedere tab.6).

	Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do		Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do	
Gennaio						1	2						1	2	3	
	3	4	5	6	7	8	9		4	5	6	7	8	9	10	
	10	11	12	13	14	15	16		11	12	13	14	15	16	17	
	17	18	19	20	21	22	23		18	19	20	21	22	23	24	
	24	25	26	27	28	29	30		25	26	27	28	29	30	31	
	31															
Febbraio	Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do		Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do	
		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6	7	
	7	8	9	10	11	12	13		8	9	10	11	12	13	14	
	14	15	16	17	18	19	20		15	16	17	18	19	20	21	
	21	22	23	24	25	26	27		22	23	24	25	26	27	28	
	28							29	30	31						
Marzo	Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do		Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do	
		1	2	3	4	5	6					1	2	3	4	
	7	8	9	10	11	12	13		5	6	7	8	9	10	11	
	14	15	16	17	18	19	20		12	13	14	15	16	17	18	
	21	22	23	24	25	26	27		19	20	21	22	23	24	25	
	28	29	30	31				26	27	28	29	30				
Aprile	Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do		Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do	
					1	2	3							1	2	
	4	5	6	7	8	9	10		3	4	5	6	7	8	9	
	11	12	13	14	15	16	17		10	11	12	13	14	15	16	
	18	19	20	21	22	23	24		17	18	19	20	21	22	23	
	25	26	27	28	29	30		24	25	26	27	28	29	30		
	31							31								
Maggio	Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do		Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do	
							1							1	2	
	2	3	4	5	6	7	8		7	8	9	10	11	12	13	
	9	10	11	12	13	14	15		14	15	16	17	18	19	20	
	16	17	18	19	20	21	22		21	22	23	24	25	26	27	
	23	24	25	26	27	28	29		28	29	30					
	30	31														
Giugno	Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do		Lu	Ma	Me	Gi	Ve	Sa	Do	
			1	2	3	4	5					1	2	3	4	
	6	7	8	9	10	11	12		5	6	7	8	9	10	11	
	13	14	15	16	17	18	19		12	13	14	15	16	17	18	
	20	21	22	23	24	25	26		19	20	21	22	23	24	25	
	27	28	29	30				26	27	28	29	30	31			



FIG.26-ANNO DI RIFERIMENTO.

Profilo utente standard - RESIDENZIALE									
Informazioni generali			Apporti interni			Set points			
Ora di inizio del giorno		0	Occupanti		0,035	T di set-point riscaldamento/inverno		20	°C
Ora di fine del giorno		24	Carico occupanti		Eq.4.1	T di set-point raffrescamento/estate		26	°C
n° giorni x profilo	Feriali	254	Carico elettrico		3	Tasso di ventilaz.		11	l/s pers.
	Sabato	48	Carico illuminazione		6				
	Domenica/festivi	62	Carico vapore		Eq.4.4				
h	Feriali			Sabato			Domenica/Festivi		
	Occupanti	Elettrico	Illuminazione	Occupanti	Elettrico	Illuminazione	Occupanti	Elettrico	Illuminazione
1	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0
2	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0
3	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0
4	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0
5	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0
6	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0	1.0	0.5	0
7	0.5	0.5	0.15	0.8	0.5	0.15	0.8	0.5	0.15
8	0.5	0.7	0.15	0.8	0.7	0.15	0.8	0.7	0.15
9	0.5	0.7	0.15	0.8	0.7	0.15	0.8	0.7	0.15
10	0.1	0.5	0.15	0.8	0.5	0.15	0.8	0.5	0.15
11	0.1	0.5	0.05	0.8	0.5	0.05	0.8	0.5	0.05
12	0.1	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05
13	0.1	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05
14	0.2	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05
15	0.2	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05
16	0.2	0.5	0.05	0.8	0.5	0.05	0.8	0.5	0.05
17	0.5	0.5	0.2	0.8	0.5	0.2	0.8	0.5	0.2
18	0.5	0.7	0.2	0.8	0.7	0.2	0.8	0.7	0.2
19	0.5	0.7	0.2	0.8	0.7	0.2	0.8	0.7	0.2
20	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.2
21	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.2
22	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.2
23	1.0	0.6	0.15	1.0	0.6	0.15	1.0	0.6	0.15
24	1.0	0.6	0.15	1.0	0.6	0.15	1.0	0.6	0.15

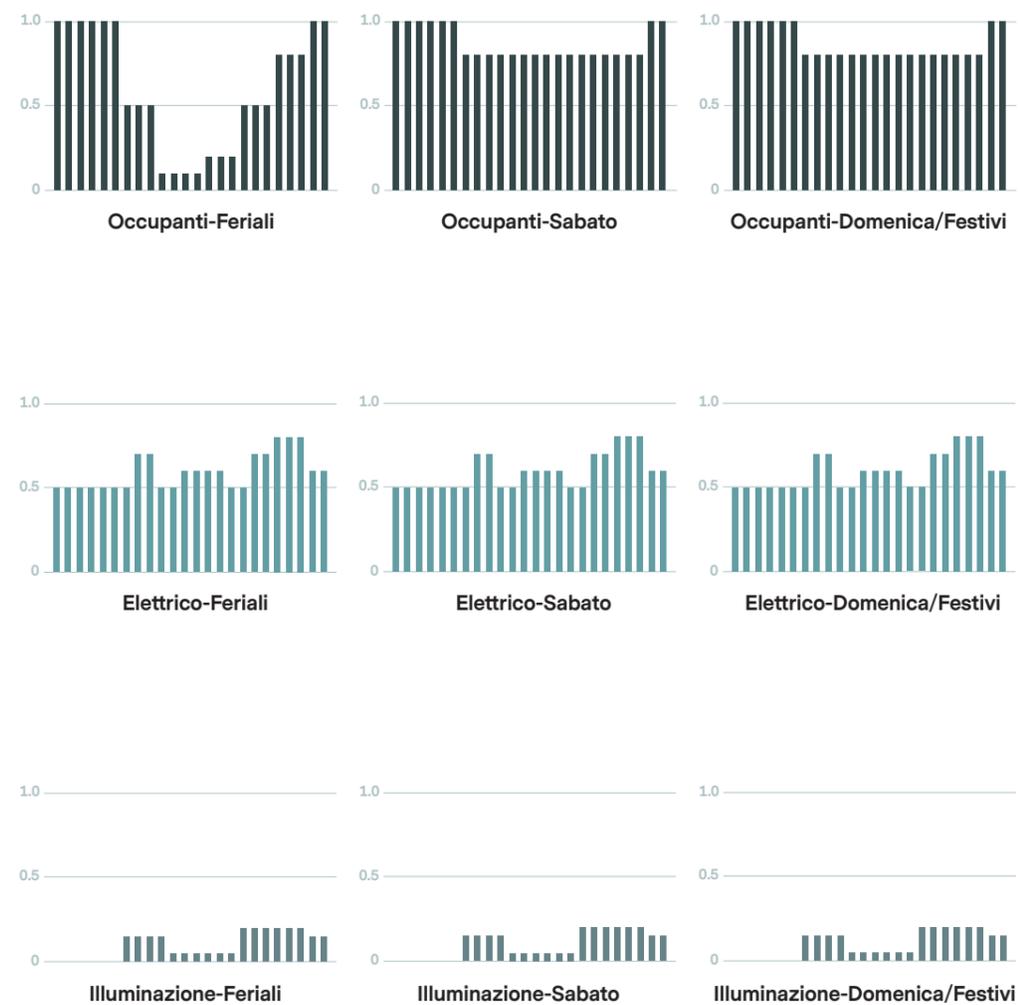


FIG.27-RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI PROFILI ORARI DI OCCUPAZIONE E DI UTILIZZO DELLE APPARECCHIATURE.

TAB.19-SCHEDA RIEPILOGATIVA DEI PROFILI ORARI DI OCCUPAZIONE E DI UTILIZZO DELLE APPARECCHIATURE.

4.5.2. INTENSITA' DEI CARICHI TERMICI ENDOGENI

Come già detto più volte, la presenza degli occupanti influenza significativamente il modello relativo alla domanda energetica dell'edificio, infatti sono proprio le attività svolte degli occupanti che generano le richieste relative all'illuminazione, all'uso degli apparecchi elettrici e ai consumi di acqua calda sanitaria. Inoltre, sono da imputare agli occupanti stessi gli apporti termici dovuti al calore da loro irradiato all'interno degli ambienti di progetto e al vapore d'acqua da essi prodotto. È stato stimato che il comportamento degli occupanti è in grado di influenzare la variazione delle prestazioni energetiche dell'edificio in una misura pari fino al 30%. [5]

Lo scopo dei paragrafi seguenti è quello di illustrare maggiormente nel dettaglio i diversi contributi.

4.5.2.1. APPORTI TERMICI DOVUTI AGLI OCCUPANTI

Secondo quanto riportato all'interno della normativa EN 16798-1 del 2019, le quote convettive, radiative e latenti degli apporti termici dovuti agli occupanti possono essere ricavati dalle seguenti equazioni:

$$q_{\text{int,oc,con}} = O_c \times Q_{\text{sens,cv}} \quad (4.1)$$

$$q_{\text{int,oc,rad}} = O_c \times Q_{\text{sens,rd}} \quad (4.2)$$

$$q_{\text{int,oc,lat}} = O_c \times Q_{\text{lat}} \quad (4.3)$$

Dove:

$q_{\text{int,oc,con}}$: apporto termico convettivo dovuto agli occupanti, in [W/m²];

O_c : occupanti, in [pers/m²];

$Q_{\text{sens,cv}}$: apporto termico convettivo dovuto a ciascun occupante, in [W];

$q_{\text{int,oc,rad}}$: apporto termico radiativo dovuto agli occupanti, in [W/m²];

$Q_{\text{sens,rd}}$: apporto termico radiativo dovuto a ciascun occupante, in [W];

$q_{\text{int,oc,lat}}$: apporto termico latente dovuto agli occupanti, in [W/m²];

Q_{lat} : apporto termico latente dovuto a ciascun occupante, in [W].

Nello specifico, il valore O_c è stato determinato tramite la normativa EN 16798-1 ed è funzione della destinazione d'uso del fabbricato. Nel caso di destinazione d'uso residenziale tale valore corrisponde a:

$$0,035 \text{ [pers/m}^2\text{]}$$

Le quote convettive, radiative e latenti dovute a ciascun occupante invece, sono funzione dell'attività metabolica degli occupanti e della tipologia di spazio considerato, in accordo con quanto riportato nella normativa EN 16798-1 nel caso di destinazione d'uso residenziale:

1,2 Met con: quota convettiva pari a 41W, quota radiativa pari a 39W e quota latente pari a 38 W.

Inoltre, si fa notare che gli occupanti producono vapore attraverso la traspirazione e la sudorazione. Questa quota, espressa in [g/(m²h)] come funzione del calore latente emesso dagli occupanti per metro quadro di superficie, in accordo con quanto riportato all'interno della normativa EN 16798-1, può essere calcolata attraverso l'equazione:

$$G_{\text{wv,oc}} = (q_{\text{int,oc,lat}} / h_{\text{vap}}) \times 3600 \quad (4.4)$$

Dove:

$G_{\text{wv,oc}}$: vapore prodotto tramite la traspirazione degli occupanti, in [g/(m²h)];

$q_{\text{int,oc,lat}}$: apporto termico latente dovuto agli occupanti, in [W/m²];

h_{vap} : entalpia specifica del vapore d'acqua, considerata pari a 2501 [kJ/kg].

In alternativa questa quota può essere calcolata anche in funzione della tipologia di attività svolta degli occupanti, attraverso la seguente equazione:

$$G_{\text{wv,oc}} = O_c \times G_{\text{wv,per}} \quad (4.5)$$

Dove:

$G_{\text{wv,oc}}$: vapore prodotto tramite la traspirazione/sudorazione degli occupanti, in [g/(m²h)];

O_c : occupanti, in [pers/m²];

$G_{\text{wv,per}}$: vapore prodotto da ogni occupante, in [g/(h pers)].

Il valore $G_{\text{wv,per}}$ può essere determinato tramite la normativa EN 16798-1 in funzione della tipologia di attività svolta dall'occupante, nello specifico:

65 [g/(h pers)] per attività leggera da seduti;

80 [g/(h pers)] per attività moderata da seduti.

4.5.2.2. APPORTI TERMICI DOVUTI AI SISTEMI DI ILLUMINAZIONE

Il calcolo degli apporti termici dovuti ai sistemi di illuminazione è stato valutato per via parametrica, moltiplicando la superficie utile di pavimento per il valore ricavato attraverso la normativa UNI/Ts 11300-2 [11]; il valore ottenuto per la destinazione d'uso residenziale è pari a:

$$6 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Si fa notare che sarebbe stato possibile ricorrere al calcolo specifico degli apporti termici dovuti ai sistemi di illuminazione seguendo la procedura illustrata nella normativa UNI EN 15193:2018 [12]. In questo caso però, è stato preferibile utilizzare la metodologia sopra indicata in quanto procedendo con il metodo illustrato nella normativa UNI EN 15193 sarebbe stato richiesto un numero ingente di dati di input, tra cui la definizione degli spazi interni degli edifici. Non essendo questo uno studio finalizzato alla simulazione energetica di un solo edificio ma di un isolato, è stata preferita la metodologia meno complessa e dettagliata.

4.5.2.3. APPORTI TERMICI DOVUTI AGLI APPARECCHI ELETTRICI

Anche in questo caso, il calcolo degli apporti termici dovuti agli apparecchi elettrici è stato valutato per via parametrica, moltiplicando la superficie utile di pavimento per il valore ricavato dalla normativa EN 16798-1; il valore ottenuto per la destinazione d'uso residenziale è pari a:

$$3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

4.6. DEFINIZIONE DELL'IMPIANTO TERMICO

Come per il resto delle informazioni, anche nel caso degli impianti termici è stato possibile ricorrere ai dati forniti dall'ATC tramite il fascicolo del PINQuA. Da questi dati, verificati successivamente in modo diretto durante il sopralluogo, si è appreso che tutte le unità immobiliari presenti all'interno dell'isolato sono servite da impianti di riscaldamento autonomi che presentano caratteristiche simili fra loro.

Partendo da tali considerazioni, in una seconda fase è stato necessario reperire le informazioni richieste dai due software, relative agli impianti installati. Questa operazione è stata possibile tramite il sito del SIPEE, all'interno del quale vengono depositati e raccolti gli Attestati di Prestazione Energetica (APE) delle unità immobiliari e quando necessario, sono state integrate con le informazioni raccolte all'interno del progetto TABULA.

Si fa notare che non è stato possibile trovare gli APE di tutte le unità immobiliari, pertanto essendo noto -come detto precedentemente- che i generatori installati presentano caratteristiche simili, per le unità i cui dati sono risultati mancanti, sono stati condotti alcuni ragionamenti sulla base delle informazioni già disponibili.

Inoltre, si è scelto di considerare all'interno del modello un'unica tipologia di generatore valido per tutte le unità, al fine di semplificare la raccolta e l'inserimento dei dati, dal momento che il focus dell'analisi qui presentata non verte sugli impianti termici.

Come già spiegato nei capitoli precedenti (1.3.4), la definizione dell'impianto termico all'interno di uno strumento UBEM avviene in modalità semplificata rispetto alle modalità in cui avviene in un BEM e in particolare è necessario identificare unicamente il sottosistema di generazione, mentre le perdite di calore riferite agli altri sottosistemi come ad esempio quello di emissione, distribuzione e regolazione, vengono trattate in modo semplificato o addirittura trascurate.

Alla luce di quanto detto fin ora, è stato possibile ricavare la maggior parte delle informazioni necessarie per definizione degli impianti termici dalla consultazione degli APE -quando presenti- e in particolare da tali documenti è stato possibile ricavare: la potenza nominale del sistema di generazione, il rendimento dei sottosistemi ed il vettore energetico utilizzato. Attraverso la consultazione del progetto TABULA invece, è stato possibile ricavare le informazioni relative alla portata massima del flusso riscaldante.

Inoltre, si fa notare che ai fini del calcolo non è stata considerata l'eventuale presenza di impianti di ventilazione forzata in quanto è stata valutata unicamente la ventilazione naturale per gestire i ricambi d'aria all'interno degli appartamenti.

Per quanto riguarda i sistemi di raffrescamento invece, è stato possibile individuare attraverso gli APE e durante il sopralluogo in situ, la presenza di tali sistemi all'interno di alcune unità immobiliari. Dal momento che i sistemi di raffrescamento sono stati riscontrati solo in una minima percentuale rispetto agli appartamenti totali, che gli APE consultabili -come già detto- si riferiscono ad una esigua percentuale rispetto al totale e che in fase di validazione è necessario avere un riscontro con i calcoli standard -che in questo caso non potrebbero essere sufficientemente affidabili- si è scelto di escludere i sistemi di raffrescamento dalla presente analisi.

4.6.1. RISCALDAMENTO

Con riferimento agli impianti termici per il riscaldamento, è necessario determinare il rendimento e la potenza del sistema.

Dal momento che, come si è detto, si è scelto di considerare lo stesso tipo di generatore per tutte le unità immobiliari, è stato necessario individuare un generatore standard fra quelli installati. Per tale operazione è stato necessario consultare tutti gli APE disponibili per l'isolato al fine di individuare la tipologia di generatore più volte ricorrente; successivamente sono stati individuati -all'interno di tali documenti- i dati necessari da importare sui due software. Invece, nel caso in cui i dati relativi ai rendimenti fossero risultati mancanti, si è fatto riferimento a quanto riportato all'interno del progetto TABULA.

Come già detto più volte, ai fini di un'analisi eseguita attraverso uno strumento UBEM è necessario definire unicamente il sistema di generazione ed è quindi possibile trascurare gli altri sottosistemi. Nel caso della presente analisi però, si è deciso di valutare lo stesso l'influenza di tali sottosistemi -emissione, regolazione e distribuzione- inserendo nel calcolo un parametro, ovvero il rendimento termico medio globale, definito dalla relazione che segue:

$$\eta_{H,gl} = \eta_{H,gn} \times \eta_{H,e} \times \eta_{H,d} \times \eta_{H,rg} \quad (4.6)$$

Dove:

$\eta_{H,gl}$: rendimento medio globale del sistema di riscaldamento, in [-];

$\eta_{H,gn}$: rendimento del sottosistema di generazione, in [-];

$\eta_{H,e}$: rendimento del sottosistema di emissione, in [-];

$\eta_{H,d}$: rendimento del sottosistema di distribuzione, in [-];

$\eta_{H,rg}$: rendimento del sottosistema di regolazione, in [-].

Pertanto, attraverso questa procedura è stato possibile considerare il sistema nel suo complesso. Inoltre, si è deciso di non prendere in considerazione il rendimento globale medio stagionale dell'impianto, dato presente all'interno degli Attestati di Prestazione Energetica e definito come rapporto fra l'energia termica fornita dal sistema e il fabbisogno di energia primaria, in quanto lo scopo di tale parametro è la verifica del rispetto di alcuni limiti legislativi.

Di seguito vengono valutati i valori relativi alle potenze e ai rendimenti considerati validi per tutte le unità immobiliari presenti negli edifici dell'isolato di Corso Racconigi 25, al fine di semplificare l'analisi.

EDIFICI A1 (esclusa sopraelevazione), A2, B1, B2, B3, B4

Tutti gli edifici presenti all'interno dell'area sono ovviamente assimilabili sia dal punto di vista architettonico che tecnologico, pertanto sono stati trattati con le stesse modalità. Come già detto più volte, è noto che ciascun appartamento è servito da un generatore autonomo avente una certa potenza e alimentato a gas naturale. Dopo aver consultato tutti gli APE disponibili per l'isolato è stato individuato come generatore di riferimento, un generatore standard con potenza pari a 25 kW.

Pertanto, essendo note le caratteristiche dell'impianto è stato possibile ricavare l'efficienza dei sottosistemi in accordo con quanto riportato all'interno del progetto TABULA e integrando i dati -ove necessario- con la normativa UNI TS 11300-2. Alla luce di quanto detto fin ora, il rendimento termico del generatore "tipo", pari a $\eta_{H,gl} = 0,766$, è stato calcolato come segue:

- Sottosistema di generazione $\eta_{H,gn} = 0,92$ considerando un generatore per un impianto di riscaldamento autonomo, installato in ambiente climatizzato, alimentato a gas naturale;

- Sottosistema di emissione $\eta_{H,e} = 0,925$ considerando radiatori installati fra il 1901 e il 1920;

- Sottosistema di distribuzione $\eta_{H,d} = 0,958$ considerando un sistema di distribuzione separata per ciascun appartamento, installato fino al 1960;

- Sottosistema di regolazione $\eta_{H,rg} = 0,94$ considerando una regolazione di zona con banda proporzionale di 2°C, in presenza di radiatori. (Valore ricavato secondo quanto riportato nella normativa UNI TS 11300-2).

In conclusione, sui programmi CitySim Pro e CEA è stato inserito un unico generatore per ciascun edificio, avente come rendimento medio globale il valore sopra calcolato e per potenza la somma delle potenze dei generatori installati nell'edificio stesso. Pertanto, le potenze inserite sono pari a:

- Edificio A1 (sopraelevazione esclusa): 1950 kW

- Edificio A2: 2075 kW

- Edificio B1: 1000 kW

- Edificio B2: 1000 kW

- Edificio B3: 1000 kW

- Edificio B4: 1000 kW

EDIFICIO A1 – Sopraelevazione

Dal momento che la sopraelevazione all'interno del modello è stata considerata come costituente una zona termica differente rispetto al resto dell'edificio, è stato possibile associarla ad un diverso generatore e ad un impianto termico con caratteristiche differenti, data la diversa epoca di costruzione. Pertanto, anche in questo caso è stato individuato un generatore di riferimento avente potenza pari a 25 kW e un rendimento termico pari a $\eta_{H,gl} = 0,80$, calcolato secondo le modalità riportate di seguito:

- Sottosistema di generazione $\eta_{H,gn} = 0,92$ considerando un generatore per un impianto di riscaldamento autonomo, installato in ambiente climatizzato, alimentato a gas naturale;

- Sottosistema di emissione $\eta_{H,e} = 0,945$ considerando radiatori installati fra il 1976 e il 1990;

- Sottosistema di distribuzione $\eta_{H,d} = 0,980$ considerando un sistema di distribuzione separata per ciascun appartamento, installato fra il 1977 e il 1993;

- Sottosistema di regolazione $\eta_{H,rg} = 0,94$ considerando una regolazione di zona con banda proporzionale di 2°C, in presenza di radiatori. (Valore ricavato secondo quanto riportato nella normativa UNI TS 11300-2).

In conclusione, anche in questo caso sui programmi CitySim Pro e CEA è stato inserito un unico generatore per l'intera sopraelevazione, avente come rendimento medio globale il valore sopra calcolato e per potenza la somma delle potenze dei generatori installati nelle unità facenti parte della sopraelevazione e pari quindi a 725 kW.

Si fa notare che per quanto riguarda l'edificio A1, il numero delle unità facenti parte della sopraelevazione è stato stimato in quanto è noto che all'interno dell'edificio sono state accorpate alcune unità immobiliari, ma non è noto in che misura ciò sia avvenuto nella parte originale dell'edificio e in quale misura nella sopraelevazione.

Nella pagina seguente vengono riportate le tabelle che riassumono il numero, la potenza e i rendimenti dei sistemi di generazione degli impianti di riscaldamento installati all'interno di ogni unità abitativa presente negli edifici dell'isolato considerato.

	A1	A1-Soprael.	A2	B1	B2	B3	B4
Potenza generatore [kW]	1950	725	2075	1000	1000	1000	1000

	A1	A1-Soprael.	A2	B1	B2	B3	B4
Rendimento globale generatore [kW]	0,766	0,80	0,766	0,766	0,766	0,766	0,766

TAB.20-RIEPILOGO DELLE POTENZE DEI GENERATORI.

TAB.21-RIEPILOGO DEI RENDIMENTI DEI GENERATORI.

CITYSIM PRO

L'inserimento dei dati relativi agli impianti di climatizzazione su CitySim Pro avviene attraverso il *Tag Building* del file XML. In questa sezione possono essere definiti sistemi di conversione energetica appartenenti a quattro categorie differenti: le caldaie, le pompe di calore, i sistemi di cogenerazione e i sistemi di cogenerazione combinati con le pompe di calore.

Nel caso dell'isolato preso in esame, come si è visto, sono installate unicamente caldaie che sul software vengono definite attraverso:

- la potenza termica massima, espressa in [W];
- il rendimento del sistema di generazione, espresso in [%].

Si fa notare che avendo suddiviso il modello in due zone termiche è necessario associare tale stringa di codice relativa agli impianti di riscaldamento ad ognuna delle due zone termiche.

Inoltre, dal momento che i diversi generatori in fase di inserimento dati sono stati considerati come un generatore unico avente come potenza la somma delle potenze di tutti i generatori installati, è stato necessario porre attenzione nel considerare il giusto numero di generatori nel caso dell'edificio A1 caratterizzato da due zone termiche differenti.

CEA

L'inserimento dei dati relativi agli impianti di climatizzazione su CEA invece, è più complesso e avviene attraverso la compilazione di diversi *database*.

In primo luogo, nella scheda *Heating* della sezione HVAC del *database Assemblies*, è possibile settare i parametri relativi ai terminali installati all'interno degli ambienti di progetto. In particolare, è possibile definire la tipologia di terminali in funzione di:

- quota convettiva della potenza dell'impianto di riscaldamento in relazione alla potenza totale, nel caso di radiatori = 1, espressa in [%];
- la portata termica massima dell'impianto di riscaldamento per m2 di superficie lorda di pavimento, espressa in [W/m²];
- la temperatura di mandata dell'acqua, espressa in [°C].

In secondo luogo, nella scheda *Heating* della sezione *Supply* del *database Assemblies*, è possibile settare i parametri relativi alla tipologia di generatore installato. Nello specifico, è possibile definire una caldaia attraverso i seguenti parametri:

- il tipo di alimentazione (gas naturale, gasolio, biomasse, ecc...);
- la scala a cui fa riferimento il generatore (distrettuale, dell'edificio, ecc...);
- il rendimento del generatore, espresso in [%].

Infine, attraverso la scheda *Boiler* della sezione *Conversion* del *database Components*, è possibile definire la capacità massima e minima del generatore, espressa in [W].

Si fa notare che in ognuna di queste schede, oltre ai parametri riportati, è possibile settare alcuni parametri relativi ai costi di installazione, di investimento, operativi e di manutenzione, che sono stati trascurati nella presente analisi in quanto non costituiscono il *focus* del lavoro qui descritto.

Tale potenzialità di calcolo del programma spiega quindi la necessità di definizione dei generatori attraverso più schede.

Per informazioni più dettagliate si rimanda alla sezione 4.7.5.

4.6.2. PRODUZIONE DI ACQUA CALDA SANITARIA

Il calcolo del fabbisogno energetico riferito alla produzione di acqua calda sanitaria è stato eseguito solo su CEA in quanto su CitySim Pro è possibile valutare il consumo di ACS solo a livello dell'isolato e non del singolo edificio.

CEA

Il fabbisogno di acqua calda sanitaria su CEA viene definito attraverso gli ingressi in termini di litri d'acqua per persona al giorno (l/pers. g). Dal momento che CEA fornisce la probabilità oraria di utilizzo di ACS, il software valuta la quantità effettiva di acqua utilizzata come probabilità oraria normalizzata, ovvero come la probabilità dell'utilizzo di ACS ad una certa ora, divisa per la somma delle probabilità di utilizzo di ACS relativa ad ogni ora del giorno.

Durante la simulazione, nel caso della presenza di più destinazioni d'uso all'interno di uno stesso edificio, per ognuna di esse viene calcolato il consumo di acqua calda sanitaria come media semplice, attraverso la seguente relazione:

$$V_{dhw}(t) = \sum P_{dhw,i}(t) \times P_{monthly,i} \times d_{dhw,i}(t) \times O_{cc,i} \times Share_i \times NFA \quad (4.7)$$

Dove:

V_{dhw} = consumo di ACS [l/pers. g];

$P_{dhw,i}$ = probabilità oraria dell'utilizzo di ACS, [-];

$P_{monthly,i}$ = Probabilità mensile di utilizzo della funzione dell'edificio [-];

$d_{dhw,i}$ = fabbisogno giornaliero di ACS, in [l/pers. g];

$O_{oc,i}$ = densità occupazionale, in [m²/pers.];

Share_i = percentuale della superficie netta dell'edificio che corrisponde alla funzione i-esima [-];

NFA = superficie netta dell'edificio, in [m²].

Alla luce di quanto detto fin ora, anche in questo caso si è fatto riferimento ad un utilizzo di ACS standard, in accordo con quanto riportato nella normativa EN 16798, e pertanto sono stati generati diversi profili di utilizzo, riferiti a tre diverse tipologie di giornate, ovvero: feriale, festivo, sabato e domenica. I profili orari così individuati vengono riportati nella pagina seguente.

I consumi in termini di volumi d'acqua invece, in accordo con quanto riportato nella normativa EN 16798-1 per la destinazione d'uso residenziale, sono stati calcolati in accordo con la seguente espressione:

$$V_{DHW,day} = a + b/A_u \quad (4.8)$$

Dove:

$V_{DHW,day}$ = uso giornalieri di ACS, in [l/(m² giorno)];

a = coefficiente per il consumo giornaliero di ACS in appartamenti, in [l/(m² giorno)];

b = coefficiente per il consumo giornaliero di ACS in appartamenti, in [l/giorno];

A_u = superficie utile climatizzata.

Si specifica che i coefficienti a e b sono riportati nella tabella A.24 della normativa EN 16798-1:2019.

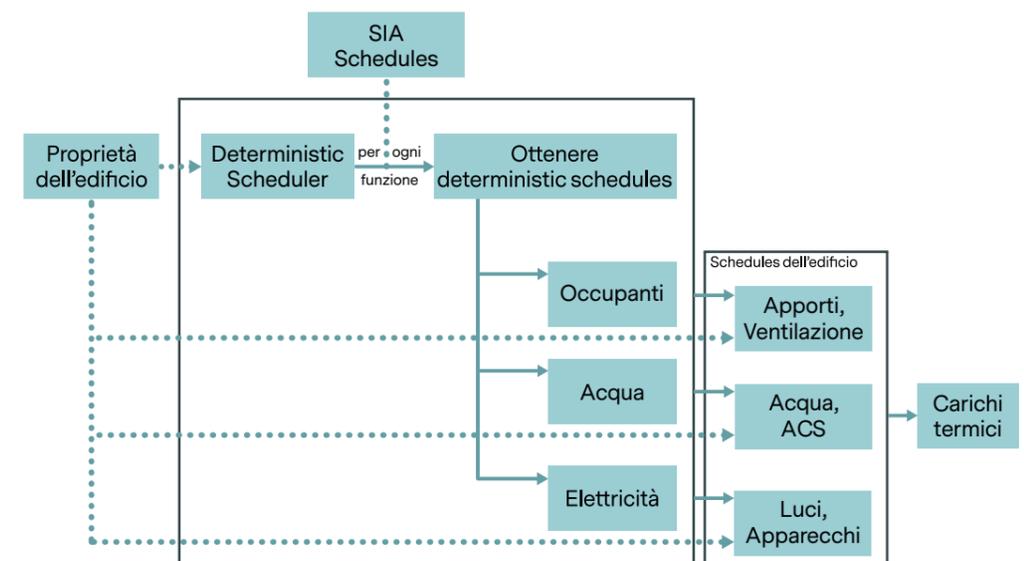
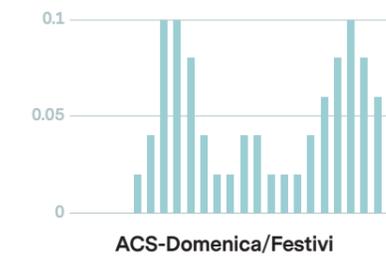
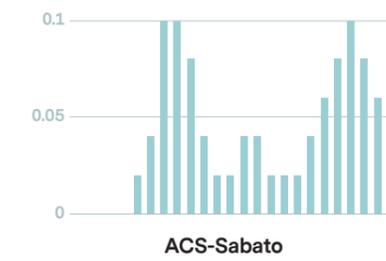
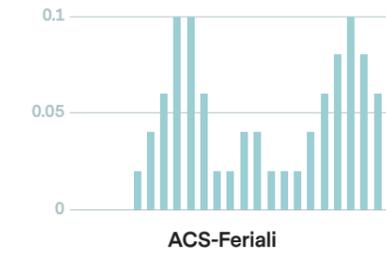


FIG.28- RIELABORAZIONE DELLO SCHEMA DEL FUNZIONAMENTO DEL MODELLO DETERMINISTICO DI CEA PER LA SIMULAZIONE DELLA PRESENZA DEGLI OCCUPANTI. FONTE: <https://cityenergyanalyst.com/>

h	Feriali	Sabato	Domenica/ Festivi
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0.02	0.02	0.02
6	0.04	0.04	0.04
7	0.1	0.06	0.06
8	0.1	0.1	0.1
9	0.08	0.1	0.1
10	0.04	0.06	0.06
11	0.02	0.02	0.02
12	0.02	0.02	0.02
13	0.04	0.04	0.04
14	0.04	0.04	0.04
15	0.02	0.02	0.02
16	0.02	0.02	0.02
17	0.02	0.02	0.02
18	0.04	0.04	0.04
19	0.06	0.06	0.06
20	0.08	0.08	0.08
21	0.1	0.1	0.1
22	0.08	0.08	0.08
23	0.06	0.06	0.06
24	0.02	0.02	0.02

^
TAB.22- SCHEDA RIEPILOGATIVA DEI PROFILI ORARI DI UTILIZZO DI ACS DI UN UTENTE STANDARD.



^
FIG.29-RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI PROFILI ORARI DI UTILIZZO DI ACS.

4.7. CONFRONTO CITYSIM PRO E CEA

Come si è visto precedentemente in questa sezione, la definizione dei parametri termofisici avviene in modalità differenti per i due software. Nello specifico, nel caso di CitySim Pro la definizione avviene manualmente compilando il file XML generato dal programma una volta importati il modello 3D e i dati meteo tramite l'interfaccia grafica, mentre per CEA l'inserimento avviene tramite l'Input Editor dell'interfaccia grafica da cui è possibile selezionare per ogni edificio dell'area una serie di parametri precedentemente settati all'interno di tre database -Archetypes, Assemblies, Components- che possono essere editati e personalizzati e che contengono diverse sezioni e schede.

Lo scopo di questo paragrafo è quello di illustrare nello specifico i parametri di input necessari ai due modelli per ognuno degli elementi da caratterizzare e favorire in questo modo un confronto fra i due software.

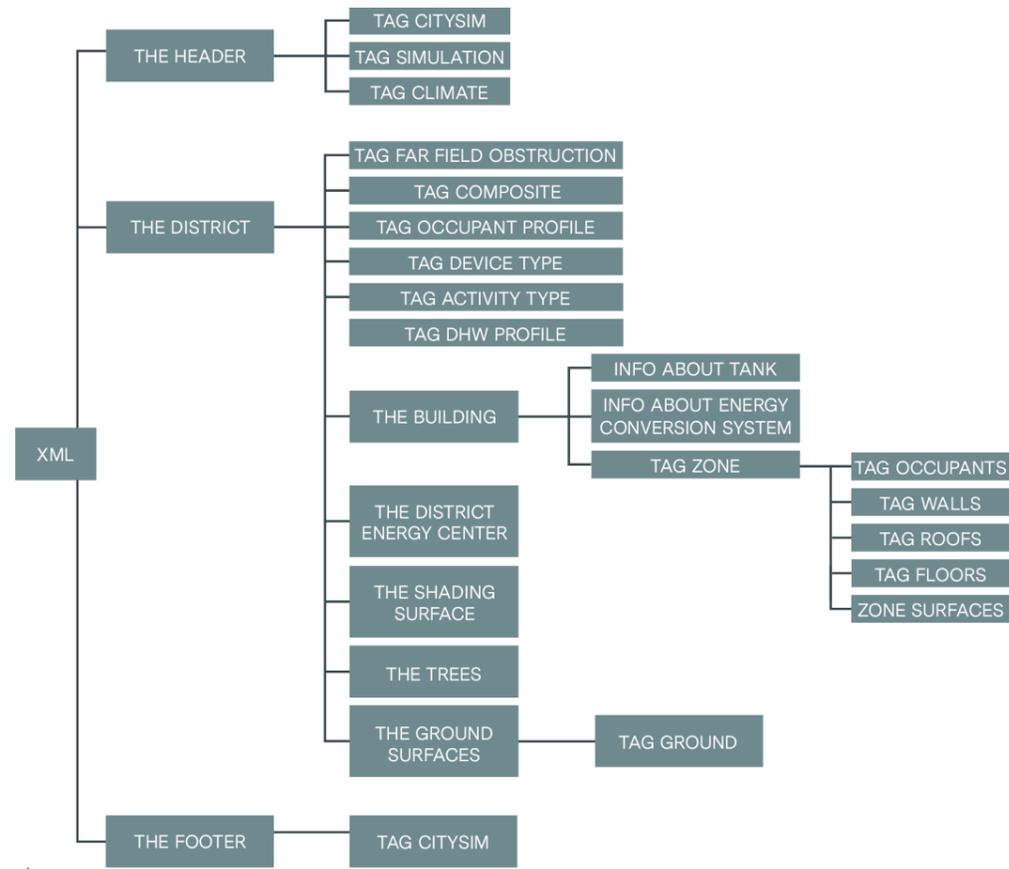


FIG.30- ARTICOLAZIONE DEL FILE XML DI CITYSIM PRO.

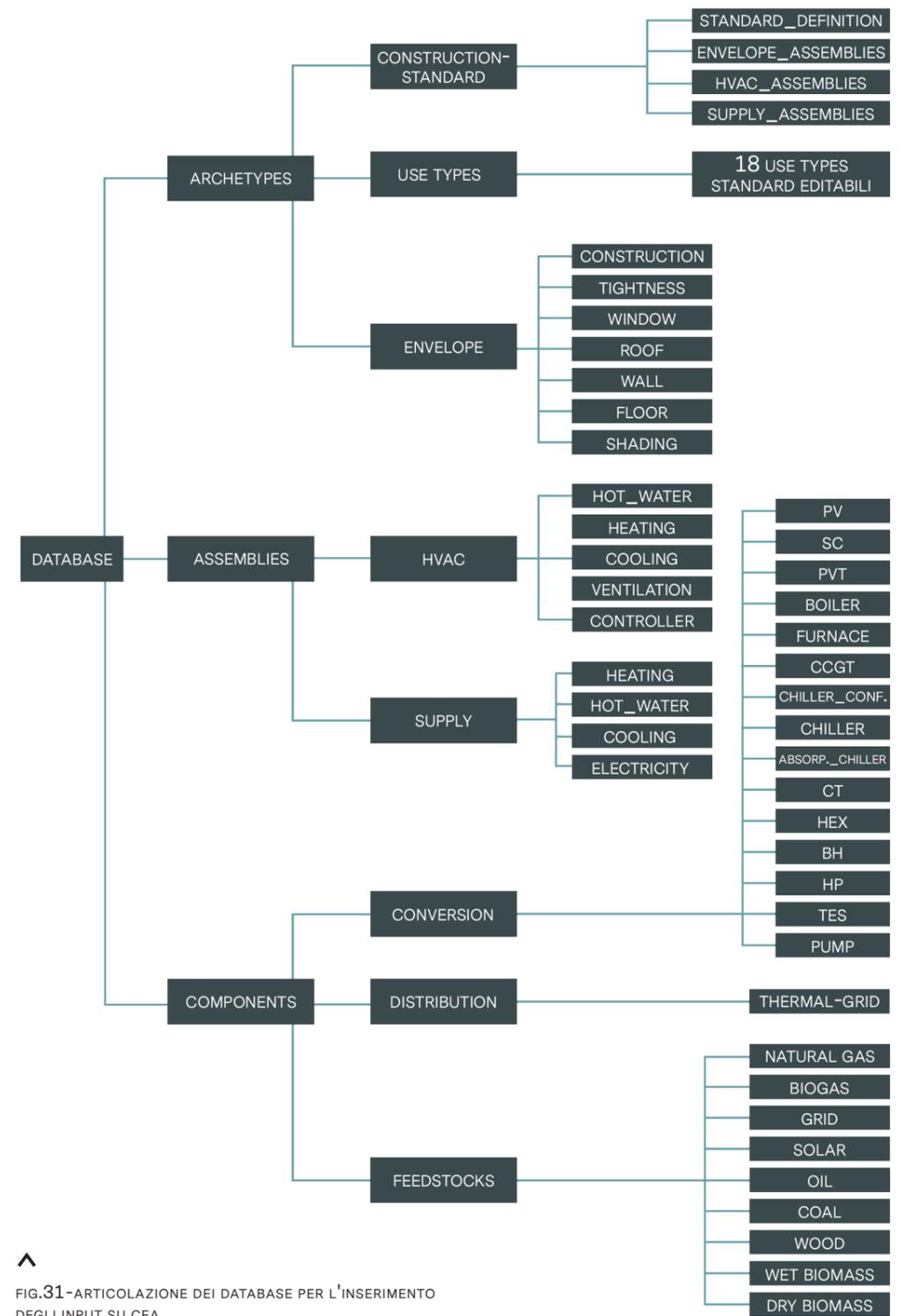


FIG.31- ARTICOLAZIONE DEI DATABASE PER L'INSERIMENTO DEGLI INPUT SU CEA.

4.7.1. PROPRIETA' GEOMETRICHE

CITYSIM PRO

Le informazioni relative alle ostruzioni su CitySim si trovano all'interno del *Tag FarFieldObstructions*, nel *Tag District*, che contiene le informazioni relative alle ostruzioni lontane definite da diversi punti azimutali e dalla loro elevazione.

Inoltre, su questo software è possibile definire le diverse superfici del terreno all'interno del *Tag GroundSurfaces*. Di seguito si riporta la tabella con i parametri di input richiesti.

Parametro	Descrizione	Unità di misura
type	Tipologia di componente definito in <i>Composite</i> .	-
ShortWaveReflectance	Riflettanza ad onde corte del terreno.	%
GROUND	kfactor	Fattore che rappresenta la superficie verde del terreno, dove 0= no verde e 1= superficie verde completamente irrigata.
	V0	Coordinate del primo vertice della superficie.
	V1	Coordinate del secondo vertice della superficie.
	V2	Coordinate del terzo vertice della superficie.

CEA

La prima sezione dell'*Input Editor* di CEA è denominata *zone* e contiene le informazioni relative al numero di piani e alle altezze degli edifici presenti nella scena, a cui è stato attribuito un codice identificativo al momento della generazione delle volumetrie tramite il collegamento ad OpenStreetMap.

Inoltre, è possibile editare le informazioni geometriche relative agli edifici del contesto urbano, dalla sezione *surroundings* dell'*Input Editor*, modificando il numero dei piani e la loro altezza fuori terra.

La tabella nella pagina seguente riporta i parametri di input richiesti nella sezione *zone*.



Parametro	Descrizione	Unità di misura	
ZONE	floors_ag	Numero di piani fuori terra, incluso il PT.	-
	floors_bg	Numero di piani interrati.	-
	height_ag	Altezza complessiva dell'edificio fuori terra.	m
	height_bg	Altezza complessiva dei piani interrati.	m
	REFERENCE	Fonte dei dati (OpenStreetMap o utente).	-

Dal confronto dei parametri di questa sezione emerge che mentre su CEA è possibile modificare in modo intuitivo i dati relativi al contesto -generato automaticamente- selezionando l'edificio desiderato e definendo i valori tramite l'interfaccia grafica, su CitySim Pro tale operazione non è necessaria in quanto gli edifici vengono modellati personalmente dal programmatore ed importati nella scena.

Una differenza evidente invece, è costituita dalla possibilità di caratterizzare e tenere in conto durante la simulazione delle proprietà specifiche del terreno, attraverso la definizione delle sue caratteristiche superficiali.



4.7.2. INVOLUCRO

CITYSIM PRO

I parametri relativi all'involucro devono essere definiti attraverso più sezioni del file XML di CitySim Pro.

In primo luogo, devono essere generati all'interno del *Tag District*, tanti *Tags Composite* quanti sono necessari per definire tutti i componenti di involucro presenti all'interno del modello, definendo nello specifico la stratigrafia attraverso i parametri riportati nella prima tabella. Di fatto con questa operazione si definisce un database di stratigrafie da cui attingere nelle sezioni successive.

In secondo luogo, per ciascun *Tag Zones* all'interno del *Tag Building*, è necessario definire le caratteristiche più specifiche di ciascun *Tags Wall, Roofs e Floors*, come riportato nella seconda tabella.

Si fa notare come non ci sia una sezione apposita per i componenti vetrati ma al contrario questi vengono valutati ogni volta in relazione alla parete o alla copertura su cui si trovano.

Di seguito si riportano le tabelle contenenti i parametri di input richiesti.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
COMPOSITE	Layer Thickness	Spessore del <i>layer</i> .	m
	Conductivity	Conducibilità termica del <i>layer</i> .	W/mK
	Cp	Calore specifico del <i>layer</i> .	J/kg K
	Density	Densità del <i>layer</i> .	kg/m ³

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
WALLS	type	Tipologia di componente definito in <i>Composite</i> .	-
	ShortWaveReflectance	Riflettanza ad onde corte della parete.	%
	GlazingRatio	Frazione della superficie vetrata.	%
	GlazingGValue	Fattore solare del componente vetrato.	-
	GlazingUValue	Trasmittanza del componente vetrato.	W/m ² K
	OpenableRatio	Frazione apribile del componente.	%
	V0	Coordinate del primo vertice della parete.	-
	V1	Coordinate del secondo vertice della parete.	-
	V2	Coordinate del terzo vertice della parete.	-
	V3	Coordinate del quarto vertice della parete.	-
ROOFS	type	Tipologia di componente definito in <i>Composite</i> .	-
	ShortWaveReflectance	Riflettanza ad onde corte della copertura.	%
	GlazingRatio	Frazione della superficie vetrata.	%
	GlazingGValue	Fattore solare del componente vetrato.	-
	GlazingUValue	Trasmittanza del componente vetrato.	W/m ² K
	OpenableRatio	Frazione apribile del componente.	%
	V0	Coordinate del primo vertice della copertura.	-
	V1	Coordinate del secondo vertice della copertura.	-
	V2	Coordinate del terzo vertice della copertura.	-
	V3	Coordinate del quarto vertice della copertura.	-
FLOORS	type	Tipologia di componente definito in <i>Composite</i> .	-
	V0	Coordinate del primo vertice del solaio su terreno.	-
	V1	Coordinate del secondo vertice del solaio su terreno.	-
	V2	Coordinate del terzo vertice del solaio su terreno.	-
	V3	Coordinate del quarto vertice del solaio su terreno.	-



Parametro	Descrizione	Unità di misura
void_deck	Numero di piani con involucro aperto, impostato a 0 di <i>default</i> .	-
Es	Frazione di superficie lorda di pavimento con fabbisogno elettrico.	m^2/m^2_{tot}
Hs_ag	Frazione di superficie lorda di pavimento fuori terra climatizzata.	m^2_{SLP}/m^2_{tot}
Hs_bg	Frazione di superficie lorda di pavimento interrata climatizzata.	m^2_{SLP}/m^2_{tot}
Ns	Frazione di superficie lorda di pavimento.	m^2_{SLP}/m^2_{tot}
wwr_north	Rapporto finestra/facciata - facciata con esposizione a nord.	$m^2_w/m^2_{facc,n}$
wwr_east	Rapporto finestra/facciata - facciata con esposizione a est.	$m^2_w/m^2_{facc,e}$
wwr_south	Rapporto finestra/facciata - facciata con esposizione a sud.	$m^2_w/m^2_{facc,s}$
wwr_west	Rapporto finestra/facciata - facciata con esposizione a ovest.	$m^2_w/m^2_{facc,o}$
type_cons*	Tipologia di costruzione.	-
type_leak*	Livello di tenuta all'aria.	-
type_roof*	Tipologia di copertura.	-
type_shade*	Tipologia di sistema di ombreggiamento.	-
type_wall	Tipologia di chiusura verticale opaca.	-
type_floor*	Tipologia di solaio interno.	-
type_base*	Tipologia di solaio di chiusura inferiore.	-
type_win*	Tipologia di serramento.	-

* Rimando alla tabella 28 per l'approfondimento delle caratteristiche dei parametri.



TAB.27-INPUT INVOLUCRO EDILIZIO, SEZIONE ARCHITECTURE DELL' INPUT EDITOR DI CEA.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
CONSTRUCTION	Cm_Af*	Capacità termica interna per unità di area climatizzata.	J/K m ²
	n50	Ricambi d'aria all'ora ad una pressione di 50 Pascal.	1/h
WINDOW	U_win	Trasmittanza termica del serramento.	W/m ² K
	G_win*	Fattore solare.	-
	e_win*	Emissività della superficie esterna.	-
	F_F*	Coefficiente della frazione di telaio.	m^2_{frame}/m^2_{window}
ROOF	GHG_WIN_kgCO2m2	Emissioni incorporate per m ² di superficie.	kg CO ₂ eq/m ²
	U_roof	Trasmittanza termica della copertura.	W/m ² K
	a_roof*	Coefficiente di assorbimento solare.	-
	e_roof*	Emissività della superficie esterna.	-
	r_roof	Riflessione nell'infrarosso.	-
WALL	GHG_ROOF_kgCO2m2	Emissioni incorporate per m ² di superficie.	kg CO ₂ eq/m ²
	U_wall	Trasmittanza termica della parete.	W/m ² K
	a_wall*	Coefficiente di assorbimento solare.	-
	e_wall*	Emissività della superficie esterna.	-
	r_wall	Riflessione nell'infrarosso.	-
FLOOR	GHG_WALL_kgCO2m2	Emissioni incorporate per m ² di superficie.	kg CO ₂ eq/m ²
	U_base	Trasmittanza termica del solaio.	W/m ² K
SHADING	GHG_FLOOR_kgCO2m2	Emissioni incorporate per m ² di superficie.	kg CO ₂ eq/m ²
	rf_sh*	Coefficiente di ombreggiamento quando il dispositivo è attivo.	-

CEA

I parametri relativi all'involucro -sia opaco che trasparente- sono settabili dalla sezione *architecture* dall'*Input Editor* di CEA per ciascun edificio.

Tali parametri sono stati precedentemente definiti all'interno del *database Assemblies* del programma, nella sezione *Envelope* che a sua volta è articolata in diverse schede, contenenti ognuna parametri specifici, in particolare:

- *Construction*: descrive quanto una costruzione è capacitiva;
- *Tightness*: riguarda la tenuta all'aria dell'edificio;
- *Window*: descrive i parametri termofisici dei serramenti;
- *Roof*: descrive i parametri termofisici dei solai di copertura;
- *Wall*: descrive i parametri termofisici delle pareti;
- *Floor*: descrive i parametri termofisici dei solai di chiusura inferiori;
- *Shading*: descrive i parametri termofisici delle schermature.

Nelle pagine precedenti sono riportate le tabelle contenenti i parametri di input relativi all'involucro.

Dal confronto dei parametri di input emerge che in tutti e due i software i serramenti vengono valutati in funzione della loro posizione baricentrica rispetto alla facciata, in nessuno dei due, infatti, è possibile definire la loro posizione univocamente; in aggiunta su CEA è presente un parametro aggiuntivo relativo alla percentuale di telaio del componente che, al contrario, su CitySim non viene considerato.

Inoltre, si fa notare che su CEA è presente un parametro specifico per valutare la presenza di dispositivi oscuranti.

Per quanto riguarda l'involucro opaco invece, su CitySim è possibile tenere conto dell'inerzia termica di ogni componente in quanto per ognuno viene definita la stratigrafia specifica, mentre su CEA è presente un parametro generale, valido per tutto l'edificio, che definisce la capacità termica interna per m² di superficie climatizzata.



TAB.28-INPUT INVOLUCRO EDILIZIO, SEZIONE *ENVELOPE* DEL DATABASE *ASSEMBLIES* DI CEA.
PARAMETRO*,DEFINITO IN ACCORDO CON LA NORMATIVA ISO 13790.

4.7.3. ZONE TERMICHE**CITYSIM PRO**

A differenza di CEA, su CitySim Pro è possibile definire più zone termiche per ciascun edificio.

Tale operazione è possibile attraverso l'inserimento di più *Tags Zones*, all'interno di ogni *Tag Building*, ognuno dei quali contiene i parametri di input riportati nella tabella seguente.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
	Volume	Volume della zona termica.	m ³
	Psi	Perdite dovute ai ponti termici puntuali e lineari.	W
	GroundFloor	Se la zona termica si trova o meno al piano terra.	-
ZONE	Occupants	Vedere tabella 32.	-
	Walls	Vedere tabella 26.	-
	Roofs	Vedere tabella 26.	-
	Floors	Vedere tabella 26.	-
	ZoneSurface	Vedere tabella 30.	-

I *Tags ZoneSurface* sono necessari per descrivere le superfici di connessione fra le differenti zone termiche.

I parametri di input richiesti da questa sezione sono quelli riportati nella tabella seguente.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
ZONESURFACE	ZoneSurface Area	Area della superficie.	m ²
	type	Tipologia di componente definito in <i>Composite</i> .	-
	Vertical	Orientamento della facciata (verticale o orizzontale).	-
	LinkZone	Codifica della zona termica a cui è connessa.	-



TAB.29-INPUT ZONE TERMICHE, SEZIONE *TAG ZONE* DI CITYSIM.



TAB.30-INPUT ZONE TERMICHE, SEZIONE *ZONESURFACE* DI CITYSIM.

CEA

Come è stato detto in precedenza, CEA si basa su un modello a singola zona termica, in accordo con quanto riportato all'interno della normativa ISO 13790, quindi è possibile considerare solamente una singola zona termica per ciascun edificio. Pertanto, alla luce di tale osservazione, appare chiaro che l'influenza della sopraelevazione del fabbricato A1 all'interno del modello è stata trascurata in quanto non è possibile trovare una modalità per valutarla.

Nonostante ciò, per definire le zone termiche è necessario fare riferimento alla destinazione d'uso del fabbricato.

Tale operazione può essere effettuata attraverso la sezione *typology* dell'*Input Editor* del *software* da cui è possibile selezionare la funzione principale dell'edificio, impostare la sua percentuale -in funzione della superficie lorda di pavimento- e successivamente scegliere la funzione secondaria e terziaria dello stesso -ove presenti- definendo per ognuna la percentuale rispetto alla superficie lorda totale. Le funzioni che possono essere selezionate in questa sezione sono quelle che devono essere precedentemente definite all'interno del *database Archetypes*, nella sezione *Use-types*, all'interno della quale si trovano le 18 funzioni di *default* supportate da CEA. In questo caso, tale *database* è stato modificato, aggiungendo un *Use-types* personalizzato contenente le caratteristiche specifiche dell'isolato di Corso Racconigi (vedere paragrafo 4.7.4.).

Di seguito la tabella con gli input specifici.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
TYPOLOGY	YEAR	Anno di costruzione.	-
	STANDARD	Rimando al <i>database Archetypes</i> .	-
	1ST_USE	Destinazione d'uso principale dell'edificio.	-
	1ST_USE_R	Frazione di superficie lorda di pavimento.	$m^2_{1ST_USE}/m^2_{tot}$
	2ND_USE	Destinazione d'uso secondaria.	-
	2ND_USE_R	Frazione di superficie lorda di pavimento.	$m^2_{2ND_USE}/m^2_{tot}$
	3RD_USE	Destinazione d'uso terziaria.	-
	3RD_USE_R	Frazione di superficie lorda di pavimento.	$m^2_{3RD_USE}/m^2_{tot}$



TAB.31-INPUT ZONE TERMICHE, SEZIONE *TYPOLGY* DELL'*INPUT EDITOR* DI CEA.

Alla luce di quanto riportato è possibile affermare che la definizione delle zone termiche costituisca uno delle maggiori differenze fra i due *software*. È chiaro che l'assenza della possibilità di valutare la presenza di più zone termiche su CEA e quindi trascurare la sopraelevazione, comporterà una semplificazione del modello che produrrà un errore da tenere presente in fase di analisi dei risultati finali.

Un aspetto interessante che si fa notare è la valutazione delle partizioni interne. Mentre su CitySim non è specificabile, su CEA è possibile selezionare dal *database Wall* la tipologia di parete interna più adatta ed inserirla nella specifica sezione dell'*Input Editor*.

4.7.4. CARICHI TERMICI ENDOGENI

CITYSIM PRO

I carichi termici endogeni su CitySim Pro devono essere definiti attraverso più sezioni del file XML.

In primo luogo, è necessario definire i profili orari di occupazione generando -all'interno del *Tag District*- tanti *Tags Occupant profile* quanti sono necessari a definire i diversi profili occupazionali per la simulazione. Tale sezione contiene i profili giornalieri e annuali.

Inoltre, i profili precedentemente impostati devono essere dettagliati all'interno del *Tag Zone*, inserendo i parametri riportati nella tabella seguente.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
OCCUPANTS	Occupants n	Numero di occupanti.	-
	type	Tipologia di profilo definito in <i>Occupant profile</i> .	-
	stochastic	Tipologia di simulazione (deterministica o stocastica).	-
	activityType	Tipologia di attività definito in <i>ActivityType</i> .	-
	DHWType	Profilo di utilizzo di ACS definito in <i>DHW profile</i> .	-

I carichi termici dovuti agli apparecchi elettrici e ai sistemi illuminanti devono essere definiti attraverso il *Tag DeviceType* e *ActivityType*.



TAB.32-INPUT CARICHI TERMICI ENDOGENI SETTABILI DAL *TAG OCCUPANTS* DI CITYSIM.

Il primo contiene le informazioni relative ai diversi dispositivi come riportato nella tabella che segue. Si fa notare che le probabilità sono indipendenti fra loro ovvero, viene generato un numero casuale per tutti i dispositivi per ogni *time-step* per selezionare la potenza totale e gli apporti termici. Tale operazione viene eseguita per tutti i dispositivi riportati all'interno del *Tag DeviceType*.

Il secondo invece, contiene diverse attività, la probabilità di attività oraria e la tipologia di dispositivo. Si fa notare che la probabilità del verificarsi delle attività è mutuamente esclusiva, ovvero per un determinato momento viene eseguita un'unica attività. Pertanto, la probabilità cumulativa delle attività per una certa ora dovrebbe essere pari a 1. Sarà il *software* a calcolare la probabilità cumulativa, l'utente deve unicamente fornire la probabilità media oraria dell'evento.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
DEVICETYPE	avgPower	Potenza media.	W
	convectiveFraction	Frazione convettiva degli apporti di calore sensibile.	-
	radiativeFraction	Frazione radiativa degli apporti di calore sensibile.	-

CEA

All'interno del *software* CEA è possibile impostare i parametri relativi ai carichi termici endogeni dalle sezioni *internal-loads* dell'*Input Editor*.

I profili orari invece, possono essere definiti nel database *Archetypes*, all'interno della sezione *Use-types*. In questa sezione si trovano di *default* i dati relativi a 18 differenti destinazioni d'uso, nel caso preso in esame però questi dati sono stati editati per poter personalizzare i parametri in accordo con le normative vigenti, come riportato in 4.5.

Nella tabella alla pagina seguente si riportano i parametri di input relativi ai carichi termici endogeni.



	Parametro	Descrizione	Unità di misura
INTERNAL-LOADS	Occ_m2pax	Densità di occupazione.	m ² /pers.
	Qs_Wpax	Carico termico sensibile dovuto agli occupanti.	W/pers.
	X_ghpax	Vapor d'acqua prodotto dagli occupanti.	g/h pers.
	Ea_Wm2	Carico elettrico dovuto a computer e dispositivi.	W/m ²
	E1_Wm2	Carico elettrico dovuto agli app. di illuminaz..	W/m ²
	Epro_Wm2	Carico elettrico dovuto a processi industriali.	W/m ²
	Qcre_Wm2	Carico termico dovuto a celle frigorifere.	W/m ²
	Ed_Wm2	Carico elettrico dovuto a server/data center.	W/m ²
	Ev_kWveh	Capacità della batteria elettrica per veicoli.	kW/veh
	Qcpro_Wm2	Carico di raffrescamento per processi spec.	W/m ²
	Qhpro_Wm2	Carico di riscaldamento per processi spec.	W/m ²
	Vww_lpdpax	Consumo giornaliero di acqua calda.	l/pers. gg
Vw_lpdpax	Consumo giornaliero di acqua (include sia quella fredda che quella calda).	l/pers. gg	

Alla luce di quanto riportato nelle tabelle precedenti è possibile fare alcune osservazioni. In primo luogo, si fa notare che entrambi i software offrono la possibilità di valutare i carichi termici endogeni in maniera deterministica o stocastica e permettono di definire i profili orari giornalieri sia riferiti agli occupanti che all'utilizzo dei dispositivi.

Si evidenziano però, alcune differenze: con riferimento agli occupanti, CitySim permette l'inserimento della quota radiativa e della potenza sensibile e latente, mentre su CEA è possibile solamente l'inserimento del carico termico sensibile; in secondo luogo, con riferimento ai dispositivi elettrici si fa notare che su CEA i parametri valutabili siano inferiori rispetto a quelli disponibili su CitySim, ma a differenza di quest'ultimo, CEA consente la valutazione di una serie di carichi specifici di processi industriali, rendendo il programma più adatto ad una simulazione su aree a carattere industriale di grandi dimensioni.



4.7.5. IMPIANTO TERMICO

CITYSIM PRO

I parametri relativi agli impianti termici si trovano all'interno del *Tag Building* di CitySim Pro.

In primo luogo, è necessario definire le informazioni relative agli accumulatori per il riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria che si trovano fra i sistemi di conversione dell'energia e gli ambienti climatizzati.

I parametri richiesti sono riportati nella tabella seguente.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
THE BUILDING	V	Volume dell'accumulo.	m ³
	phi	Perdite di calore dell'accumulo.	W/K
	rho	Densità del fluido.	kg/m ³
	Cp	Calore specifico del fluido.	J/kg K
	Tmin	Temperatura minima del fluido.	°C
	Tmax	Temperatura massima del fluido.	°C
	Tcritical*	Temperatura critica.	°C
	Tinlet**	Temperatura di ingresso dell'acqua (per ACS).	°C

* Parametro valido solamente per gli accumuli relativi ad un impianto di riscaldamento o ACS.

** Parametro valido solamente per gli accumuli relativi ad un impianto di ACS.

In secondo luogo, è necessario definire i generatori di calore che su CitySim sono di quattro tipologie diverse: caldaie, pompe di calore, sistemi di cogenerazione e sistemi di cogenerazione associati a pompe di calore.

I parametri di input necessari per definire i diversi generatori vengono riportati nella tabella alla pagina seguente.

Infine, si ricorda che è necessario definire i profili orari giornalieri relativi al consumo di acqua calda sanitaria e il consumo d'acqua giornaliero per persona, espresso in [l]. Tale operazione può essere effettuata attraverso il *Tag DHW profile*, all'interno del *Tag District* di CitySim Pro.



	Parametro	Descrizione	Unità di misura
BOILER	Pmax	Massima potenza termica erogabile.	W
	eta_th	Efficienza termica.	%
HEAT PUMP	Pmax	Massima potenza termica erogabile.	W
	eta_tech	Efficienza tecnica.	-
	Ttarget	Temperatura target della sorgente.	°C
	Tsource	Tipologia di sorgente.	-
	position	Posizione delle tubazioni (verticale/orizzontale).	-
	depth	Profondità minima della sorgente.	m
COGENERATION SYSTEM	zl	Profondità massima della sorgente.	m
	alpha	Diffusività termica del suolo.	m ² /giorno
	Pmax	Massima potenza termica erogabile.	W
	eta_th	Efficienza termica.	-
	eta_el	Efficienza elettrica.	-
	minPartLoadCoeff	Coefficiente minimo di carico parziale.	-

CEA

I parametri relativi agli impianti termici sono suddivisi in più sezioni all'interno di CEA.

In primo luogo, questi devono essere settati sia all'interno della sezione *air-conditioning-systems* che di quella *supply-systems* dell'*Input Editor*, come viene riportato nella seguente tabella.



	Parametro	Descrizione	Unità di misura
AIR-CONDITIONING-SYSTEMS	type_cs	Tipologia di impianto di raffrescamento.	-
	type_hs	Tipologia di impianto di riscaldamento.	-
	type_dhw	Tipologia di impianto per l'ACS.	-
	type_ctrl	Tipologia di dispositivo di controllo.	-
	type_vent	Tipologia di sistema di ventilazione.	-
	heat_starts	Data di inizio della stagione di riscaldamento.	GG MM
	heat_ends	Data di fine della stagione di riscaldamento.	GG MM
	cool_starts	Data di inizio della stagione di raffrescamento.	GG MM
	cool_ends	Data di fine della stagione di raffrescamento.	GG MM
SUPPLY-SYSTEMS	type_cs	Tipologia di generatore per il raffrescamento.	-
	type_dhw	Tipologia di generatore per la produzione di ACS.	-
	type_el	Tipologia di generatore elettrico.	-
	type_hs	Tipologia di generatore per il riscaldamento.	-

Tali parametri sono stati precedentemente definiti all'interno del *database Assemblies* del programma, nella sezione *HVAC* che a sua volta è articolata in diverse schede, contenenti ognuna parametri specifici:

- *HOT_WATER*: descrive la tipologia di sistema di fornitura di acqua calda;
- *HEATING*: descrive la tipologia di sistema di riscaldamento;
- *COOLING*: descrive la tipologia di sistema di raffrescamento;
- *VENTILATION*: descrive la tipologia di ventilazione;
- *CONTROLLER*: descrive la tipologia di controllo della temperatura.



TAB.37-INPUT IMPIANTI TERMICI SETTABILI DALL'INPUT EDITOR DI CEA.



TAB.38-INPUT IMPIANTI TERMICI, SEZIONE HVAC DEL DATA-BASE ASSEMBLIES DI CEA.

	Parametro	Descrizione	Unità di misura
HOT_WATER	Usww0_C	Temperatura di mandata dell'acqua.	°C
	Qwwmax_Wm2	Portata termica massima consentita dall'impianto di acqua calda per m ² di superficie lorda di pavimento.	W/m ²
HEATING	class_hs	Tipologia o classe del sistema di riscaldamento.	-
	convection_hs	Quota convettiva rispetto alla quota totale.	-
	Qhsmax_Wm2	Portata termica massima consentita dall'impianto di riscaldamento per m ² di superficie lorda.	-
	dThs_C	Temperatura di correzione delle perdite di emissione dovute alla tipologia di impianto di riscaldamento.	W/m ²
	Tshs0_shu_C	Temperatura nominale di mandata dell'acqua dei gruppi termici sensibili.	°C
COOLING	dThs0_shu_C	Aumento della temperatura nominale dell'acqua dei gruppi termici sensibili.	°C
	class_hs	Tipologia o classe del sistema di raffrescamento.	-
	convection_hs	Quota convettiva rispetto alla quota totale.	-
	Qhsmax_Wm2	Portata termica massima consentita dall'impianto di raffrescamento m ² di superficie lorda.	-
	dThs_C	Temperatura di correzione delle perdite di emissione dovute alla tipologia di impianto di raffrescamento.	W/m ²
	Tshs0_shu_C	Temperatura nominale di mandata dell'acqua delle unità di raffrescamento sensibili.	°C
	dThs0_shu_C	Aumento della temperatura nominale dell'acqua delle unità di raffrescamento sensibili.	°C
VENTILATION	MECH_VENT	Ventilazione meccanica attiva (Vero/Falso).	-
	WIN_VENT	Ventilazione naturale attiva (Vero/Falso).	-
	HEAT_REC	Presenza del recuperatore di calore (Vero/Falso).	-
	NIGHT_FLSH	Night flush on (Vero/Falso).	-
	ECONOMIZER	Economizer attivato (Vero/Falso).	-
CONTROLLER	dT_Qhs	Temperatura di correzione delle perdite di emissione dovute al sistema di controllo del riscaldamento.	°C
	dT_Qcs	Temperatura di correzione delle perdite di emissione dovute al sistema di controllo del raffreddamento.	°C

In secondo luogo, devono essere definiti i parametri presenti all'interno della sezione *Supply* che a sua volta è articolata in diverse schede, contenenti ognuna parametri specifici:

- HEATING: descrive la tipologia di generatore per il riscaldamento;
- HOT_WATER: descrive la tipologia di generatore per la produzione di ACS;
- COOLING: descrive la tipologia di generatore per il raffrescamento;
- ELECTRICITY: descrive la tipologia di sistemi all in one.

Parametro	Descrizione	Unità di misura	
HEATING	feedstock	Tipologia di alimentazione utilizzata dal generatore per il riscaldamento.	-
	scale	Scala di alimentazione del generatore (urbana, distrettuale, edificio...)	-
	efficiency	Rendimento del generatore.	-
HOT_WATER	feedstock	Tipologia di alimentazione utilizzata dal generatore per la produzione di ACS.	-
	scale	Scala di alimentazione del generatore (urbana, distrettuale, edificio...)	-
	efficiency	Rendimento del generatore.	-
COOLING	feedstock	Tipologia di alimentazione utilizzata dal generatore per il raffrescamento.	-
	scale	Scala di alimentazione del generatore (urbana, distrettuale, edificio...)	-
	efficiency	Rendimento del generatore.	-
ELECTRICITY	feedstock	Tipologia di alimentazione utilizzata dal generatore per il raffrescamento.	-
	scale	Scala di alimentazione del generatore (urbana, distrettuale, edificio...)	-
	efficiency	Rendimento del generatore.	-



TAB.39-INPUT IMPIANTI TERMICI, SEZIONE *SUPPLY* DEL DATA-BASE *ASSEMBLIES* DI CEA.

Alla luce dei dati riportati è possibile fare alcune osservazioni.

Su entrambi i software non è possibile inserire più generatori che operano in modalità combinata ma su CEA a differenza di CitySim è possibile definire la stagione di riscaldamento, inoltre, sempre su CEA sono presenti parametri più specifici che descrivono ad esempio la tipologia di terminali dell'impianto di climatizzazione.

Anche per quanto riguarda l'impianto per la produzione di acqua calda sanitaria si riscontrano alcune differenze. La più importante è sicuramente la possibilità di valutare il consumo totale solo a livello di isolato su CitySim, al contrario di CEA che permette la valutazione sul singolo edificio.

4.7.6. COMFORT INTERNO

CITYSIM PRO

Su CitySim Pro i parametri relativi al comfort interno degli ambienti di progetto possono essere inseriti all'inizio del *Tag Building* e vengono riportati nella seguente tabella.

Parametro	Descrizione	Unità di misura	
BUILDING	Ninf	Tasso di infiltrazione.	V/h
	Tmin	Temperatura minima di <i>set-point</i> .	°C
	Tmax	Temperatura massima di <i>set-point</i> .	°C
	BlindsLambda	Fattore correttivo delle schermature solari.	-
	BlindsIrradianceCutOff	Irradianza del componente vetrato.	W/m ²
	Simulate	Se l'edificio deve essere simulato o meno.	-

CEA

Su CEA invece, i parametri relativi al comfort interno degli ambienti di progetto possono essere inseriti nella sezione *indoor-comfort* dell'*Input Editor*.

Di seguito si riporta la tabella con i dati di input richiesti dal software.

Parametro	Descrizione	Unità di misura	
INDOOR-COMFORT	Tcs_set_C	Temperatura di <i>setpoint</i> per il sistema di raffrescamento.	°C
	Tcs_setb_C	<i>Setback point</i> della temperatura per il sistema di raffrescamento.	°C
	Ths_set_C	Temperatura di <i>setpoint</i> per il sistema di riscaldamento.	°C
	Ths_setb_C	<i>Setback point</i> della temperatura per il sistema di riscaldamento.	°C
	RH_min_pc	Limite inferiore di UR%.	%
	RH_max_pc	Limite superiore di UR%.	%
	Ve_lpspax	Tassa di ventilazione minimo d'aria esterna per persona.	l/s pers.

TAB.40-INPUT COMFORT INTERNO SETTABILI DAL *TAG BUILDING* DI CITYSIM.

TAB.41-INPUT COMFORT INTERNO SETTABILI DALLA SEZIONE *INDOOR-COMFORT* DELL'*INPUT EDITOR* DI CEA.

4.7. RIFERIMENTI

4.7.1. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

[1] Ballarini I., Corgnati S. P. e Corrado V., Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project, Institut Wohnen und Umwelt, 2012, pp. 81-89, 2012.

[2] Ballarini I., Corgnati S. P. e Corrado V., Building Typology Brochure – Italy, Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana, Luglio 2014, 2014.

[3] Fonseca J. A., Happle G. e Schlueter A., A review on occupant behavior in urban building energy models, Energy & Buildings 174 (2018) 276-292, 2018.

[4] Mosteiro-Romero M., Hischer I., Fonseca J. A., & Schlueter A. A novel population-based occupancy modeling approach for district-scale simulations compared to standard-based methods. Building and Environment, 181 (2020), 2020.

[5] Tian W., Heo Y., de Wilde P., Li Z., Yan D., Park C.S., Feng X., Augenbroe G., A review of uncertainty analysis in building energy assessment, Renew. Sustain. Energy Rev., 93 (2018), pp. 285-301.

EnergyPlus, consultato nel luglio 2021, <https://energyplus.net/>

SIPEE, consultato nel luglio 2021, <http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/ambiente-eenergia/servizi/856-sistema-informativo-per-le-prestazioni-energetiche-degli-edifici-sipee>

GeoPortale Regione Piemonte, consultato nel giugno 2021, <http://www.geoportale.piemonte.it/cms/>

Comune di Torino, consultato nel giugno 2021, <http://www.comune.torino.it/>

City Energy Analyst, consultato nel luglio 2021, <https://cityenergyanalyst.com/>

4.7.2. RIFERIMENTI NORMATIVI

[6] UNI/TR 11552:2014, Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici – Parametri termofisici, 2014.

[7] prEN 16798-1:2019, Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2019.

[8] EN ISO 6946, Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method (ISO 6946:2007), 2007.

[9] ISO 13790:2008, Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling, 2008.

[10] SIA. SIA Energy Efficiency Path. SIA Standard 2024, 2017.

[11] UNI/TS 11300-2, Prestazioni energetiche degli edifici – 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, 2014.

[12] UNI EN 15193:2008, Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione, 2008.

5. VALIDAZIONE DEL MODELLO

Lo scopo della sezione qui presentata è quello di verificare la fondatezza dei risultati prodotti dalle due analisi energetiche riferite alla simulazione dell'isolato di Corso Racconigi.

È necessario specificare che nel caso delle presenti simulazioni non si farà riferimento ad una calibrazione ma ad una validazione. Per validare un modello è necessario adottare una metodologia di calcolo che risulti forte nella sua interezza, infatti, è necessario ricordare che le informazioni che sono state inserite sono state ricavate da normative e banche dati; nonostante ciò, non significa che quanto descritto rispecchi la situazione reale. A tal proposito si ricorda che i dati di input che sono stati necessari per descrivere il comportamento termofisico degli edifici coinvolti sono stati ricavati da informazioni fornite in parte dall'ATC e in parte da informazioni accessibili a chiunque, quindi anche dalle amministrazioni comunali.

Diversa invece è la calibrazione, definita come insieme di operazioni di affinamento dei parametri di input necessarie affinché la condizione simulata tenda a quella reale. Si fa notare che nel caso qui presentato tale modalità non è utilizzabile in quanto in alcuni casi è stato necessario ricorrere a ragionamenti e deduzioni che risultassero il più possibile verosimili ma che di fatto non hanno un riscontro con la condizione reale.

Pertanto, alla luce di quanto detto fino ad ora, i fabbisogni stimati attraverso le simulazioni non coincideranno con quelli riportati sugli Attestati di Prestazione Esergetica proprio a causa dell'impossibilità di avere un riscontro analitico con la situazione reale. Inoltre, si fa notare che spesso le documentazioni consultabili riportano valori relativi agli indici di prestazione chiaramente sovradimensionati o -al contrario- sottodimensionati, aspetto che incrementa la discrepanza fra i risultati. Infine, si riscontrano differenze anche sui risultati provenienti dalle simulazi-

oni dei due *software* -CitySim Pro e CEA- dovuti alle differenti modalità di calcolo e ai parametri di input richiesti.

Partendo da tali premesse, ciò che si vuole mettere in evidenza con la presente analisi è il grado di incertezza con cui l'utente deve interfacciarsi quando intraprende una simulazione a scala distrettuale, dovuta alle semplificazioni adottate tipicamente dagli strumenti UBEM. È doveroso precisare però, che il punto di partenza per diminuire l'errore relativo al singolo edificio e quindi all'intero isolato, sarebbe costituito dalla possibilità di consultare gli Attestati di Prestazione Energetica nella loro totalità dal momento che -come si vedrà più avanti- quelli consultabili sono risultati una trentina circa rispetto alle 350 unità abitative presenti. È chiaro quindi, che avendo più informazioni a disposizione il calcolo risulterebbe più preciso e rappresentativo dell'intero *stock*.

Per concludere, questo modello deve essere considerato come una analisi preliminare che sia necessaria per comprendere il fenomeno nel suo complesso a livello di studio preliminare e che necessita di essere approfondito attraverso informazioni più precise per analisi più puntuali.

5.1. FABBISOGNO TERMICO UTILE PER IL RISCALDAMENTO

5.1.1. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Come spiegato ampiamente in precedenza, il calcolo e la simulazione del modello è stata eseguita con due software diversi. Pertanto, lo scopo di questo paragrafo è quello di analizzare i valori ottenuti, nonché confrontarli con i dati consultabili all'interno degli Attestati di Prestazione Energetica.

I risultati relativi al fabbisogno termico utile per il riscaldamento -che vengono riportati di seguito- sono espressi in termini di indice di prestazione termica utile per il riscaldamento $EP_{H,nd}$ in accordo con la seguente espressione:

$$EP_{H,nd} = (EP_{H,nren} / f_{Pnren}) \eta_{impianto} \quad (5.1)$$

Dove:

$EP_{H,nd}$ = indice di prestazione termica utile per riscaldamento, in [kWh/(m² anno)];

$EP_{H,nren}$ = indice di prestazione energetica non rinnovabile per la climatizzazione invernale, depurato dalla quota dovuta ai servizi energetici serviti da energia elettrica*, in [kWh/(m² anno)];

f_{Pnren} = fattore di conversione dell'energia primaria non rinnovabile, definito in fun-

zione del vettore energetico utilizzato in accordo con quanto riportato nel D.M. 26 giugno 2015 [1], in [-];

$\eta_{impianto}$ = rendimento dell'impianto, in [-].

*Si fa notare che il valore di $EP_{H,nren}$ preso in considerazione è stato prima depurato dalla quota relativa all'energia elettrica, ricavata attraverso il consumo dovuto agli ausiliari elettrici in funzione della superficie utile climatizzata e del relativo fattore di conversione dell'energia.

Inoltre, è necessario osservare che i valori presenti all'interno degli APE riguardano le singole unità immobiliari, mentre i valori derivanti dalle simulazioni con cui devono essere confrontati si riferiscono all'intero edificio, pertanto, è stato necessario determinare la media ponderata dei valori relativi all'indice di prestazione termica utile per riscaldamento, rispetto alla superficie climatizzata, secondo la seguente relazione:

$$EP_{H,nd} = \sum_i EP_{H,nd,i} A_i / \sum_i A_i \quad (5.2)$$

Dove:

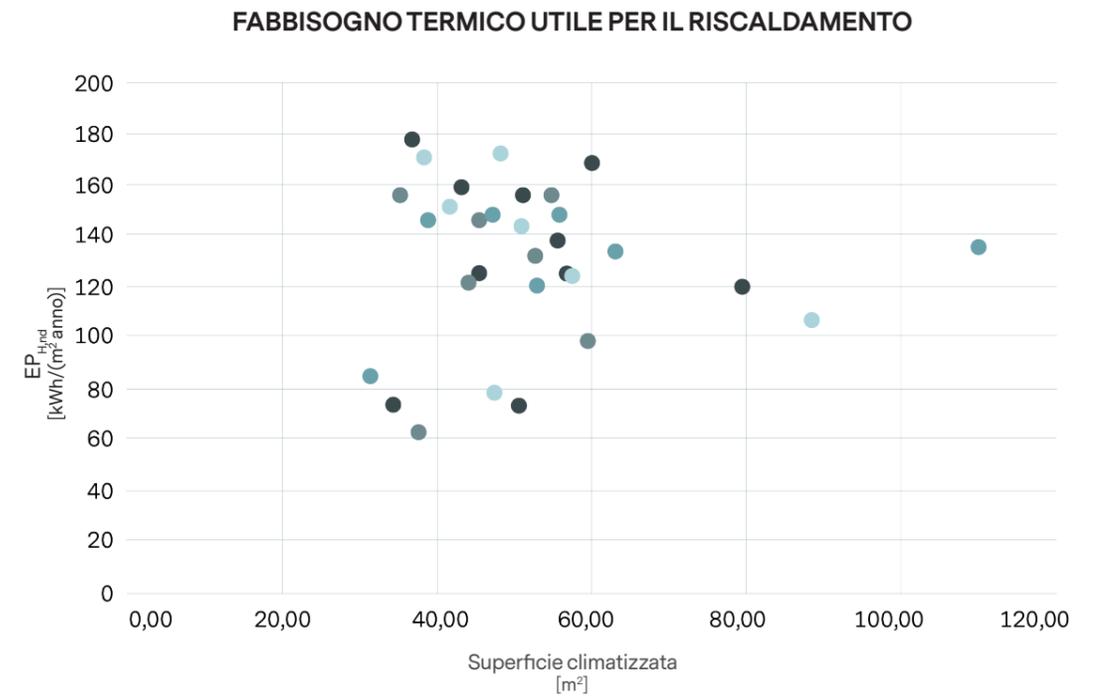
$EP_{H,nd}$ = indice di prestazione termica utile per riscaldamento relativo all'intero edificio, in [kWh/(m² anno)];

$EP_{H,nd,i}$ = indice di prestazione termica utile per riscaldamento relativa all'i-esima unità immobiliare, in [kWh/(m² anno)];

A_i = superficie utile climatizzata dell'i-esima unità immobiliare, in [m²].

Nella tabella riportata nella pagina di seguito si riportano i valori di $EP_{H,nd}$ ricavati dagli APE disponibili depositati sul SIPEE. Come già illustrato nella sezione 5, è stato possibile ottenere solo un numero limitato di Attestati rispetto al numero delle unità totali, ciò detto la simulazione è stata eseguita comunque per tutte le unità. Ai valori riportati nella tabella è stata applicata la relazione sopra illustrata per ottenere il valore relativo all'indice di prestazione termica utile per riscaldamento, valido per ciascun edificio nel suo complesso.

Superficie climatizzata [m ²]	EP _{H,nd} [kWh/(m ² anno)]
59,50	98,27
44,21	121,19
44,21	121,19
47,32	147,54
52,77	131,60
55,66	137,60
54,88	155,61
48,38	171,63
79,48	119,66
63,10	133,43
56,84	124,93
53,08	119,93
110,00	135,22
41,67	151,04
45,58	125,05
60,18	168,00
55,99	147,88
43,34	158,33
47,56	77,98
34,50	73,28
35,27	155,63
37,78	62,54
51,24	155,35
45,58	145,93
37,00	177,20
38,35	170,15
31,56	84,53
51,00	143,27
50,70	72,85
39,00	145,83
88,50	106,40
57,50	123,71



<

TAB.42 - FABBISOGNO TERMICO UTILE PER IL RISCALDAMENTO
ESTRATTO DA APE

Nel caso qui riportato, dal momento che tutti gli edifici presentano medesime caratteristiche, che i documenti reperibili sono un numero ridotto e che nella maggior parte dei casi è stato impossibile ricondurre con esattezza l'APE dell'unità immobiliare al suo edificio di appartenenza, il valore dell'indice di prestazione termica utile per riscaldamento è stato considerato il medesimo per tutti gli edifici dell'area.

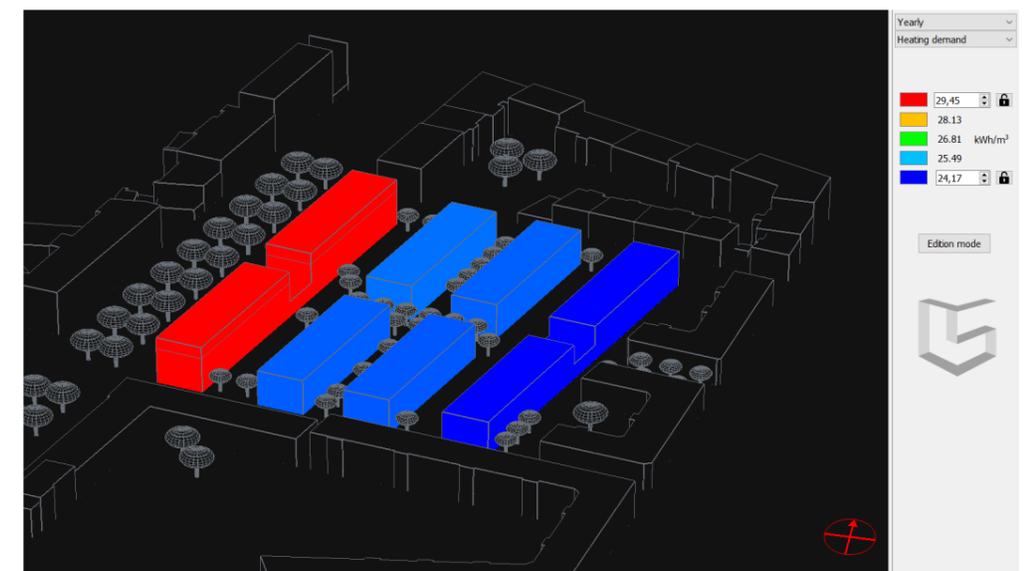
Edificio	$EP_{H,nd;APE}$ [kWh/(m ² anno)]	$EP_{H,nd;CitySim}$ [kWh/(m ² anno)]	$\Delta_{CitySim-APE}$
A1	104,87	130,09	-19,39%
A2	94,78	130,09	-27,14%
B1	97,24	130,09	-25,25%
B2	96,78	130,09	-25,61%
B3	96,76	130,09	-25,62%
B4	96,68	130,09	-25,68%

Prima di procedere con la presentazione e la discussione dei risultati derivanti dall'analisi energetica, è necessario riportare che fra i dati in uscita da City Energy Analyst non è stato possibile individuare i parametri relativi al fabbisogno termico utile per il riscaldamento che potessero essere confrontati con quelli derivanti dalla simulazione avvenuta con il software CitySim Pro e con gli standard leggibili sugli APE, pertanto in questa sezione il confronto con i valori di CEA non potrà essere riportato ma avverrà solo fra gli output di CitySim Pro e i dati standard.

Analizzando i dati in uscita, riportati nella tabella, è immediato notare come i dati ottenuti da CitySim tendano a sottostimare l' $EP_{H,nd}$, le motivazioni di tali differenze verranno discusse più dettagliatamente nel paragrafo successivo. Si fa notare però, che i dati standard utilizzati per il confronto sono frutto di metodologie di calcolo differenti, che pur partendo da medesimi parametri di input, talvolta si differenziano per alcuni aspetti; inoltre, si riferiscono a scale differenti, da un lato rivolti a singole unità immobiliari, dall'altro ad interi edifici. In aggiunta a ciò -come già spiegato nella sezione 3- le semplificazioni e le generalizzazioni adottate dai modelli



TAB.43-CONFRONTO FABBISOGNO TERMICO UTILE PER RISCALDAMENTO ESTRATTO DA CITYSIM PRO E APE



su scala urbana rispetto a quelli sul singolo edificio determinano inevitabilmente un grado di errore che dovrà poi essere associato agli altri.

Come si è detto in precedenza, tutti i manufatti dell'area sono caratterizzati dalla stessa destinazione d'uso, ovvero quella residenziale e presentano le stesse caratteristiche sia architettoniche che tecnologiche e volumetriche, ad eccezione, ovviamente, della sopraelevazione dell'edificio A1. Pertanto, alla luce di tali premesse e dal momento che i documenti consultabili per ciascun edificio sarebbero risultati in numero insufficiente, per cercare di contenere l'errore, i dati riportati all'interno degli Attestati di Prestazione Energetica consultabili sono stati aggregati.

Si fa notare, come quasi tutti i risultati si attestino su percentuali molto simili proprio a causa delle caratteristiche degli edifici estremamente affini. Si può notare però, una differenza più marcata per quanto concerne l'edificio A1. Ciò è dovuto ad una motivazione principale: la sopraelevazione. Come già ricordato più volte, su CitySim Pro è stato possibile valutare due zone termiche differenti in riferimento all'edificio A1, una in corrispondenza dei primi cinque piani dell'edificio, ovvero la parte originale ed una in corrispondenza degli ultimi due piani, ovvero la sopraelevazione che presenta caratteristiche differenti. Dai risultati provenienti da CitySim Pro si può notare come il valore finale di questo edificio sia mediamente più alto



FIG.32-RAPPRESENTAZIONE CROMATICA FABBISOGNO TERMICO UTILE ANNUO PER RISCALDAMENTO IN [kWh/m³], CITYSIM PRO

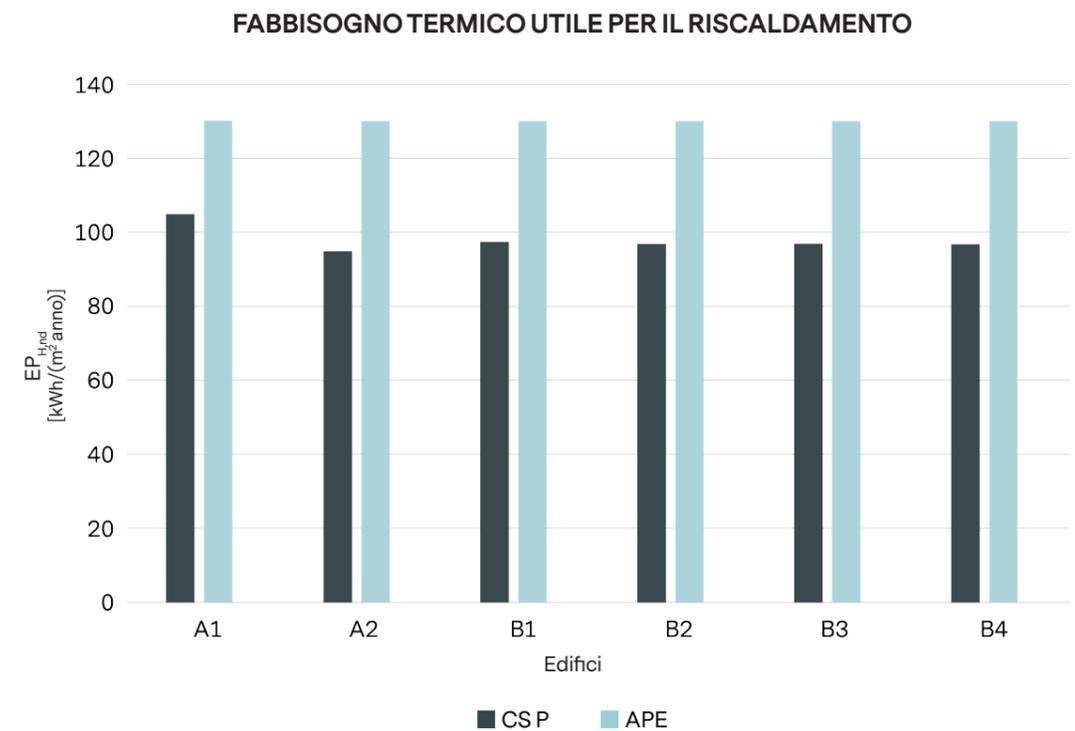
rispetto a quello degli altri, proprio a causa delle caratteristiche di involucro della sopraelevazione.

Infine, si sottolinea nuovamente la limitatezza delle informazioni reperibili, su 350 APE teoricamente disponibili, è stato possibile accedere solamente a circa 40.

Si evidenzia quindi, che il valore medio complessivo dell'intero isolato è pari a -24% per CitySim Pro, valore ritenuto relativamente contenuto.

Nella pagina seguente si riporta il grafico che mostra i risultati dell'andamento annuo dell' $EP_{H,nd}$ ricavato dal software CitySim Pro, confrontato con quello consultabile all'interno degli APE.

A seguito dell'analisi dei risultati si può notare che l'errore risulta abbastanza contenuto, questo può essere dovuto alla destinazione d'uso omogenea dei fabbricati, infatti, è possibile supporre che nel caso della presenza di edifici caratterizzati da destinazioni miste l'errore sarebbe stato più ampio, in ogni caso dal momento che all'interno del caso studio non sono riscontrabili altre funzioni oltre a quella residenziale, non è possibile fare ulteriori osservazioni a riguardo. Pertanto, analizzando i risultati con riferimento all'intero isolato, l'incertezza può essere considerata accettabile.



5.2. ENERGIA EROGATA PER IL RISCALDAMENTO

5.2.1. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Un parametro attraverso cui è possibile paragonare gli output dei due *software* è costituito dall'energia erogata per il riscaldamento.

A differenza del fabbisogno termico utile per il riscaldamento, in questo caso è stato possibile avere un riscontro su entrambi i *software* di simulazione. Occorre però precisare che il dato in uscita da CitySim Pro non comprende l'energia erogata per la produzione di acqua calda sanitaria ma unicamente quella dovuta al riscaldamento -a contrario di CEA che produce i valori relativi ad entrambi i contributi- pertanto, gli output derivanti dalle simulazioni sono espressi in termini di $E_{del, gas, H}$ che per lo standard sono stati ricavati secondo la seguente espressione:

$$E_{del, gas, H} = E_{del, gas, tot} - (EP_{W, nren} / f_{Pnren}) \quad (5.3)$$

Dove:

$E_{del, gas, H}$ = energia erogata dovuta al solo riscaldamento, in [kWh/(m² anno)];

$E_{del, gas, tot}$ = energia erogata totale, in [kWh/(m² anno)];

$EP_{W, nren}$ = indice di prestazione energetica non rinnovabile per la produzione dell'acqua calda sanitaria, in [kWh/(m² anno)];

f_{Pnren} = fattore di conversione dell'energia primaria non rinnovabile, definito in funzione del vettore energetico utilizzato in accordo con quanto riportato nel D.M. 26 giugno 2015, in [-].

Inoltre, anche in questo caso è necessario osservare che i valori presenti all'interno degli APE riguardano le singole unità immobiliari, mentre i valori derivanti dalle simulazioni con cui devono essere confrontati si riferiscono all'intero edificio, pertanto, è stato necessario determinare la media ponderata dei valori relativi all'energia erogata dovuta al solo riscaldamento rispetto alla superficie climatizzata, secondo la seguente relazione:

$$E_{del, gas, H} = \sum_i E_{del, gas, H, i} A_i / \sum_i A_i \quad (5.4)$$

Dove:

$E_{del, gas, H}$ = energia erogata dovuta al solo riscaldamento, in [kWh/(m² anno)];

$E_{del, gas, H, i}$ = energia erogata dovuta al solo riscaldamento relativa all'i-esima unità immobiliare, in [kWh/(m² anno)];

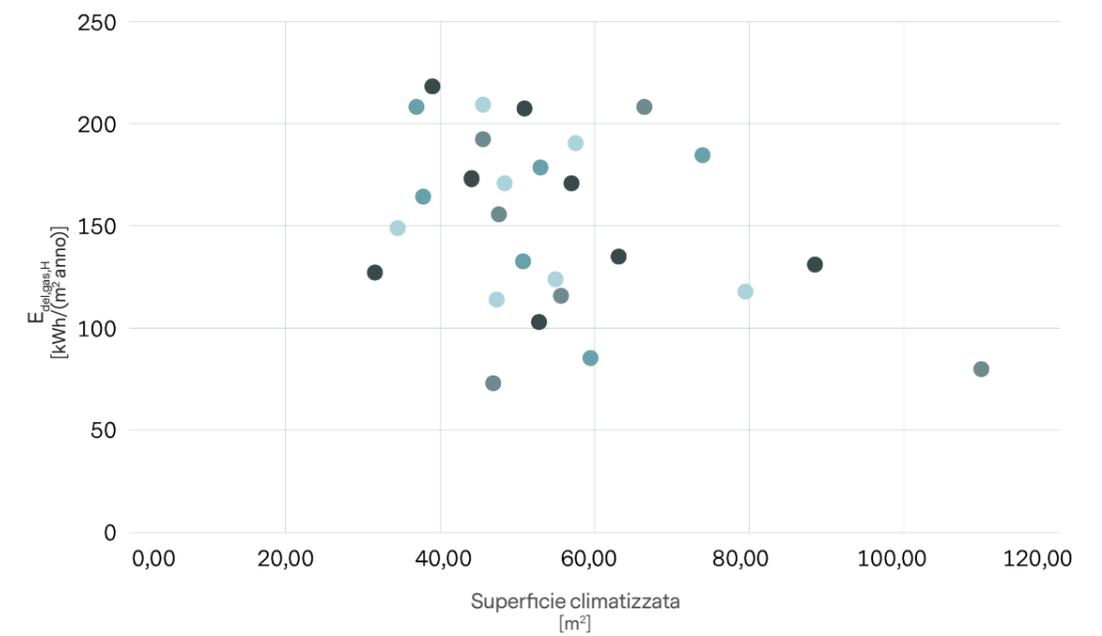
A_i = superficie utile climatizzata dell'i-esima unità immobiliare, in [m²].

Nella tabella di seguito si riportano i valori di $E_{del, gas, H}$ ricavati dagli APE disponibili depositati sul SIPEE. Come già spiegato nel paragrafo precedente, il numero di Attestati consultabili è limitato rispetto al numero delle unità totali, inoltre i valori risultano avere un certo grado di incertezza in quanto sono da imputare a diversi certificatori e a periodi diversi di redazione. In ogni caso, ai valori riportati nella tabella è stata applicata la relazione sopra illustrata per ottenere il valore relativo all'indice di prestazione termica utile per riscaldamento, valido per ciascun edificio nel suo complesso.

Nel caso dell'isolato di Corso Racconigi, dal momento che tutti gli edifici presentano medesime caratteristiche, che i documenti reperibili sono un numero ridotto e che nella maggior parte dei casi è stato impossibile ricondurre con esattezza l'APE dell'unità immobiliare al suo edificio di appartenenza, il valore relativo all'energia erogata dovuto al riscaldamento è stato considerato il medesimo per tutti gli edifici dell'area.

Superficie climatizzata [m ²]	$E_{del, gas, H}$ [kWh/(m ² anno)]
73,85	184,92
59,50	85,31
44,21	173,14
44,21	173,05
47,32	113,84
52,77	102,84
55,66	116,05
54,88	123,72
48,39	170,87
79,48	118,15
63,10	135,20
56,84	171,14
53,08	179,00
110,00	79,88
66,40	208,72
45,58	192,38
46,86	73,23
47,56	155,71
34,50	148,83
37,78	164,37
45,58	209,36
37,00	208,47
31,56	127,20
51,00	207,63
50,70	132,71
39,00	218,30
88,50	131,35
57,50	190,32

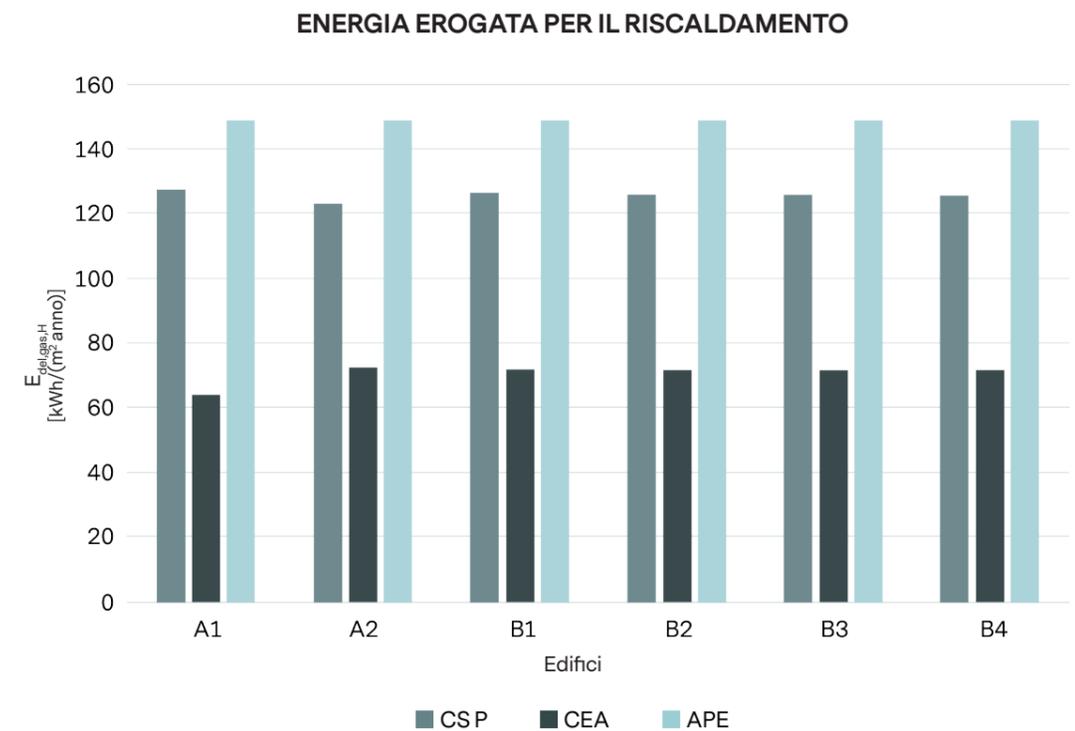
ENERGIA EROGATA PER IL RISCALDAMENTO DA APE



Analizzando i dati in uscita, riportati nella tabella, è immediato notare come i valori provenienti da entrambi i software tendano a sottostimare l' $E_{del, gas, H}$ con una tendenza più accentuata per quanto riguarda gli output CEA, le motivazioni di tali differenze verranno discusse più dettagliatamente nel paragrafo successivo. Si fa notare però, che i dati standard utilizzati per il confronto sono frutto di metodologie di calcolo differenti, che pur partendo da medesimi parametri di input, talvolta si differenziano per alcuni aspetti; inoltre, si riferiscono a scale differenti, da un lato rivolti a singole unità immobiliari, dall'altro ad interi edifici. In aggiunta a ciò, come spiegato anche nel paragrafo precedente, è necessario tenere conto delle generalizzazioni assunte dai modelli su scala urbana rispetto a quelli sul singolo edificio determinano inevitabilmente un grado di errore che dovrà poi essere associato agli altri.

Edificio	$E_{del, gas, H}$ [kWh/(m ² anno)]	$EP_{del, gas, H; CitySim}$ [kWh/(m ² anno)]	$\Delta_{CitySim-APE}$	$EP_{del, gas, H; CEA}$ [kWh/(m ² anno)]	$\Delta_{CEA-APE}$
A1	148,92	127,47	-14,41%	63,98	-57,04%
A2	148,92	122,98	-17,74%	72,36	-51,41%
B1	148,92	126,40	-15,13%	71,80	-51,79%
B2	148,92	125,83	-15,51%	71,60	-51,92%
B3	148,92	125,74	-15,57%	71,43	-52,04%
B4	148,92	125,69	-15,60%	71,42	-52,04%

Nella pagina seguente si riporta il grafico che mostra i risultati dell'andamento annuo dell' $E_{del, gas, H}$ ricavato dai software CitySim Pro e CEA, confrontato con quello consultabile all'interno degli APE.



Osservando i grafici riportati è necessario fare alcune osservazioni riguardo l'andamento dei dati.

In primo luogo, si fa notare, come quasi tutti i risultati relativi agli edifici, provenienti da ciascun rispettivo programma, si attestino su percentuali molto simili fra loro proprio a causa delle caratteristiche degli edifici estremamente affini.

Si può notare invece, una differenza più marcata per quanto concerne l'edificio A1. Ciò è dovuto ad una motivazione principale: la valutazione della sopraelevazione. Come già ricordato più volte, su CitySim Pro è stato possibile valutare due zone termiche differenti in riferimento all'edificio A1, una in corrispondenza dei primi cinque piani dell'edificio, ovvero la parte originale ed una in corrispondenza degli ultimi due piani, ovvero la sopraelevazione, che presenta caratteristiche differenti. Dai risultati provenienti da CitySim Pro si può notare come il valore finale di questo edificio sia poco più alto rispetto a quello degli altri, proprio a causa delle caratteristiche di involucro della sopraelevazione. Al contrario, su City Energy Analyst si verifica la condizione opposta. In questo software non solo non è stato possibile valutare una ulteriore zona termica per la sopraelevazione, ma a fronte delle medesime caratteristiche di involucro, si riscontra una differenza rispetto agli altri edifici per quanto concerne la copertura, che essendo stata realizzata in epoca più recente, risulta isolata rispetto a quella degli altri edifici. Tale aspetto costituisce una delle motivazioni del discostamento di tale risultato sia dalla media degli altri provenienti dallo stesso software sia rispetto al risultato registrato per il medesimo edificio su CitySim Pro.

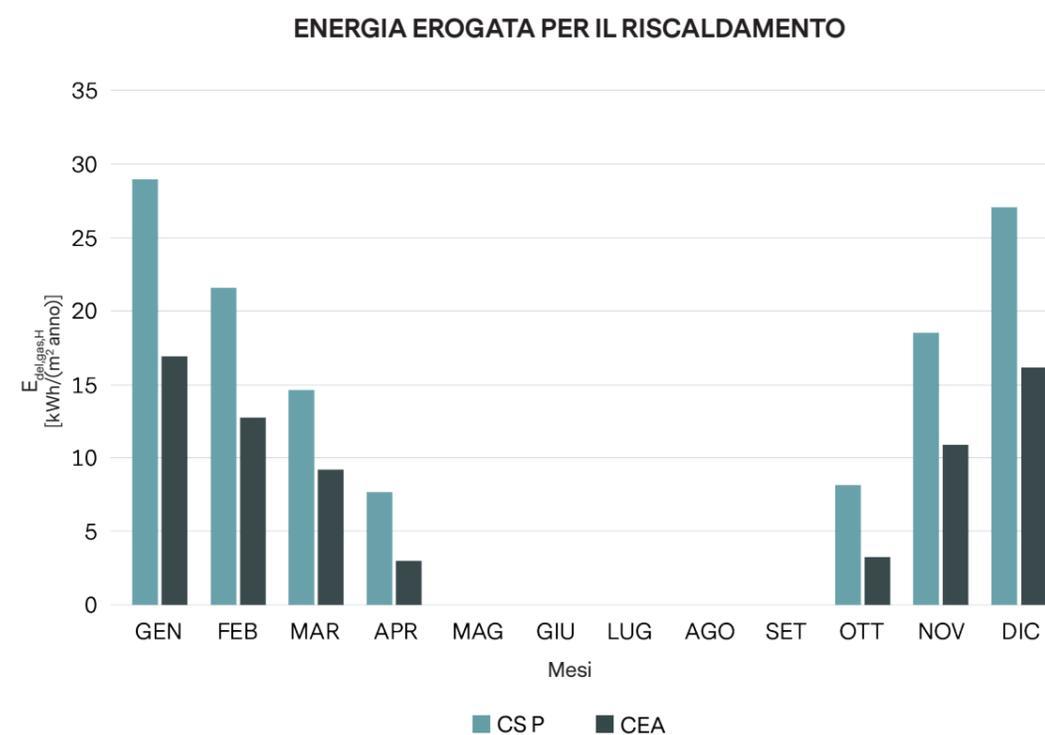
Inoltre, è necessario fare alcune considerazioni sui risultati provenienti dalla simulazione effettuata con CEA. È chiaro che tali risultati non risultino accettabili in quanto la loro percentuale di errore supera il 50%. Questi dati sono sicuramente dovuti alle eccessive semplificazioni assunte dal programma. In fase di inserimento dati infatti, si è notato come ci fosse una attenzione specifica ai carichi termici endogeni relativi a processi industriali specifici ma un trattamento più superficiale dei parametri ritenuti "base" per una simulazione riferita ad una destinazione d'uso residenziale. Tali osservazioni, sommate alle considerazioni fatte in precedenza riguardo la valutazione delle zone termiche, portano a pensare che il software City Energy Analyst sia più adatto ad una simulazione riferita ad aree multifunzionali e industriali. Dal momento che all'interno dell'isolato di studio non sono presenti altre funzioni oltre a quella residenziale, non è possibile fare ulteriori osservazioni in merito.

In conclusione, si evidenzia che il valore medio complessivo dell'intero isolato è

pari a -16% per CitySim Pro e -53% per CEA, valore ritenuto nel primo caso contenuto e nel secondo non accettabile.

Pertanto, a differenza di quanto osservato per CEA, per CitySim Pro l'errore contenuto può essere dovuto proprio alla destinazione d'uso omogenea dei fabbricati. Infatti, come già visto per il fabbisogno termico utile per il riscaldamento, anche in questo caso è possibile supporre che nel caso della presenza di edifici caratterizzati da destinazioni d'uso miste l'errore sarebbe stato più ampio, in ogni caso dal momento che all'interno del caso studio non sono riscontrabili altre funzioni oltre a quella residenziale, non è possibile fare ulteriori osservazioni a riguardo. Pertanto, analizzando i risultati con riferimento all'intero isolato, l'incertezza può essere considerata accettabile per quanto riguarda i valori di output CitySim Pro.

Infine, di seguito si riporta il grafico relativo all'energia erogata per il riscaldamento mensilmente per un edificio rappresentativo scelto fra quelli dell'isolato, ovvero il fabbricato B1. In questo caso viene evidenziato il confronto dell'andamento prodotto dai dati in uscita di CitySim Pro e quelli di CEA.



5.3. FABBISOGNO TERMICO UTILE PER L'ACS

Come già anticipato nel capitolo 4, su CitySim Pro è possibile ottenere unicamente il consumo totale di ACS riferito all'intero isolato, rendendo impossibile la valutazione del contributo dovuto ai singoli edifici, pertanto, il calcolo del fabbisogno energetico per ACS è stato eseguito unicamente su CEA.

Come già avvenuto per il fabbisogno termico utile per il riscaldamento, seppur su CEA i dati di out-put siano organizzati in riferimento al singolo edificio, non è stato possibile trovare parametri relativi al fabbisogno termico utile per l'ACS che fossero confrontabili con i dati standard riportati all'interno degli APE. Pertanto, tali valori -in quanto non validabili- non verranno riportati.

5.4 APPROFONDIMENTO SUI RISULTATI.

Come si è visto nel paragrafo precedente, nonostante l'errore fra i dati simulati e quelli reali sia contenuto, è comunque presente; in aggiunta a ciò esiste un errore significativo anche fra i valori derivanti dalle simulazioni dei due software. Pertanto, lo scopo di questo paragrafo è quello di presentare le motivazioni di tali tendenze.

Per quanto concerne le differenze fra i valori reali e quelli simulati, le motivazioni sono diverse.

In primo luogo, si ricorda che i software riferiti alla scala del singolo edificio e quelli riferiti ad una scala urbana utilizzano modelli di calcolo differenti, così come riportato nel capitolo 3.

In secondo luogo, si ricorda che i software UBEM rispetto ai BEM ricorrono ad alcune semplificazioni dovute principalmente a motivi legati ai tempi di calcolo che in condizioni diverse risulterebbero eccessivi. Una fra le tante risulta la definizione dei componenti di involucro opaco che, mentre all'interno dei BEM vengono definiti dettagliatamente in tutti i loro layers, in un UBEM vengono definiti quasi esclusivamente attraverso la trasmittanza termica. Esempio ancora più significativo risulta essere quello dell'involucro trasparente. Infatti, sono molto limitati i parametri di input relativi ai serramenti, vengono considerati unicamente la trasmittanza dell'intero serramento e il suo fattore solare, trascurando completamente le informazioni relative al telaio e alle sue caratteristiche, ai gas presenti all'interno del vetrocamera e la posizione definita univocamente rispetto alla facciata.

Infine, una ulteriore differenza è costituita dalla definizione degli apporti interni. Come si è visto nei capitoli precedenti, in CitySim Pro e CEA sono stati definiti attraverso un profilo standard che fa riferimento a valori orari, in accordo con quanto riportato all'interno dell'appendice nazionale della normativa prEN16798-1 [4]. I

valori standard con cui vengono confrontati quelli in uscita dai due software invece, fanno riferimento a valori medi mensili in accordo con quanto riportato all'interno della normativa UNI/TS 11300 [1-2].

Anche per quanto concerne i valori in uscita dai due software si registra un certo grado di incertezza dovuta a diversi fattori. Anche in questo caso le cause principali sono da imputare alla definizione delle zone termiche, alla definizione dei componenti di involucro trasparente, alle differenze esistenti fra i modelli termici, nonché alla definizione dei carichi termici endogeni dovuti ai sistemi illuminanti e alle apparecchiature elettriche. Dal momento che tali differenze sono già state analizzate nei capitoli precedenti, si procederà di seguito con una breve descrizione.

Come già spiegato precedentemente in questo paragrafo e nei capitoli precedenti, i due software trattano la definizione delle zone termiche in maniera differente. Pertanto, in questa sede ci si limiterà a ricordare che in entrambi i programmi ogni zona termica coincide con l'intero edificio, con la possibilità però di inserire ulteriori zone -per ciascun fabbricato- in CitySim Pro, aspetto invece non contemplato su CEA (si veda 4.7.3).

Per quanto riguarda i componenti vetrati invece, questi vengono definiti in entrambi i software attraverso la trasmittanza termica del componente e il fattore solare del vetro, inoltre in entrambi la posizione rispetto alla facciata non può essere definita in maniera univoca ma viene assegnata a partire dal suo baricentro. Pertanto, la differenza riscontrabile fra i due risulta essere la possibilità di inserire su CEA alcuni dati aggiuntivi relativi al telaio del componente e all'emissività del vetro (si veda 4.7.2).

Con riferimento ai modelli termici, si ricorda che entrambi i modelli termici dinamici sono costituiti da nodi e resistenze ma nel caso di CitySim Pro è possibile fare riferimento a più zone termiche, mentre nel caso di CEA ci si può riferire ad una singola zona, in accordo con quanto riportato nella normativa ISO 13790 [5] (per approfondimenti si rimanda al paragrafo 2.1.1.1 e 2.2).

Una ulteriore differenza è costituita dai carichi termici endogeni dovuti agli apparecchi elettrici e ai sistemi illuminanti. In CitySim Pro questi vengono valutati attraverso l'inserimento sul file XML dei codici *DeviceType* e *ActivityType* che comporta la valutazione tramite profili giornalieri su base oraria. Inoltre, è necessario inserire la potenza media erogata dagli apparecchi e la loro quota radiativa e convettiva. Su CEA invece i CTE vengono valutati attraverso profili orari definiti per tutto l'anno e la potenza totale per metro quadro di superficie. Inoltre, su questo software non si

riscontra la possibilità di inserire la quota radiativa e convettiva.

Infine, si ricorda che non è possibile conoscere l'incidenza che ogni variabile ha sul totale.

Concludendo, la modellazione energetica a scala urbana costituisce uno strumento estremamente utile come supporto per le amministrazioni che vogliono intervenire sul proprio parco edilizio, necessario al fine di individuare direttamente quali siano gli edifici più energivori su cui intervenire, procedendo nello sviluppo della ricerca con diagnosi energetiche mirate per poter pianificare al meglio gli interventi più appropriati per una riqualificazione energetica efficace. Inoltre, costituisce uno strumento utile per indagare possibili scenari di retrofit a livello di quartiere, grazie alla possibilità di poter gestire e paragonare direttamente tramite il software tutti i diversi scenari di recupero possibili.

5.5. RIFERIMENTI

5.5.1. RIFERIMENTI LEGISLATIVI

[1] Decreto interministeriale 26 giugno 2015, *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, conosciuto come Decreto Requisiti Minimi.

5.5.2. RIFERIMENTI NORMATIVI

[2] UNI/TS 11300-1, *Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*, 2014.

[3] UNI/TS 11300-2, *Prestazioni energetiche degli edifici – 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*, 2014.

[4] prEN 16798-1:2019, *Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, 2019.

[5] ISO 13790:2008, *Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling*, 2008.

6. CONCLUSIONI

Le città occupano circa il 3% della superficie terrestre ma consumano circa il 60-80% dell'energia mondiale, dato che sale all'80% per quanto riguarda il consumo energetico del parco edilizio europeo. In questo contesto diverse sono le iniziative politiche a livello europeo che pongono come obiettivo la totale decarbonizzazione delle città entro il 2050. In quest'ottica, è necessario muoversi verso una simulazione energetica che non si riferisca più solo ad un singolo edificio ma che valuti interi gruppi che non devono necessariamente presentare le medesime caratteristiche. Una simulazione rivolta ad una scala maggiore è fondamentale in quanto è usuale che all'interno degli ambienti urbani si vengano a creare fenomeni di squilibri termici che influiscono sull'alterazione delle prestazioni energetiche di un singolo manufatto. Infatti, le relazioni che intercorrono fra un edificio ed il contesto in cui è inserito influiscono in modo significativo sulle sue prestazioni. Il lavoro di tesi qui presentato nasce a seguito di queste osservazioni.

Il 65% del patrimonio edilizio italiano risulta costruito in epoca precedenti al 1976, anno in cui si vede la prima prescrizione in materia energetica. È chiaro quindi che la situazione italiana sia caratterizzata da un patrimonio esistente che necessita di interventi di miglioramento. Pertanto, la domanda che qui ci si pone riguarda quali strumenti siano più efficaci per simulare le prestazioni energetiche di uno stock edilizio per permettere alle pubbliche amministrazioni di indirizzare le politiche esistenti verso soluzioni migliorative. Il secondo obiettivo di questo lavoro è quello di individuare gli strumenti più agevoli per i tecnici che siano chiamati a comprendere e analizzare la situazione attuale per trovare gli scenari di riqualificazione più appropriati.

I risultati ottenuti con il presente lavoro possono essere distinti in tre sezioni diverse. La prima riguarda la classificazione dei modelli utilizzabili per stimare il fabbisogno energetico di uno stock edilizio, divisi secondo il metodo *top-down* e *bottom-up*.

La seconda riguarda l'analisi dei software disponibili al momento della redazione di tale tesi, utilizzabili per simulazioni su una scala urbana che ha portato alla comprensione delle semplificazioni che vengono assunte da tali programmi rispetto a quelli riferiti ad un singolo edificio. Infine, l'ultima riguarda l'analisi dell'isolato di Corso Racconigi, che ha permesso di testare direttamente due dei software analizzati in precedenza per rispondere alle domande poste all'inizio di questo lavoro. Inoltre, è stata valutata la validità dei dati ottenuti grazie ad un riscontro con dati reali.

Con il lavoro di simulazione riportato nei capitoli precedenti si è voluto testare due strumenti riconosciuti a livello internazionale con gli strumenti nazionali che vengono utilizzati dalle amministrazioni per la valutazione energetica degli immobili. Inoltre, la volontà era quella di testare l'accuratezza e l'applicabilità dei software testati, CitySim Pro e City Energy Analyst.

Ciò che è emerso dalla simulazione è sicuramente uno scostamento dei dati simulati rispetto a quelli letti sugli Attestati di Prestazione Energetica in entrambi i casi. Nel caso di CitySim Pro tale tendenza è risultata contenuta ed accettabile, con valori che sottostimano l'energia termica erogata per il riscaldamento del 16% rispetto agli standard nazionali. Al contrario, il caso di City Energy Analyst risulta più complesso. In questo caso la sottostima dell'energia termica erogata per il riscaldamento è dell'ordine del 54%, valore eccessivamente elevato e assolutamente inaccettabile, molto probabilmente dovuto alle eccessive semplificazioni assunte dal programma che lo rendono poco attendibile in riferimento ad isolati a carattere residenziale. Inoltre, ciò che è stato possibile osservare durante l'utilizzo del software è sicuramente una attenzione particolare alla definizione di una serie di carichi termici endogeni specifici di alcuni processi industriali a scapito della definizione di parametri riferiti maggiormente al settore residenziale. Si ricorda inoltre, la presenza di un intero database che di *default* contiene 18 destinazioni d'uso differenti e una sezione apposita per la definizione delle caratteristiche specifiche. Pertanto, alla luce delle riflessioni maturate a seguito dell'utilizzo del programma, è possibile ipotizzare che CEA sia un software che si presta maggiormente all'utilizzo su aree caratterizzate dalla presenza di industrie o mix funzionali piuttosto che all'utilizzo su isolati a carattere esclusivamente residenziale, per cui non risulta attendibile.

In conclusione, è possibile affermare che, se da un lato la semplificazione caratteristica degli strumenti indirizzati ad una scala urbana produca delle incertezze sul risultato finale, dall'altro rimane un dubbio legato ai margini di incertezza dovuti invece ai dati standard con cui è avvenuto il confronto dei valori simulati. Bisogna ricordare infatti, che gli Attestati di Prestazione Energetica sono da imputare a cer-

tificatori diversi e a diversi periodi di tempo, in aggiunta sono risultati in numero limitato, è possibile affermare che nel caso in cui si potesse avere accesso alla quasi totalità dei documenti l'errore risulterebbe ridotto. Quindi alla luce di tali osservazioni era lecito aspettarsi un certo margine di errore.

Alla luce dei risultati prodotti e delle osservazioni maturate durante l'utilizzo dei due software, è doveroso riportare alcune considerazioni in merito ai tempi di calcolo dei due software. Nel caso di CitySim Pro, nonostante il modello dell'isolato fosse di dimensioni modeste, tali tempi di calcolo sono risultati eccessivi rendendo complessa la correzione in corso d'opera di eventuali errori. Tendenza completamente contraria si riscontra invece su CEA, dove i tempi di calcolo sono risultati esigui, aspetto che favorisce la correzione di eventuali errori presenti sul modello.

Infine, si riportano alcune considerazioni riguardo le modalità di inserimento dei dati. L'interfaccia grafica di CEA si è rivelata uno strumento estremamente utile ed intuitivo, caratteristiche che hanno favorito l'inserimento dei dati in maniera celere. Altrettanto non si può dire per l'interfaccia di CitySim Pro invece, che è risultata molto lenta anche solo nel selezionare eventuali elementi del modello. Tale aspetto rende impossibile la definizione delle caratteristiche dall'interfaccia, obbligando l'utente a ricorrere alla compilazione del file XML.

Concludendo, è chiaro che sarebbe necessario trovare un buon compromesso fra i punti forti caratteristici dei ognuno dei due software: affidabilità dei risultati, tempi di calcolo contenuti, facilità nell'inserimento dei dati e buona applicabilità.

Fra gli sviluppi futuri sarebbe sicuramente interessante la possibilità di estendere l'utilizzo di tali software a porzioni di città sempre più vaste su cui poter effettuare interventi di retrofit energetico. In questo modo le amministrazioni comunali sarebbero in grado di individuare gli edifici più energivori su cui intervenire per indirizzare in modo puntuale ed efficace le risorse pubbliche a loro disposizione, spesso limitate.